



NEWS



Kazan
State
University
Architecture
Engineering

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
МИНИСТЕРСТВО СТРОИТЕЛЬСТВА, АРХИТЕКТУРЫ
И ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНОГО ХОЗЯЙСТВА РТ
МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И ДОРОЖНОГО ХОЗЯЙСТВА РТ

Известия КГАСУ 2023г., № 3(65)

ББК 38
И 33
УДК 69

Главный редактор: д-р техн. наук, проф. чл.-корр. АН РТ Р.К. Низамов
Зам. главного редактора: канд. техн. наук, доц. Е.А. Вдовин

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Айдарова Г.Н., д-р арх., проф. советник РААСН;	Мирсаяпов Илизар Т., д-р техн. наук, проф.;
Гагарин В.Г., д-р техн. наук, проф. чл.-корр. РААСН;	Мирсаяпов Ильшат Т., д-р техн. наук, проф. чл.-корр. РААСН;
Горячев М.Г., д-р техн. наук, проф.;	Стрелков А.К., д-р техн. наук, проф.;
Есаулов Г.В., д-р арх., проф., академик РААСН;	Строганов В.Ф., д-р хим. наук, проф., почетный член РААСН;
Ильичев В.А., д-р техн. наук, проф., первый вице-президент РААСН;	Сулейманов А.М., д-р техн. наук, проф. чл.-корр. АН РТ;
Каюмов Р.А., д-р физ.-мат. наук, проф.;	Тунакова Ю.А., д-р хим. наук, проф.;
Кичигин В.И., д-р техн. наук, проф.;	Углова Е.В., д-р техн. наук, проф.;
Королев Е.В., д-р техн. наук, проф.;	Хозин В.Г., д-р техн. наук, проф.;
Кочев А.Г., д-р техн. наук, проф. чл.-корр. РААСН;	Шагидуллин Р.Р., д-р хим. наук, чл.-корр. АН РТ;
Логачев К.И., д-р техн. наук, проф.;	Яковлев Г.И., д-р техн. наук, проф.

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

Рольф Катценбах, д-р техн. наук, проф. (Германия);	Фишер Х.-Б., доктор-инженер (Германия);
Фиговский О.Л., д-р техн. наук, проф., член Европейской АН, иностранный член РААСН (Израиль);	Хассан Абдалла, д-р наук (PhD), проф. (Великобритания);
	Янотка И., д-р техн. наук, с.н.с. (Словакия).

УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ:

ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет»

Журнал включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, определяемый Высшей аттестационной комиссией (ВАК), рекомендованных для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук. Статьи рецензируются. Перепечатка без разрешения редакции запрещена, ссылки на журнал при цитировании обязательны.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Свидетельство о регистрации № ФС77-31046 от 25 января 2008г.). Включен в подписной каталог ГК «Урал - Пресс» индекс издания – 36939.

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

420043, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1, комн. 79

Тел. (843) 510-46-39

E-mail: patent@kgasu.ru Сайт: <http://izvestija.kgasu.ru>

MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION
OF THE RUSSIAN FEDERATION

KAZAN STATE UNIVERSITY OF ARCHITECTURE AND ENGINEERING

MINISTRY OF CONSTRUCTION, ARCHITECTURE AND HOUSING
OF THE REPUBLIC OF TATARSTAN

MINISTRY OF TRANSPORT AND ROADS
OF THE REPUBLIC OF TATARSTAN

News KSUAE 2023, № 3(65)

BBC 38
I 33
UDC 69

Editor-in-Chief: Dr. tech. sci., prof. corr.-m. AS RT Nizamov R.K.
Deputy Editor-in-Chief: Cand. tech. sci., associate prof. Vdovin E.A.

EDITORIAL BOARD:

Aidarova G.N. Dr. arch. sci., prof., advisor of RAACS;	Mirsayapov Ilizar T., Dr. tech. sci., prof. corr.-m. RAACS;
Gagarin V.G., Dr. tech. sci., prof. corr.-m. of RAACS;	RAACS;
Goriachev M.G., Dr. tech. sci., prof.;	Mirsayapov Ilshat T., Dr. tech. sci., prof.;
Esaulov G.V., Dr. arch. sci., prof., member of the Academy of RAACS;	Strelkov A.K., Dr. tech. sci., prof.;
Ilichev V.A., Dr. tech. sci., prof., First Vice President of RAACS;	Stroganov V.F., Dr. chem. sci., prof., honorary m. of RAACS;
Kayumov R.A., Dr. phys-mat. sci., prof.;	Suleimanov A.M., Dr. tech. sci., prof. corr.-m. AS RT;
Kichigin V.I., Dr. tech. sci., prof.;	Tunakova Iu.A., Dr. chem. sci., prof.;
Korolev E.V., Dr. tech. sci., prof.;	Uglova E.V., Dr. tech. sci., prof.;
Kochev A.G., Dr. tech. sci., prof. corr.-m. RAACS;	Khozin V.G., Dr. tech. sci., prof.;
Logachev K.I., Dr. tech. sci., prof.;	Shagidullin R.R., Dr. chem. sci., corr.-m. AS RT;
	Iakovlev G.I., Dr. tech. sci., prof.

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD:

Rolf Katzenbach, Dr. tech. sci., prof. (Germany);	Fischer H.-B., Dr.-Ing (Germany);
Figovskiy O.L., Dr. tech. sci., prof., member of EAS, foreign member of RAACS (Israel);	Hassan Abdalla, PhD, prof. (Great Britain);
	Janotka I., Dr. tech. sci., head of unit (Slovakia).

THE FOUNDER AND THE PUBLISHER:

FSBEI of HE «Kazan State University of Architecture and Engineering»

The journal is included in the index of leading reviewed scientific journals and editions, defined by the Higher Attestation Commission, and recommended for publication of basic scientific results of dissertations on scientific degree of the doctor and the candidate of sciences. The articles are reviewed. Reproduction without the permission of editors is prohibited; citing references to the journal are obligatory.

It is registered by the Federal service for supervision of communications, information technology, and mass media (the certificate on registration № FS77-31046, dated January, 25th, 2008). It is included in the subscription catalog of the Ural Press Group of Companies; subscription number 36939.

EDITORIAL ADDRESS:

420043, Tatarstan, Kazan, Zelenaya 1, office 79
Tel. (843) 510-46-39

E-mail: patent@kgasu.ru Web-site: <http://izvestija.kgasu.ru>



СОДЕРЖАНИЕ

СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА	
Мишуренко Н.А., Семенов А.А. Устойчивость пологих оболочек двоякой кривизны с учетом наличия дискретно вводимых ослаблений	6
ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ	
Мирсаляпов Илизар Т., Шараф Х. М. Осадка оснований фундаментов глинистых грунтов при блочных циклических нагрузениях	18
СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ	
Хантимиров А.Г., Сулейманов А.М., Абдрахманова Л.А., Низамов Р.К., Хохряков О.В. Влияние модификации на долговечность поливинилхлоридных древесно-полимерных композитов	26
Готлиб Е.М., Твердов И.Д., Галимов Э.Р., Долгова А.В., Гимранова А.Р. Сравнение модифицирующего действия в эпоксидных композициях диоксид содержащих наполнителей на основе техногенного и растительного сырья	36
Беляков А.Ю., Хохряков О.В., Хозин В.Г. Функционализированный минеральный наполнитель – эффективный модификатор цементных бетонов	45
Камалова З.А., Валиев А.И. Расчет клеёфанерных панелей покрытия, вопросы их долговечности	57
Смирнов Д.С., Белаева К.Р., Хохряков О.В. Исследование свойств мелкозернистых асфальтобетонов запроектированных разными методами	66
Строганов В.Ф., Страхов Д.Е., Строганов И.В., Ахметшин А.С. Влияние гидростатического давления на структуру и свойства эпоксидкаучуковых полимеров с эффектом «память формы»	77
Хохряков О.В., Гуляков Е.Г., Хозин В.Г., Беляков А.Ю. Проблемы высолообразования в бетонных вибропрессованных тротуарных плитах	86
СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ	
Антаков И.А., Сулейманов А.М. Деформативность изгибаемых бетонных элементов, армированных полимерной композитной арматурой	101
Зиннуров Т.А., Новицкий Е.В., Пермяков С.В., Сулейманов А.М. Анализ работы цилиндрических полимеркомпозитных нагелей в деревянных составных изгибаемых элементах	110
Мирсаляпов Илшат Т., Минзянов Р.И., Зайнутдинов А.М. Численное исследование напряженно-деформированного состояния в зоне контакта бетона и арматуры при статическом нагружении	122
Миронова Ю.В., Сулейманов А.М. Конструктивное решение стыка колонн с перекрытием в сборно-монолитном каркасе для повышения сопротивляемости прогрессирующему разрушению	135
Мирсаляпов Илшат Т., Лим В.А., Мирсаляпов А.И., Сулейманов А.М. Оценка эффективности применения высокомодульной полимерной композитной арматуры	145
ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО ДОРОГ, МЕТРОПОЛИТЕНОВ, АЭРОДРОМОВ, МОСТОВ И ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ	
Вдовин Е.А., Буланов П.Е., Хусаенов Б.К., Выборнов Д.Р. Модификация дорожных цементогрунтов нанокремнеземом	154
Комарова Т.К. Математическое моделирование движения автомобилей и пешеходов на нерегулируемых примыканиях	163
ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА	
Хузиахметов Р. А., Хузиахметова К. Р., Расулев Ф. Р. Предотвращение обрушения стенок котлованов и траншей в стесненных условиях застроенных территорий	175
ТЕОРИЯ И ИСТОРИЯ АРХИТЕКТУРЫ, РЕСТАВРАЦИЯ И РЕКОНСТРУКЦИЯ ИСТОРИКО-АРХИТЕКТУРНОГО НАСЛЕДИЯ	
Коткова А.В., Айдарова Г.Н., Сулейманов А.М. Архитектурное формирование рекреационно-оздоровительной среды в условиях Республики Татарстан	185
Семенцов С.В., Славина Т.А. О типологии формирования столичной градостроительной среды Санкт-Петербурга – Петрограда – Ленинграда	200
Сулейманов А.М., Хабибулина А.Г., Петров А.С. Проблема эрозии фасадов исторических зданий от воздействий косого дождя	214
Кулеева Л.М., Сулейманов А.М., Бурова Т.Ю., Листовская Л.В. Мансарда. История и современность	225
Шаймарданова К. А., Прокофьев Е. И. , Сулейманов А.М. Условия для развития городской застройки, ориентированной на общественный транспорт. Международный опыт	234
АРХИТЕКТУРА ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ. ТВОРЧЕСКИЕ КОНЦЕПЦИИ АРХИТЕКТУРНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ	
Нуреев Т.М. Методология проектирования архитектуры сотовой сочленённой жилой застройки	243
Шумилов К.А., Гурьева Ю.А. Моделирование стержневых и полигональных конструкций сложной геометрии с использованием программы Grasshopper	257
Правила представления материалов для публикации в научном журнале «Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета»	269



CONTENTS

CONSTRUCTION MECHANICS	
Mishurenko N.A., Semenov A.A. Buckling of shallow shells of double curvature considering the presence of discretely introduced weakening	6
FOUNDATIONS, UNDERGROUND STRUCTURES	
Mirsayapov Ilizar T., Sharaf H.M. Settlement of foundations of clay soils under block cyclic loading	18
BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS	
Khantimirov A.G., Sulejmanov A.M., Abdrakhmanova L.A., Nizamov R.K., Khokhryakov O.V. The effect of modification on the durability of polyvinyl chloride wood-polymer composites	26
Gotlib E.M., Tverdov I.D., Galimov E.R., Dolgova A.V., Gimranova A.R. Comparison of modifying action in epoxy compositions of diopside containing fillers based on technogenic and vegetable raw materials	36
Belyakov A.Yu., Khokhryakov O.V., Khozin V.G. Functionalized mineral filler is an effective modifier for cement concrete	45
Kamalova Z.A., Valiev A.I. Calculation of glue covering panels, the issues of their durability	57
Smirnov D.S., Belyaeva K.R., Khokhryakov O.V. Investigation of the properties of fine-grained asphalt concrete designed by different methods	66
Stroganov V.F., Strakhov D.E., Stroganov I.V., Akhmetshin A.S. Study of hydrostatic pressure on the structure and properties of epoxy rubber polymers with the "shape memory" effect	77
Khokhryakov O.V., Gulyakov E.G., Khozin V.G., Belyakov A.Yu. Problems of efflorescence in concrete vibro-pressed paving slabs	86
BUILDING STRUCTURES, HOUSES	
Antakov I.A., Suleymanov A.M. Deformability of flexural concrete members reinforced with fiber-reinforced polymer bars	101
Zinnurov T.A., Novitsky E.V., Permyakov S.V., Suleymanov A.M. Analysis of the operation of cylindrical polymer composite dowels in wooden composite bending elements	110
Mirsayapov Ilshat T., Minzyanov R.I., Zainutdinov A.M. Numerical study of the stress-strain state in the contact zone of concrete and reinforcement under static loading	122
Mironova J.V., Suleymanov A.M. Constructive solution of the joint of columns with the floor slab in a prefabricated-monolithic frame to increase resistance to progressive collapse	135
Mirsayapov Ilshat T., Lim V.A., Mirsayapov A.I., Suleymanov A.M. Evaluation of the effectiveness of the use of high-modulus polymer composite reinforcement	145
DESIGN AND CONSTRUCTION OF ROADS, SUBWAYS, AERODROMES, BRIDGES AND TRANSPORT TUNNELS	
Vdovin E.A., Bulanov P.E., Khusaenov B.K., Vybornov D.R. Modification of road soil-cement with nanosilica	154
Komarova T.K. Mathematical modelling of the automobiles and pedestrian moving on the unsignalized junction	163
TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION	
Khuziakhmetov R.A., Khuziakhmetova K.R., Rasulev F.R. Prevention of collapse of pit and trench walls in cramped conditions of built-up areas	175
ARCHITECTURE THEORY AND HISTORY. HISTORICAL AND ARCHITECTURAL HERITAGE RESTORATION AND RECONSTRUCTION	
Kotkova A.V., Aidarova G.N., Suleymanov A.M. Architectural formation of recreational and health-improving environment in the conditions of the Republic of Tatarstan	185
Sementsov S.V., Slavina T.A. On the typology of the formation of the metropolitan urban planning environment of St. Petersburg - Petrograd – Leningrad	200
Suleymanov A.M., Khabibulina A.G., Petrov A.S. The problem of erosion of facades of historic buildings from wind impact of rain	214
Kuleeva L.M., Suleymanov A.M., Burova T.Yu., Listovskaya L.V. Attic. History and modernity	225
Shaimardanova C. A., Prokofiev E. I., Suleymanov A. M. Integration of transport hubs into the urban environment	234
ARCHITECTURE OF BUILDINGS AND STRUCTURES. CREATIVE CONCEPTS OF ARCHITECTURAL ACTIVITY	
Nureyev T.M. Architecture design methodology for honeycomb articulated residential development	243
Shumilov K.A., Guryeva Yu.A. Modeling of rod and polygonal structures of complex geometry using the Grasshopper program	257
Rules of representation of materials for the publication in scientific journal «Kazan State University of Architecture and Engineering news»	269



Устойчивость пологих оболочек двоякой кривизны с учетом наличия дискретно вводимых ослаблений

Н.А. Мишуренко¹, А.А. Семенов¹

¹Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация: *Постановка задачи.* Нередки случаи устройства конструктивных ослаблений в составе оболочечных конструкции. При этом учет влияния ослаблений на устойчивость значительно усложняет методику расчета данных конструкций.

Цель работы заключается в определении влияния дискретно вводимых ослаблений на устойчивость пологих оболочек двоякой кривизны.

Задачами исследования являются создание математической модели, учитывающей геометрическую нелинейность, поперечные сдвиги, ортотропию материала, ослабления конструкции; выбор алгоритма для исследования устойчивости оболочки; написание программы для реализации выбранного алгоритма.

Результаты. В работе представлена геометрически нелинейная математическая модель деформирования ортотропных пологих оболочек двоякой кривизны, ослабленных вырезами. Модель основана на гипотезе теории оболочек Тимошенко-Рейснера и представлена в виде функционала полной потенциальной энергии деформации. Для нахождения минимума функционала используется метод Ритца, что сводит задачу к решению системы нелинейных алгебраических уравнений, решение которой осуществляется методом Ньютона. Алгоритм реализован в программном комплексе Maple 2022.

Для рассматриваемых конструкций установлено, что при выключении из работы до 10 % объема конструкции, снижение критической нагрузки не превышает 25 %.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной механики состоит в том, что получена математическая модель, учитывающая геометрическую нелинейность, поперечные сдвиги, ортотропию материала, ослабления конструкции, использование которой позволит исследовать напряженно-деформированное состояние и устойчивость оболочечных конструкций с большей точностью.

Ключевые слова: оболочки, ослабления, устойчивость, критическая нагрузка, метод Ритца, метод Ньютона

Для цитирования: Мишуренко Н.А., Семенов А.А. Устойчивость пологих оболочек двоякой кривизны с учетом наличия дискретно вводимых ослаблений // Известия КГАСУ, 2023, № 3(65), с. 6-17, DOI: 10.52409/20731523_2023_3_6, EDN: ASJURD

Buckling of shallow shells of double curvature considering the presence of discretely introduced weakenings

N.A. Mishurenko¹, A.A. Semenov¹

¹Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering
Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract: *Problem statement.* There are frequent cases of constructive weakenings as a part of shell structures. At the same time, considering the effect of weakenings on buckling significantly complicates the method of calculating these structures.

The purpose of this work is to determine the effect of discretely introduced weakenings on the buckling of shallow shells of double curvature.

The objectives of the study are to create a mathematical model that considers geometric nonlinearity, transverse shifts, orthotropy of the material, weakenings of the structure; choice of algorithm for studying the buckling of the shell; writing a program to implement the selected algorithm.

Results. The paper presents a geometrically nonlinear mathematical model of deformation of orthotropic shallow shells of double curvature, weakened by notches. The model is based on the hypothesis of the Timoshenko-Reisner shell theory and is presented as a functional of the total potential strain energy. To find the minimum of the functional, the Ritz method is used, which reduces the problem to solving a system of nonlinear algebraic equations, the solution of which is carried out by the Newton method. The algorithm is implemented in the Maple 2022 software package.

For the structures under consideration, it has been established that when up to 10 % of the structure volume is switched off from work, the decrease in the critical load does not exceed 25 %.

Conclusions. The significance of the obtained results for structural mechanics lies in the fact that a mathematical model has been obtained that considers geometric nonlinearity, transverse shifts, material orthotropy, structural weakenings, the use of which will allow us to investigate the stress-strain state and buckling of shell structures with greater accuracy.

Keywords: shells, weakenings, buckling, critical load, Ritz method, Newton method

For citation: Mishurenko N.A., Semenov A.A. Buckling of shallow shells of double curvature considering the presence of discretely introduced weakening // News KSUAE, 2023, № 3(65), p. 6-17, DOI: 10.52409/20731523_2023_3_6, EDN: ASJURD

1. Введение

Оболочечные конструкции применяются во многих областях промышленности: судостроение, авиастроение, космостроение, строительство. В промышленном строительстве из оболочечных конструкций изготавливают резервуары, газгольдеры, силосы и т.п., в гражданском строительстве оболочки применяются при необходимости устройства больших пролетов (стадионы, оперные театры, аэропорты, торговые центры). Кроме того, оболочечные конструкции применяются в мостостроении, гидротехнике (при возведении морских причальных и оградительных сооружений), при возведении атомных электростанций. При этом следует отметить, что зачастую, по конструктивным соображениям, необходимо устраивать технологические вырезы, которые оказывают влияние на напряженно-деформированное состояние и устойчивость конструкции. В связи с этим возникает необходимость исследования такого рода конструкций.

Существуют различные математические модели ослабленных вырезами оболочек, среди которых следует отметить: метод конструктивной анизотропии и дискретный ввод ослаблений с помощью единичных столбчатых функций [1, 2].

В работе [1] отмечается, что при большом количестве вырезов дискретность их ввода теряется и становится возможным использование метода конструктивной анизотропии.

Влияние ослаблений на нелинейное деформирование и потерю устойчивости с использованием моментной схемы конечных элементов и программных комплексов ЛИРА и SCAD представлено в исследовании [3].

В статье [4] предложена математическая модель деформирования цилиндрических оболочек из композиционных материалов с дефектами, основанная на модели Тимошенко, с использованием метода конечных элементов.

Влияние геометрических несовершенств на устойчивость цилиндрических оболочек при сжатии по результатам лабораторных и вычислительных экспериментов представлено в [5].

В работе [6] представлены математические модели и численные методы для исследования нелинейной деформации и потери устойчивости цилиндрических оболочек с учетом прямоугольных вырезов.

В исследовании [7] представлена методика аналитического расчета цилиндрических оболочек с вырезами, полученная авторами на основании сходимости результатов численного моделирования в ABAQUS и экспериментов.

Изогеометрический анализ с применением разрывного метода Галеркина для перидинамического подхода для моделирования трещин в оболочечных конструкциях представлен в работе [8].

В статье [9] для моделирования трещин в конструкциях предлагается использование «смешанной» модели, сочетающей в себе структурные элементы, представляющие поле перемещений в двумерной срединной поверхности оболочки, с континуальными элементами, описывающими фазовое поле трещин в трехмерном твердом пространстве.

Влияние дефектов и микротрещин на свободные колебания цилиндрических оболочек представлено в работе [10]. Оценка параметров перфорирования цилиндрических оболочек на свободные колебания представлена в [11].

Исследование [12] посвящено влиянию вырезов на величину критической нагрузки с учетом геометрических несовершенств конструкции.

По результатам исследования [13] было установлено, что геометрия вырезов оказывает значительное влияние на критическую нагрузку цилиндрических оболочек: максимальное значение критической нагрузки при устройстве круглых вырезов, минимальное значение критической нагрузки для конструкции с прямоугольными вырезами.

Экспериментальное исследование потери устойчивости и закритического поведения цилиндрических оболочек с перфорацией, подверженных гидростатическому давлению, представлено в работе [14].

В исследовании [15] проведена экспериментальная оценка влияния вырезов на цилиндрические оболочки и эффективности усиления: введение ребер жесткости позволило снизить влияние вырезов на 33 %.

Комплексная оценка влияния усиления стеклопластиком стальных цилиндрических оболочек с учетом ослаблений представлена в исследовании [16].

В работе [17] представлен экспериментальный способ исследования устойчивости цилиндрических оболочек разрывной машиной. При этом было установлено, что экспериментальные значения критической нагрузки ниже теоретических значений, а наибольшее влияние на результаты расчета оказывает точность измерений сечения рассматриваемых оболочек.

Развитие трещин под действием циклической нагрузки в цилиндрической оболочке рассмотрено в [18], кроме того было определено какое влияние оказывают геометрические характеристики конструкции и трещины на время разрушения конструкции.

Исследование [19] посвящено решению задачи о деформировании начально плоской круговой упругопластической оболочки. Авторами сделаны следующие выводы: развитие зон необратимого деформирования зависит от свойств материала; рассматриваемые конструкции не могут испытывать неограниченные деформации; поставленная задача не имеет решения для материала Сен-Венана.

Для решения задач ползучести при больших перемещениях в работе [20] предложено использование упрощенного подхода Лагранжа на примере пологой арки круглого сечения.

В зарубежных научных изысканиях при исследовании влияния ослаблений на НДС конструкции большое внимание акцентировано на цилиндрических оболочках [21–23], исследования закритического поведения цилиндрических оболочек с ослаблениями представлены в [24, 25]. При этом также проводится оценка ослаблений на НДС оболочек других форм, например, конических [26], сферических [27].

Целью данной работы является анализ устойчивости пологих оболочек двоякой кривизны с учетом наличия ослаблений.

Задачами исследования являются: разработка математической модели, одновременно учитывающей геометрическую нелинейность, поперечные сдвиги, ортотропию материала, ослабления конструкции; выбор алгоритма, позволяющего исследовать устойчивость оболочечных конструкций; написание программного кода, предназначенного для реализации подобранного алгоритма.

2. Материалы и методы

Рассматриваются тонкостенные пологие оболочки двойкой кривизны, ослабленные вырезами, находящиеся под действием статической нагрузки. Геометрический вид данных оболочечных конструкций характеризуется параметрами Ляме A, B и радиусами главных кривизн R_1, R_2 вдоль координат x, y соответственно. Подробное описание параметров Ляме было представлено в работе [28]. Для пологих оболочек двойкой кривизны (рис.1) принимается $A = 1, B = 1, R_1 = const, R_2 = const$.

Используется математическая модель Тимошенко-Рейснера, которая учитывает поперечные сдвиги, геометрическую нелинейность, ортотропию. Согласно данной модели неизвестными являются три функции перемещений $U = U(x, y), V = V(x, y), W = W(x, y)$ и две функции, характеризующие углы поворота нормали в плоскостях $xOz, yOz: \Psi_x(x, y), \Psi_y(x, y)$.

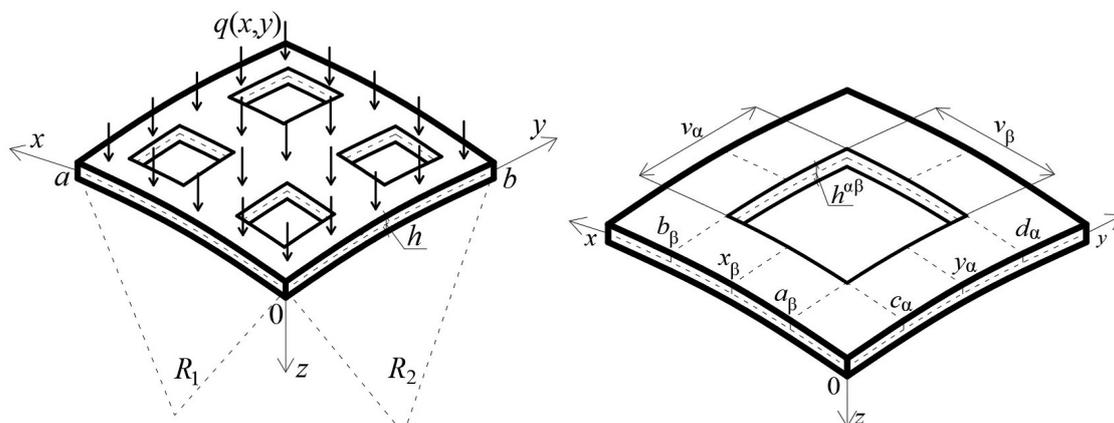


Рис. 1. Пологая оболочка двойкой кривизны (иллюстрация авторов)
 Fig. 1. Shallow shell with double curvature (illustration by the authors)

Основой используемой модели является функционал полной потенциальной энергии деформации, который может быть представлен в следующем виде:

$$E_s = E_s^0 + E_s^V,$$

где E_s^0 – функционал полной потенциальной энергии деформации обшивки оболочки, E_s^V – функционал полной потенциальной энергии деформации зон ослаблений.

Функционал полной потенциальной энергии обшивки оболочки имеет следующий вид:

$$E_s^0 = \frac{1}{2} \int_0^a \int_0^b (N_x \varepsilon_x + N_y \varepsilon_y + \frac{1}{2} (N_{xy} + N_{yx}) \gamma_{xy} + M_x \chi_1 + M_y \chi_2 + (M_{xy} + M_{yx}) \chi_{12} + Q_x (\Psi_x - \theta_1) + Q_y (\Psi_y - \theta_2) - 2P_x U - 2P_y V - 2qW,$$

где q, P_x, P_y – компоненты нагрузки; $k_x = 1/R_1, k_y = 1/R_2$ – главные кривизны оболочки вдоль осей x и y ; N_x, N_y – нормальные усилия в направлении осей x, y ; N_{xy}, N_{yx} – сдвиговые усилия в соответствующей плоскости xOy ; M_x, M_y – изгибающие моменты;

M_{xy}, M_{yx} – крутящие моменты; Q_x, Q_y – поперечные силы в плоскостях xOz и xOy , которые определяются соотношениями (для конструкций без ребер жесткости):

$$\begin{aligned} N_x &= \frac{E_1 h}{1 - \mu_{12} \mu_{21}} (\varepsilon_x + \mu_{21} \varepsilon_y), \quad N_y = \frac{E_2 h}{1 - \mu_{12} \mu_{21}} (\varepsilon_y + \mu_{12} \varepsilon_x), \\ N_{xy} &= N_{yx} = G_{12} h \gamma_{xy}, \\ M_x &= \frac{E_1 h^3}{12(1 - \mu_{12} \mu_{21})} (\chi_1 + \mu_{21} \chi_2), \quad M_y = \frac{E_2 h^3}{12(1 - \mu_{12} \mu_{21})} (\chi_2 + \mu_{12} \chi_1), \\ M_{xy} &= M_{yx} = \frac{G_{12} h^3}{6} \chi_{12}, \\ Q_x &= G_{13} k h (\Psi_x - \theta_1), \quad Q_y = G_{23} k h (\Psi_y - \theta_2). \end{aligned}$$

Здесь E_1, E_2 – модули упругости в направлениях x, y ; $k = 5/6$; G_{12}, G_{13}, G_{23} – модули сдвигов в плоскостях xOy, xOz, yOz соответственно; μ_{12}, μ_{21} – коэффициенты Пуассона; $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ – деформации удлинения; γ_{xy} – деформации сдвига в плоскости xOy ; $\chi_1, \chi_2, \chi_{12}$ – функции изменения кривизн и кручения:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{A} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{AB} V \frac{\partial A}{\partial y} - k_x W + \frac{1}{2} \theta_1^2, \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{B} \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{1}{AB} U \frac{\partial B}{\partial x} - k_y W + \frac{1}{2} \theta_2^2, \\ \gamma_{xy} &= \frac{1}{A} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{B} \frac{\partial U}{\partial y} - \frac{1}{AB} U \frac{\partial A}{\partial y} - \frac{1}{AB} V \frac{\partial B}{\partial x} + \theta_1 \theta_2, \\ \theta_1 &= - \left(\frac{1}{A} \frac{\partial W}{\partial x} + k_x U \right), \quad \theta_2 = - \left(\frac{1}{B} \frac{\partial W}{\partial y} + k_y V \right), \\ \chi_1 &= \frac{1}{A} \frac{\partial \Psi_x}{\partial x} + \frac{1}{AB} \frac{\partial A}{\partial y} \Psi_y, \quad \chi_2 = \frac{1}{B} \frac{\partial \Psi_y}{\partial y} + \frac{1}{AB} \frac{\partial B}{\partial x} \Psi_x, \\ \chi_{12} &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{A} \frac{\partial \Psi_y}{\partial x} + \frac{1}{B} \frac{\partial \Psi_x}{\partial y} - \frac{1}{AB} \frac{\partial B}{\partial x} \Psi_y - \frac{1}{AB} \frac{\partial A}{\partial y} \Psi_x \right). \end{aligned}$$

Области расположения ослаблений оболочки задаются функцией [2]:

$$H^V(x, y) = - \sum_{\alpha=1}^o \sum_{\beta=1}^p h^{\alpha\beta} \bar{\delta}(x - x_\beta) \bar{\delta}(y - y_\alpha),$$

где $h^{\alpha\beta}$ – толщина ослабления; индексы α, β указывают номер прямоугольного в плане ослабления, стороны которого параллельны осям x и y ; o, p – количество ослаблений вдоль осей x и y соответственно; $\bar{\delta}(x - x_\beta), \bar{\delta}(y - y_\alpha)$ – единичные столбчатые функции, равные единице в месте наличия ослабления и равные нулю вне таких мест.

Таким образом, толщина всей конструкции равна $h + H^V$.

В работах [1, 2, 29] отмечается, что единичные столбчатые функции одинаково пригодны для учета ослаблений конструкции и подкреплений ребрами. В связи с чем подходы, учитывающие влияние ребер жесткости, будут справедливы для учета влияния ослаблений. Таким образом, геометрические характеристики и функционал полной потенциальной энергии ослаблений определены согласно [29, 30].

Проинтегрировав функцию $H^V(x, y)$ по z в пределах от $\frac{h}{2}$ до $\frac{h}{2} + H^V$ получим жесткостные функции ослаблений:

$$\int_{h/2}^{h/2+H^V} dz = \bar{F}_V = - \sum_{\alpha=1}^o \sum_{\beta=1}^p F_V^{\alpha\beta} \bar{\delta}(x-x_\beta) \bar{\delta}(y-y_\alpha),$$

$$\int_{h/2}^{h/2+H^V} z dz = \bar{S}_V = - \sum_{\alpha=1}^o \sum_{\beta=1}^p S_V^{\alpha\beta} \bar{\delta}(x-x_\beta) \bar{\delta}(y-y_\alpha),$$

$$\int_{h/2}^{h/2+H^V} z^2 dz = \bar{J}_V = - \sum_{\alpha=1}^o \sum_{\beta=1}^p J_V^{\alpha\beta} \bar{\delta}(x-x_\beta) \bar{\delta}(y-y_\alpha),$$

где $\bar{F}_V, \bar{S}_V, \bar{J}_V$ – функции, характеризующие площадь, статический момент и момент инерции ослабления:

$$F_V^{\alpha\beta} = h^{\alpha\beta}, \quad S_V^{\alpha\beta} = \frac{h^{\alpha\beta}(h+h^{\alpha\beta})}{2},$$

$$J_V^{\alpha\beta} = 0,25h^2 h^{\alpha\beta} + 0,5h(h^{\alpha\beta})^2 + \frac{1}{3}(h^{\alpha\beta})^3.$$

Функционал полной потенциальной энергии ослаблений имеет вид:

$$E_s^V = - \sum_{\alpha=1}^o \sum_{\beta=1}^p \int_{a_\beta}^{b_\beta} \int_{c_\alpha}^{d_\alpha} B_{\alpha\beta} dx dy,$$

где:

$$B_{\alpha\beta} = [G_1 (F_V^{\alpha\beta} \hat{\varepsilon}_x \varepsilon_x + S_V^{\alpha\beta} \hat{\chi}_1 \varepsilon_x) v_a + G_2 (F_V^{\alpha\beta} \hat{\varepsilon}_y \varepsilon_y + S_V^{\alpha\beta} \hat{\chi}_2 \varepsilon_y) v_b +$$

$$+ G_{12} (F_V^{\alpha\beta} \gamma_{xy}^2 + 2S_V^{\alpha\beta} \chi_{12} \gamma_{xy}) v_{ab} + G_1 (S_V^{\alpha\beta} \hat{\varepsilon}_x \chi_1 + J_V^{\alpha\beta} \hat{\chi}_1 \chi_1) v_a +$$

$$+ G_2 (S_V^{\alpha\beta} \hat{\varepsilon}_y \chi_2 + J_V^{\alpha\beta} \hat{\chi}_2 \chi_2) v_b + 2G_{12} (S_V^{\alpha\beta} \gamma_{xy} \chi_{12} + 2J_V^{\alpha\beta} \chi_{12}^2) v_{ab} +$$

$$+ \tilde{\Psi}_x F_V^{\alpha\beta} v_a + \tilde{\Psi}_y F_V^{\alpha\beta} v_b] AB,$$

где:

$$\hat{\varepsilon}_x = (\varepsilon_x + \mu_{21} \varepsilon_y), \quad \hat{\varepsilon}_y = (\varepsilon_y + \mu_{12} \varepsilon_x), \quad \hat{\chi}_1 = (\chi_1 + \mu_{21} \chi_2), \quad \hat{\chi}_2 = (\chi_2 + \mu_{12} \chi_1),$$

$$\tilde{\Psi}_x = G_{13} k (\Psi_x - \theta_1)^2, \quad \tilde{\Psi}_y = G_{23} k (\Psi_y - \theta_2)^2,$$

$$v_a = \frac{v_\beta}{aA}, \quad v_b = \frac{v_\alpha}{bB}, \quad v_{ab} = \frac{v_a + v_b}{2},$$

где v_α, v_β – ширина ослаблений в направлениях x, y соответственно.

Для исследования устойчивости оболочечной конструкции требуется найти минимум функционала (1). Используем метод Ритца для сведения вариационной задачи о поиске минимума функционала к решению системы нелинейных алгебраических выражений. Неизвестные функции представим в виде

$$U = U(x, y) = \sum_{k=1}^{\sqrt{N}} \sum_{l=1}^{\sqrt{N}} U_{kl} X_1^k Y_1^l, \quad V = V(x, y) = \sum_{k=1}^{\sqrt{N}} \sum_{l=1}^{\sqrt{N}} V_{kl} X_2^k Y_2^l,$$

$$W = W(x, y) = \sum_{k=1}^{\sqrt{N}} \sum_{l=1}^{\sqrt{N}} W_{kl} X_3^k Y_3^l, \quad \Psi_x = \Psi_x(x, y) = \sum_{k=1}^{\sqrt{N}} \sum_{l=1}^{\sqrt{N}} \Psi_{xkl} X_4^k Y_4^l,$$

$$\Psi_y = \Psi_y(x, y) = \sum_{k=1}^{\sqrt{N}} \sum_{l=1}^{\sqrt{N}} \Psi_{ykl} X_5^k Y_5^l,$$

где $U_{kl}, V_{kl}, W_{kl}, \Psi_{xkl}, \Psi_{ykl}$ – неизвестные числовые параметры; X_1^k, \dots, X_5^k и Y_1^k, \dots, Y_5^k – известные аппроксимирующие функции, которые удовлетворяют краевым условиям. Краевые условия назначаются исходя из способа закрепления контура конструкции.

Рассматриваются тонкостенные пологие оболочки двоякой кривизны, шарнирно-неподвижно закрепленные по контуру (при $x = a_1 = 0, x = a: U = V = W = M_x = \Psi_y = 0$; при $y = 0, y = b: U = V = W = M_y = \Psi_x = 0$). В данном случае в качестве

аппроксимирующих функций можно использовать следующие тригонометрические функции:

$$\begin{aligned}
 X_1^k &= \sin\left(2k\pi \frac{x-a_1}{a-a_1}\right), Y_1^l = \sin\left((2l-1)\pi \frac{y}{b}\right), \\
 X_2^k &= \sin\left((2k-1)\pi \frac{x-a_1}{a-a_1}\right), Y_2^l = \sin\left(2l\pi \frac{y}{b}\right), \\
 X_3^k &= \sin\left((2k-1)\pi \frac{x-a_1}{a-a_1}\right), Y_3^l = \sin\left((2l-1)\pi \frac{y}{b}\right), \\
 X_4^k &= \cos\left((2k-1)\pi \frac{x-a_1}{a-a_1}\right), Y_4^l = \sin\left((2l-1)\pi \frac{y}{b}\right), \\
 X_5^k &= \sin\left((2k-1)\pi \frac{x-a_1}{a-a_1}\right), Y_5^l = \cos\left((2l-1)\pi \frac{y}{b}\right).
 \end{aligned}$$

После подстановки (12) в (1) находятся производные по неизвестным числовым параметрам и приравниваются к нулю. Таким образом, получена система нелинейных алгебраических уравнений (СНАУ). Решение данной системы осуществляется методом Ньютона.

Реализация данного алгоритма осуществлена в математическом пакете Maple. В работе [1] авторами была представлена сходимость численного решения, основанного на применении метода Рунге и метода Ньютона.

3. Результаты и обсуждение

Проведены расчеты трех вариантов пологих оболочек двойкой кривизны, геометрические параметры оболочек представлены в табл. 1. Закрепление контура – шарнирно-неподвижное, нагрузка – статическая. Материал – сталь ($\mu_{12} = \mu_{21} = \mu = 0,3$, $E_1 = E_2 = E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа).

Таблица 1

Варианты рассматриваемых пологих оболочек двойкой кривизны

№	h , м	a , м	b , м	R_1 , м	R_2 , м
1	0,09	54	54	135,9	135,9
2	0,09	18	18	45,27	45,27
3	0,09	10,8	10,8	40,05	40,05

Ширина и высота ослаблений $v_a = 0,1a$, $v_b = 0,1b$, $h^{ab} = h$. Количество ослаблений в обоих направлениях принято одинаковым.

В табл. 2 представлены параметры оболочек в зависимости от числа ослаблений. Здесь S^0, V^0 – площадь и объем обшивки соответственно, S^V, V^V – площадь и объем ослаблений оболочки соответственно.

Таблица 2

Параметры оболочек в зависимости от числа ослаблений

Вар.	Параметр							
	S^0 , м ²	V^0 , м ³	$v_a = 0,1a$, м	$v_b = 0,1b$, м	$h^{ab} = h$, м			
1	2916	262,44	5,4	5,4	0,09			
	$o \times p$	1×1	2×2	3×3	4×4	5×5	6×6	7×7
	S^V , м ²	29,16	116,64	262,4	466,56	729	1049,76	1428,84
	V^V , м ³	2,624	10,498	23,62	41,99	65,61	94,48	128,6
	V^V/V^0	0,01	0,04	0,09	0,16	0,25	0,36	0,49
	2	S^0 , м ²	V^0 , м ³	$v_a = 0,1a$, м	$v_b = 0,1b$, м	$h^{ab} = h$, м		
324		29,16	1,8	1,8	0,09			
$o \times p$		1×1	2×2	3×3	4×4	5×5	6×6	7×7
S^V , м ²		3,24	12,96	29,16	51,84	81	116,64	158,76

Окончание таблицы 2

	$V^V, \text{м}^3$	0,292	1,166	2,624	4,666	7,29	10,5	14,29
	V^V/V^0	0,01	0,04	0,09	0,16	0,25	0,36	0,49
3	$S^0, \text{м}^2$	$V^0, \text{м}^3$	$v_a = 0,1a, \text{м}$	$v_b = 0,1b, \text{м}$	$h^{ab} = h, \text{м}$			
	116,64	10,498	1	1	0,09			
	$o \times p$	1×1	2×2	3×3	4×4	5×5	6×6	7×7
	$S^V, \text{м}^2$	1	4	9	16	25	36	49
	$V^V, \text{м}^3$	0,09	0,36	0,81	1,44	2,25	3,24	4,41
	V^V/V^0	0,009	0,034	0,077	0,137	0,214	0,31	0,42

Значения критических нагрузок потери устойчивости оболочек q_{cr} при разном количестве ослаблений и при разном количестве членов разложения аппроксимирующих функций N представлены в табл. 3.

Таблица 3

Критические нагрузки для пологих оболочек двойкой кривизны с ослаблениями

№	N	Критическая нагрузка потери устойчивости $q_{cr}, \text{МПа}$								
		$o \times p$	0×0	1×1	2×2	3×3	4×4	5×5	6×6	7×7
1	9	q_{cr}	0,09	0,09	0,09	0,09	0,08	0,07	0,07	0,06
	16	q_{cr}	0,07	0,07	0,07	0,06	0,06	0,05	0,02	0,012
2	9	q_{cr}	0,64	0,64	0,64	0,59	0,48	0,22	0,28	0,13
	16	q_{cr}	0,59	0,59	0,54	0,49	0,39	0,21	0,14	0,12
3	9	q_{cr}	0,79	0,78	0,71	0,62	0,59	0,3	0,4	0,08
	16	q_{cr}	0,78	0,78	0,66	0,6	0,53	0,24	0,45	0,08

На рис. 2 полученные значения нагрузок потери устойчивости q_{cr} представлены графически.

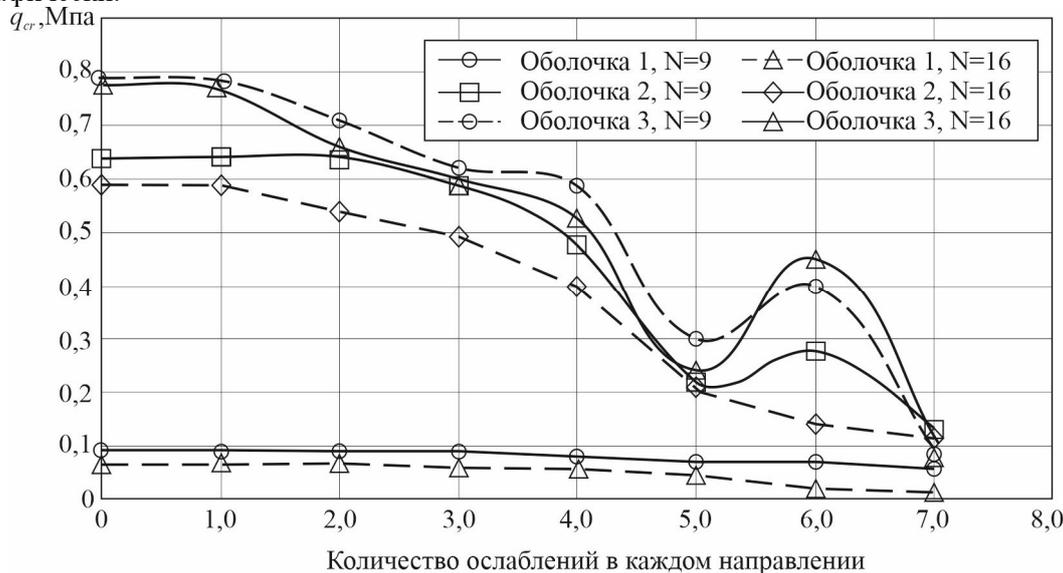


Рис. 2. Значения критических нагрузок при разном количестве ослаблений (иллюстрация авторов)

Fig. 2. Critical load values for different number of attenuations (illustration by the authors)

На рис. 3 и 4 показаны графики зависимости прогиба W от нагрузки q при разном количестве ослаблений для оболочек вариантов 2 и 3 соответственно. На рис. 3 и 4 кривые W_c – прогиб в центре конструкции ($x = a/2, y = b/2$); кривые W_4 – прогиб в четвертой части конструкции ($x = a/4, y = b/4$).

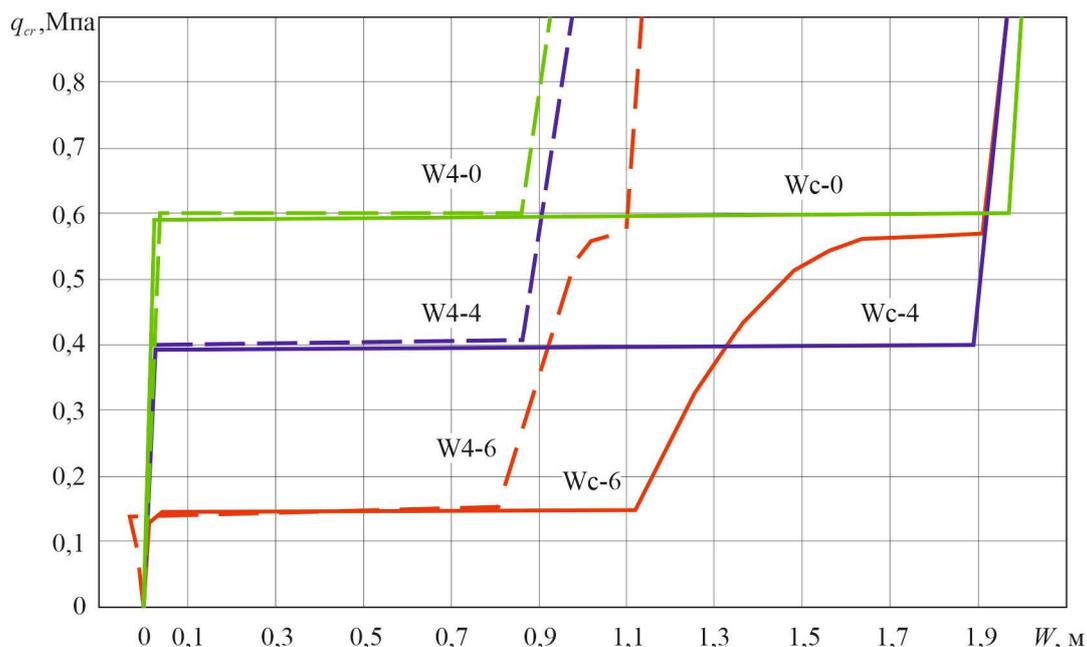


Рис. 3. График зависимости прогиба от нагрузки при разном количестве ослаблений для оболочки вариант 2

(иллюстрация авторов)

Fig. 3. Graph of deflection versus load for different number of weakening for shell option 2 (illustration by the authors)

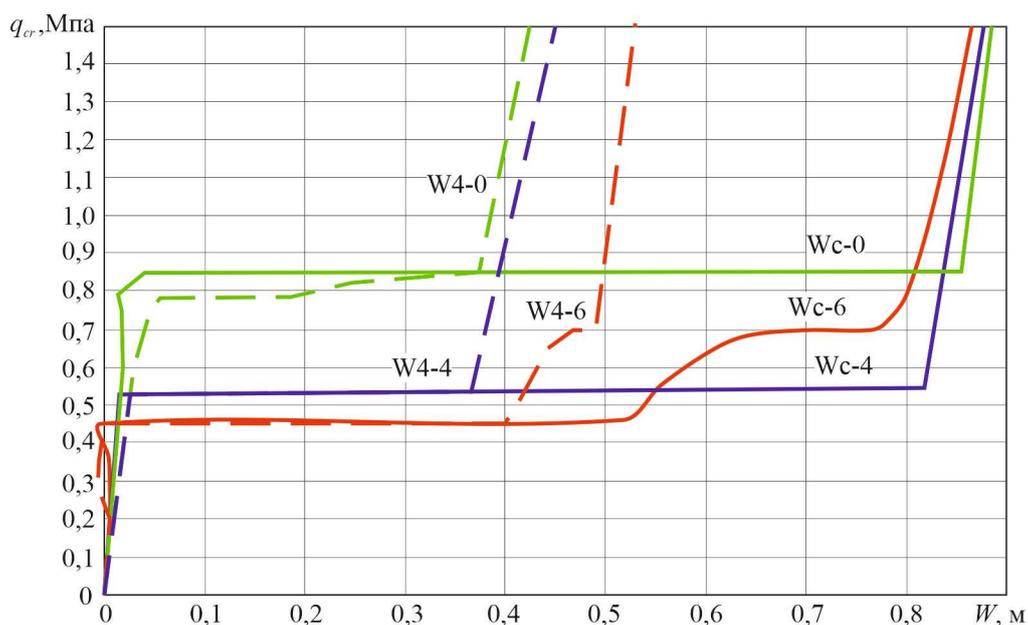


Рис. 4. График зависимости прогиба от нагрузки при разном количестве ослаблений для оболочки вариант 3

(иллюстрация авторов)

Fig. 4. Graph of deflection versus load for different number of weakening for shell option 3 (illustration by the authors)

Верификация методики расчета оболочечных конструкций, путем сравнения с другими методиками и результатами экспериментов, проведена ранее в работе [30].

Из полученных данных можно сделать вывод, что учет ослаблений конструкции приводит к снижению критической нагрузки. Причем при количестве ослаблений 6×6 для рассматриваемых вариантов происходит несколько потерь устойчивости, после чего значение прогиба начинает монотонно возрастать. На основании чего можно сделать следующий вывод: для рассматриваемых конструкций установлено, что при выключении

из работы до 10 % объема конструкции, снижение критической нагрузки не превышает 25 %.

4. Заключение

Таким образом, было проведено исследование устойчивости пологих оболочек двоякой кривизны с учетом ослаблений, по результатам которого:

- Предложена математическая модель, учитывающая геометрическую нелинейность, поперечные сдвиги, ортотропию материала, ослабления конструкции в виде функционала полной потенциальной энергии деформации оболочки.
- Для исследования устойчивости рассматриваемых оболочек решается задача нахождения минимума функционала методом Ритца. Что позволяет свести задачу к решению СНАУ. Решение СНАУ осуществляется методом Ньютона.
- Математическая модель и алгоритм реализованы в программном комплексе Maple 2022.

Статья публикуется по результатам проведения научно-исследовательской работы, проводимой в рамках конкурса грантов на выполнение научно-исследовательских работ научно-педагогическими работниками СПбГАСУ в 2023 году.

Список литературы/References

1. Каменев И.В., Семенов А.А. Обоснование использования метода конструктивной анизотропии при расчете пологих оболочек двоякой кривизны, ослабленных вырезами // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2016. Вып. 2. С. 54–68. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.2.05.[Kamenev I.V., Semenov A.A. Rationale of the use of the constructive anisotropy method in the calculation of shallow shells of double curvature, weakened holes. PNRPU Mechanics Bulletin. 2016. No. 2. P. 54–68. DOI: 10.15593/ perm.mech/2016.2.05]
2. Карпов В.В. Прочность и устойчивость подкрепленных оболочек вращения. В 2 ч. Ч. 1. Модели и алгоритмы исследования прочности и устойчивости подкрепленных оболочек вращения. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 288 с.[Karpov V.V. Strength and stability of reinforced shells of rotation. In 2 parts. Part 1. Models and algorithms for studying the strength and stability of reinforced shells of revolution. M.: FIZMATLIT, 2010. 288 p.]
3. Соловей Н.А., Кривенко О.П., Малыгина О.А. Конечноэлементные модели исследования нелинейного деформирования оболочек ступенчато-переменной толщины с отверстиями, каналами и выемками // Инженерно-строительный журнал. 2015. Вып. 1 (53). С. 56–69. DOI: 10.5862/MCE.53.6.[Solovei N.A., Krivenko O.P., Malygina O.A. Finite element models for the analysis of nonlinear deformation of shells stepwise-variable thickness with holes, channels and cavities // Magazine of Civil Engineering, No.1, 2015, P.56-69, doi: 10.5862/MCE.53.6]
4. Захарова Ю.В., Лохматова Л.Г. Моделирование напряженно-деформированного состояния композиционных оболочек с дефектами // Инженерный журнал: наука и инновации. 2016. Вып. 11 (59). DOI: 10.18698/2308-6033-2016-11-1552.[Zakharova Yu.V., Lohmatova L.G. Modeling of the crisis-deformed state of composite shells with defects // Engineering journal: science and innovation. 2016. Issue. 11 (59). DOI: 10.18698/2308-6033-2016-11-1552.]
5. Zhao C. et al. Buckling behavior of a thin-walled cylinder shell with the cutout imperfections // Mechanics of Advanced Materials and Structures. 2019. Vol. 26. Iss. 18. P. 1536–1542. DOI: 10.1080/15376494.2018.1444225.
6. Dmitriev V.G. et al. Investigation of Buckling Behavior for Thin-Walled Bearing Aircraft Structural Elements with Cutouts by Means of Numerical Simulation // Russian Aeronautics. 2018. Vol. 61. Iss. 2. P. 165–174. DOI: 10.3103/S1068799818020034.
7. Yılmaz H., Kocabaş İ., Özyurt E. Empirical equations to estimate non-linear collapse of medium-length cylindrical shells with circular cutouts // Thin-Walled Structures. 2017. Vol. 119. P. 868–878. DOI: 10.1016/j.tws.2017.08.008.

8. Xia Y. et al. Discontinuous Galerkin isogeometric analysis with peridynamic model for crack simulation of shell structure // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2022. Vol. 398. P. 115193. DOI: 10.1016/j.cma.2022.115193.
9. Ambati M. et al. Phase-field modeling of brittle fracture along the thickness direction of plates and shells // *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2022. Vol. 123. Iss. 17. P. 4094–4118. DOI: 10.1002/nme.7001.
10. Wang Y. et al. Adaptive mesh refinement for finite element analysis of the free vibration disturbance of cylindrical shells due to circumferential micro-crack damage // *Engineering Computations*. 2022. Vol. 39. Iss. 9. P. 3271–3295. DOI: 10.1108/EC-09-2021-0555.
11. Giani S., Hakula H. Free vibration of perforated cylindrical shells of revolution: Asymptotics and effective material parameters // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2023. Vol. 403. P. 115700. DOI: 10.1016/j.cma.2022.115700.
12. Arbelo M.A. et al. Investigation of Buckling Behavior of Composite Shell Structures with Cutouts // *Applied Composite Materials*. 2015. Vol. 22. Iss. 6. P. 623–636. DOI: 10.1007/s10443-014-9428-x.
13. Gangadhar L., Kumar T.S. Finite Element Buckling Analysis of Composite Cylindrical Shell with Cutouts Subjected to Axial Compression // *International Journal of Advanced Science and Technology*. 2016. Vol. 89. P. 45–52. DOI: 10.14257/ijast.2016.89.06.
14. Shen K.-C. et al. Buckling and Post-Buckling Behavior of Perfect/Perforated Composite Cylindrical Shells under Hydrostatic Pressure // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. Vol. 10. Iss. 2. P. 278. DOI: 10.3390/jmse10020278.
15. Ghanbari Ghazijahani T., Jiao H., Holloway D. Structural behavior of shells with different cutouts under compression: An experimental study // *Journal of Constructional Steel Research*. 2015. Vol. 105. P. 129–137. DOI: 10.1016/j.jcsr.2014.10.020.
16. Krishna G.V., Narayanamurthy V., Viswanath C. Buckling behaviour of FRP strengthened cylindrical metallic shells with cut-outs // *Composite Structures*. 2022. Vol. 300. P. 116176. DOI: 10.1016/j.compstruct.2022.116176.
17. Туманова Е.Ю. и др. Определение критической осевой сжимающей нагрузки для тонкостенных цилиндрических оболочек на разрывной машине // *Нефтегазовое дело*. 2022. Т. 20. Вып. 6. С. 145–154. DOI: 10.17122/ngdelo-2022-6-145-154. [Tumanova E.Yu., Kovshova Yu.S., Baigildin R.A., Kayumov R.A. Opredelenie kriticheskoy osevoj szhimayushchej nagruzki dlya tonkostennyh cilindricheskikh obolochek na razryvnoj mashine [Determination of the critical axial compressive load for thin-walled cylindrical shells on a breaking machine]]// *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2022, Vol. 20, No. 6. P. 145- 154. [in Russian]. [https://doi.org/10.17122/ngdelo-2022-6-145-154.](https://doi.org/10.17122/ngdelo-2022-6-145-154)]
18. Каюмов Р.А., Тазюков Б.Ф. Расчет цилиндрической оболочки на циклическую прочность // *Вестник Казанского технологического университета*. 2012. Т. 15. Вып. 9. С. 162–164. [Kayumov R.A., Tazyukov B.F. Calculation of a cylindrical shell for cyclic strength // *Bulletin of the Kazan Technological University*. 2012. Т. 15. Issue. 9. P. 162–164.]
19. Кудряшов А.В. и др. Существование решения задачи о конечном деформировании круговой упругопластической оболочки // *Вестник Технологического университета*. 2015. Т. 18. Вып. 3. С. 251–253. [Kudryashov A.V. and others. Existence of a solution to the problem of finite deformation of a circular elastoplastic shell // *Bulletin of the Technological University*. 2015. Т. 18. Issue. 3. P. 251–253.]
20. Kayumov R.A., Shakirzyanov F.R. Large Deflections and Stability of Low-Angle Arches and Panels During Creep Flow // *Advanced Structured Materials*. 2021. Vol. 141. P. 237–248. DOI: 10.1007/978-3-030-54928-2_18.
21. Li Q., Wang D.F. Influence of cutout position on buckling of large-scale thin-walled cylindrical shell of desulphurizing tower with welding induced imperfection under wind loading // *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 687–691. P. 68–72. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.687-691.68.

22. Labans E. et al. Bending of Composite Cylindrical Shells with Circular Cutouts: Experimental Validation // *Journal of Aircraft*. 2019. Vol. 56. Iss. 4. P. 1534–1550. DOI: 10.2514/1.C035247.
23. Gokyer Y., Sonmez F.O. Topology optimization of cylindrical shells with cutouts for maximum buckling strength // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2023. Vol. 45. Iss. 1. P. 13. DOI: 10.1007/s40430-022-03941-w.
24. Groh R.M.J., Wu K.C. Nonlinear Buckling and Postbuckling Analysis of Tow-Steered Composite Cylinders with Cutouts // *AIAA Journal*. 2022. Vol. 60. Iss. 9. P. 5533–5546. DOI: 10.2514/1.J061755.
25. Shahani A.R., Kiarasi F. Numerical and Experimental Investigation on Post-buckling Behavior of Stiffened Cylindrical Shells with Cutout subject to Uniform Axial Compression // *Journal of Applied and Computational Mechanics*. 2023. Vol. 9(1). P. 25–44. DOI: 10.22055/jacm.2021.33649.2261.
26. Li Z., Cao Y., Pan G. Influence of geometric imperfections on the axially loaded composite conical shells with and without cutout // *AIP Advances*. 2020. Vol. 10. Iss. 9. P. 095106. DOI: 10.1063/5.0021103.
27. Kumar Chaubey A., Kumar A., Chakrabarti A. Effect of multiple cutouts on shear buckling of laminated composite spherical shells // *Materials Today: Proceedings*. 2020. Vol. 21. P. 1155–1163. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.01.065.
28. Semenov A. Mathematical Modeling in Shell Structure Analysis Tasks // *International Journal for Engineering Modelling*. 2022. Vol. 35. Iss. 1. P. 43–55. DOI: 10.31534/engmod.2022.1.ri.03m.
29. Karpov V.V. Models of the shells having ribs, reinforcement plates and cutouts // *International Journal of Solids and Structures*. 2018. Vol. 146. P. 117–135. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2018.03.024.
30. Karpov V.V., Semenov A.A. Refined model of stiffened shells // *International Journal of Solids and Structures*. 2020. Vol. 199. P. 43–56. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2020.03.019.

Информация об авторах

Мишуренко Николай Александрович, аспирант, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Email: nikolai8421@mail.ru

Семенов Алексей Александрович, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Email: sw.semenov@gmail.com

Information about the authors

Nikolai A. Mishurenko, post-graduate student, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russian Federation

Email: nikolai8421@mail.ru

Alexey A. Semenov, candidate of technical sciences, associate professor, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russian Federation

Email: sw.semenov@gmail.com



УДК: 624.152

DOI: 10.52409/20731523_2023_3_18

EDN: BOODTM



Осадка оснований фундаментов глинистых грунтов при блочных циклических нагрузениях

Илизар Т. Мирсаяпов¹, Х. М.Шараф¹

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация: *Постановка задачи.* В натуральных условиях строительства и эксплуатации нагрузки на грунтовые основания прикладываются поэтапно по мере возведения зданий и сооружений, при этом периоды активного нагружения при строительстве переходят в промежутки выдержки при различных эксплуатационных значениях нагрузок. Цель работы заключается в разработке метода расчета осадки оснований фундаментов на глинистых грунтах при блочном циклическом нагружении. Задачами исследования являются: проанализировать существующие методы расчета осадки фундаментов на глинистых грунтах при различных режимных циклических нагрузках и провести экспериментальные и теоретические исследования осадки оснований фундаментов при блочной циклической нагрузке на глинистых грунтах.

Результаты: разработан и внедрен инженерный метод расчета осадки фундамента на основе применения методики послойного суммирования, который учитывает одновременное изменение пространственного напряженно-деформированного состояния и механических характеристик глинистых грунтов при режимах блочных циклических нагружениях.

Выводы: Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в том, что предложенный метод расчета осадки оснований фундамента позволяет более точно оценить поведение глинистых грунтов при проектировании фундаментов зданий и сооружений, которые подвергаются блочным циклическим нагрузкам.

Ключевые слова: глинистый грунт, осадка основания фундамента, блочное циклическое нагружение.

Для цитирования: Мирсаяпов И.Т., Шараф Х. М. Осадка оснований фундаментов глинистых грунтов при блочных циклических нагружениях // Известия КГАСУ, 2023, № 3(65), с. 18-25, DOI: 10.52409/20731523_2023_3_18, EDN: BOODTM

Settlement of clay soils foundations under block cyclic loading

Iizar T. Mirsayapov¹, H. M. Sharaf¹

¹Kazan State University of Architecture and Engineering
Kazan, Russian Federation

Abstract: *Problem statement.* In full-scale conditions of construction and exploitation, loads on soil bases are applied in stages as buildings and structures are constructed, with periods of active loading during construction passing into periods of endurance at different values of loads during exploitation.

The purpose of the study is to develop a method for calculating the settlement of foundations on clay soils under block cyclic loading. The objectives of the study are: to analyze the existing methods of calculating the settlement of foundations on clayey soils under different mode cyclic loads and to conduct experimental and theoretical studies of foundation settlement under block cyclic loading on clayey soils.

Results: we propose and implement an engineering calculation method of foundation settlement based on the application of the layer-by-layer summation method that takes into account the parallel change in the spatial stress-strain state and the mechanical properties of clay soils under the regime block cyclic loading.

Conclusions: The significance of the obtained results for the construction industry consists in the fact that the proposed method for calculating foundation settlement makes it possible to assess more accurately the behavior of clay soils in the design of foundations of buildings and structures that are subjected to block cyclic loading.

Keywords: clay soil, foundation settlement, block cyclic loading.

For citation: Mirsayapov I.T., Sharaf H.M. Settlement of foundations of clay soils under block cyclic loading // News KSUAE, 2023, № 3(65), p. 18-25, DOI: 10.52409/20731523_2023_3_18, EDN: BOODTM

1. Введение

В наши дни существует множество различных эмпирических уравнений и различных методов для прогнозирования деформации грунтового массива под действием нагрузки. Во многих научных исследованиях задача решается экспериментальным или теоретическим путем на основе анализа результатов физического или математического моделирования. При этом точность экспериментальных и расчётных зависимостей определяется путём измерения соответствия заданным исходным условиям [1-3, 4]. В настоящее время расчет фундаментов по осадкам согласно нормативными документами основан на следующих условиях:

$$S = S_i + S_c + S_s \leq S_u \quad (1)$$

где S – полная или общая осадка основания фундамента; S_i – мгновенная или упругая осадка основания фундамента; S_c – первичная консолидационная и стабилизирующая осадка основания фундамента; S_s – осадка основания фундамента при вторичном рассмотрении; S_u – допустимое значение величины осадки основания фундамента согласно нормативными документами в зависимости от типа здания и сооружения [5-7].

При статическом нагружении основным методом расчета для определения абсолютной величины осадки фундамента остается метод послойного суммирования, который был разработан для одноосного деформированного сжатия грунта [8-10]. В реальных условиях грунт под зданием сжимается с ограниченными боковыми перемещениями. Профессор Н.А. Цытович предлагал учитывать влияние размеров формы фундамента и свойств грунта при расчете осадки по эквивалентному слою. К. Е. Егоров разработал метод расчета осадки фундамента прямоугольной формы с учетом всех трех составляющих нормальных напряжений P_x , P_y и P_z [11]. Тер-Мартirosян З. Г и Тураев Х. Ш. предлагали уравнение для вычисления осадки различных вариантов фундаментов с ограниченной толщиной в зависимости от реологических характеристик грунта, представленных законом деформационной ползучести [12]. При условии режима длительного нагружения. И.Т. Мирсяяповым и И.В. Королевой предложен метод расчета осадки фундаментов с учётом объемного напряженно-деформированного состояния и длительной деформации глинистых грунтов [13]. При циклическом режиме нагружения. Жустарева Е. В. [14], Коныгина С. Ю. [15], Горячев М.Г.[16], Мирсяяпов И.Т. и Сабирзянов Д.Д. [17], предложили формулы для расчета неупругих деформаций на основе гипотезы о сходстве деформаций ползучести при длительно-статическом и циклическом нагружении. Мирсяяпов И.Т. и Сабирзянов Д.Д, предложили способ расчета осадки фундамента при совместном длительно-статическом циклическом нагружении с постоянным уровнем вертикального напряжения [17,18]. Приведенные выше методы не позволяют учесть и оценить осадку фундамента под действием блочной циклической нагрузки, поэтому необходимо разработать метод расчета, учитывающий такие режимы нагружения при эксплуатации во время строительства.

Цель работы заключается в разработке метод расчета осадок оснований фундаментов на глинистых грунтах при блочном циклическом нагружении. Для достижения поставленной цели рассмотрены следующие задачи:

- 1) проанализировать существующие методы расчета осадки фундаментов на глинистых грунтах при различных режимных циклических нагрузках;
- 2) провести экспериментальные и теоретические исследования осадки оснований фундаментов при блочной циклической нагрузке на глинистых грунтах.

2. Материалы и методы

Лабораторные экспериментальные исследования проводились в объемном лотке с размерами $1 \times 1 \times 1$ м. В лотковых исследованиях использовался глинистый грунт со следующими физико-механическими свойствами: $P=1,9 \text{ кН/м}^3$; $W=23\%$; $W_L=38\%$; $W_P=21\%$; $J_P=17\%$; $J_L=0,117$. Подробное описание сути испытания можно найти в работах [5-7].

Натурные исследования проводились как наблюдения развития осадки фундаментов двух резервуаров, которые были построены в городе Жупанье, Хорватия.

Фундаменты резервуаров спроектированы из железобетонных плит, построенных на многослойных грунтах со следующими характеристиками:

Первый слой грунта: насыпной грунт, мощность слоя $h=3-5$ м; удельное сцепление $C=17$ кПа; угол внутреннего трения $\Phi=23^\circ$; одометрический модуль деформации $E_{oed}=5,5$ МПа; число пластичности $P_I=9\%$;

Второй слой грунта: глинистый грунт, мощность слоя $h=2-4$ м; удельное сцепление $C=19$ кПа; угол внутреннего трения $\Phi=18^\circ$; одометрический модуль деформации $E_{oed}=1,9-3,6$ МПа; число пластичности $P_I=32\%$;

Третий слой грунта: глинистый песок, обнаруженный на глубине приблизительно 10 м, состоящий из 59% песка, 41% ила и глины, представляет собой мелкозернистый песок с плотностью от рыхлой до очень рыхлой. Глина, обнаруженная в слое на глубине 12,6 м, имеет пластичность от низкой до средней, консистенцию от мягкой до средней.

Четвертый слой грунта: песок глинистый грунт, в основном мелкозернистый, с некоторыми средними и крупными зёрнами. В некоторых местах грунт явно глинистый в тонких прослойках. Данный слой прослеживается на глубине от 12,3 до 30,7 м и ниже слоя плотного песка до песчаного гравия, от 39,2 м до забоя скважины [19].

3. Результаты и обсуждение

На основе полученных результатов лабораторных и натурных исследований авторами [5-7, 19] был разработан метод расчета осадки оснований фундаментов на глинистых грунтах при режиме блочном циклическом нагружений, для расчета осадки фундаментов, подверженных реалистичным нагружением, предлагается метод расчета, основанный на методе послойного суммирования, учитывающий пространственное напряженное состояние фундаментов при реалистичных нагрузках.

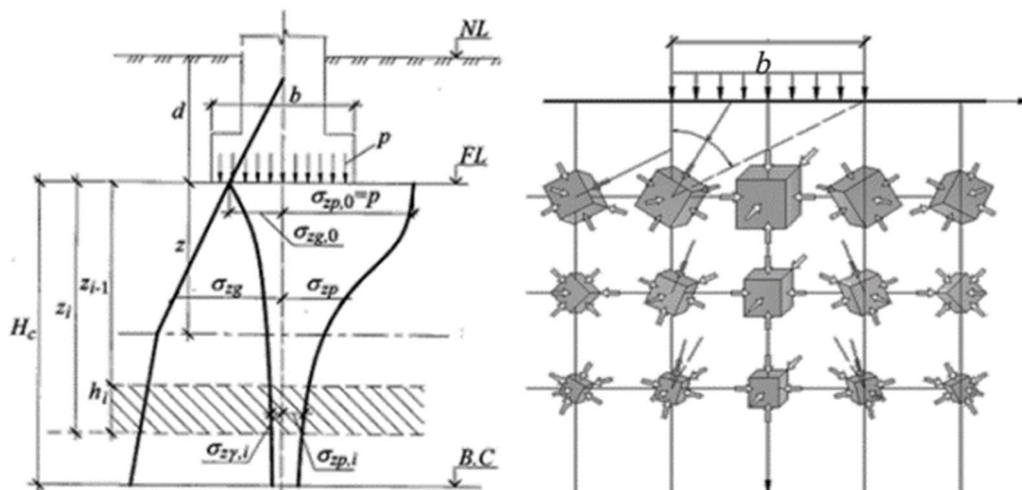


Рис.1. Расчетная схема к определению осадки фундамента при режимном нагружении (иллюстрация авторов)

Fig.1. Calculation scheme for determining the foundation settlement under the regime loading (illustration by the authors)

Расчет по деформациям (осадкам) фундаментов производится на основе схемы напряженного состояния фундаментов при режимном нагружении (рис. 1) по следующей методике:

- Определяется величина естественного давления σ_{zg} от действия собственного веса грунта;
- Внешняя нагрузка на фундамент P делится на несколько этапов с учетом времени, продолжительности и режима ее приложения;
- Высота сжимаемой толщи основания фундамента (зона активного сжатия) определяется исходя из условий:

$$H_s = Z; \sigma_{zp} = 0,5 \cdot \sigma_{zg} \quad (2)$$

где H_s - глубина ("толщина") сжимаемой толщи, принимаемой на уровне нижней границы на расстоянии Z ;

σ_{zp} - вертикальное девиаторное на высоте Z от дополнительных нагрузок на фундамент.

- Сжимающаяся толщина основания фундамента разделяется на несколько элементарных слоев;
- Определяется естественное напряженное состояние от само веса грунта. Вычисляются вертикальные σ_{zgi} и горизонтальные σ_{xgi} , σ_{ygi} давления от веса собственного веса грунта в подстилающем слое фундамента и в центре каждого слоя под подстилающим слоем фундамента.;
- Определяются дополнительные вертикальные давления σ_{zp} , для всех режимов нагружения, используя модель фундамента как линейно деформируемого равномерного изотропного полупространства;

$$\sigma_{z\rho i} = \rho_0 \cdot \alpha \quad (3)$$

где α - коэффициент распределения напряжений; $P_0 = P \cdot \sigma_{zgi}$;

- Определяются дополнительные горизонтальные давления σ_{xgi} , σ_{xygi} при одномерном сжатии с учетом коэффициента горизонтального давления $\xi = 0,25 \div 1,0$, в соответствии с конкретными условиями и плотности грунта.

Берется объемное напряженное состояние фундамента в каждом слое, в рамках сжимаемой толщины на основе девиатора напряжения устанавливаются деформации, которые соответствуют значению вертикального напряжения, и суммируются величины нарастания осевых деформаций в рамках сжимаемой толщины.

Величина нарастания осевой деформации $\Delta \varepsilon_{zi}$ i -го слоя в момент нагружения определяется по следующей формуле:

$$\Delta \varepsilon_{zi} = \frac{\Delta \sigma_{zi}}{\Delta G_{vi}} - \Delta G \cdot \frac{3k_{vi} - G_{vi}}{3k_{vi} \cdot G_{vi}} \quad (4)$$

где $\Delta \sigma_{zi}$ - вертикальное напряжение в момент нагрузки; G_{vi} - модуль сдвига в момент нагрузки;

k_{vi} - модуль объема в момент нагрузки.

Величина нарастания осевой деформации при циклических нагружениях определяется по следующей формуле:

$$\varepsilon_{pli}^v(N, t, t_0) = \sum_{i=1}^n \left[\sigma_i^{max}(N, t, t_0) \cdot k_R \left\{ \left[\frac{f_{UP}(N)}{\sigma(N, t, t_0)} \right] \cdot f_{UP}(N) \cdot \rho_{cyc} \cdot + \left[\frac{f_{dow}(N)}{\sigma(N, t, t_0)} \right] \cdot f_{dow}(N) \cdot \rho_{cyc} + \left[\frac{f(t)}{\sigma(N, t, t_0)} \right] \cdot f(t) + \left[\frac{f_{UP}(t_0)}{\sigma(N, t, t_0)} \right] \cdot f_{UP}(t_0) + \left[\frac{f_{dow}(t_0)}{\sigma(N, t, t_0)} \right] \cdot f_{dow}(t_0) \cdot \right\} \right] \quad (5)$$

где $\sigma_i^{max}(N, t, t_0)$ - максимальное вертикальное напряжение в блоках повышающегося и понижающегося циклического нагружения, время выдержки и в момент изменения нагрузки;

$\sigma(N, t)$ - допускаемое вертикальное напряжение при циклическом нагружении;

k_R - фактор, определяющийся соотношением параметров ползучести и циклической ползучести грунта, его прочности и вертикального давления в исследуемом блоке нагружения;

ρ_{cyc} - асимметричность циклов вертикальных напряжений грунта;

$f_{UP(N)}$, $f_{down(N)}$, $f(t)$, $f_{UP(t)}$, $f_{down(t)}$ - функции роста деформации циклической ползучести грунта в возрастающих и убывающих блоках циклического нагружения, время выдержки и в момент изменения величины нагрузки.

Тогда осадка фундамента при режимном блочном циклическом нагружении вычисляется по следующей формуле:

$$S(N, t, t_0) = \sum_i^n [\Delta \varepsilon_{zi} + \varepsilon_{pli}^v(N, t, t_0)] \cdot h_i \tag{6}$$

где h_i - толщина i -го слоя;

$\Delta \varepsilon_{zi}$ - приращение осевой деформации i -го слоя в момент приложения нагрузки;

$\Delta \varepsilon_{pliv(N,t,t_0)}$ - приращение осевой деформации i -го слоя при циклическом нагружении;

n - количество слоев;

h_i - толщина i -го слоя.

По результатам полученных лабораторных, натурных и теоретических исследований были построены графики развития осадки оснований фундаментов при режимных нагружениях, которые представлены на рис. 2 и рис. 3.

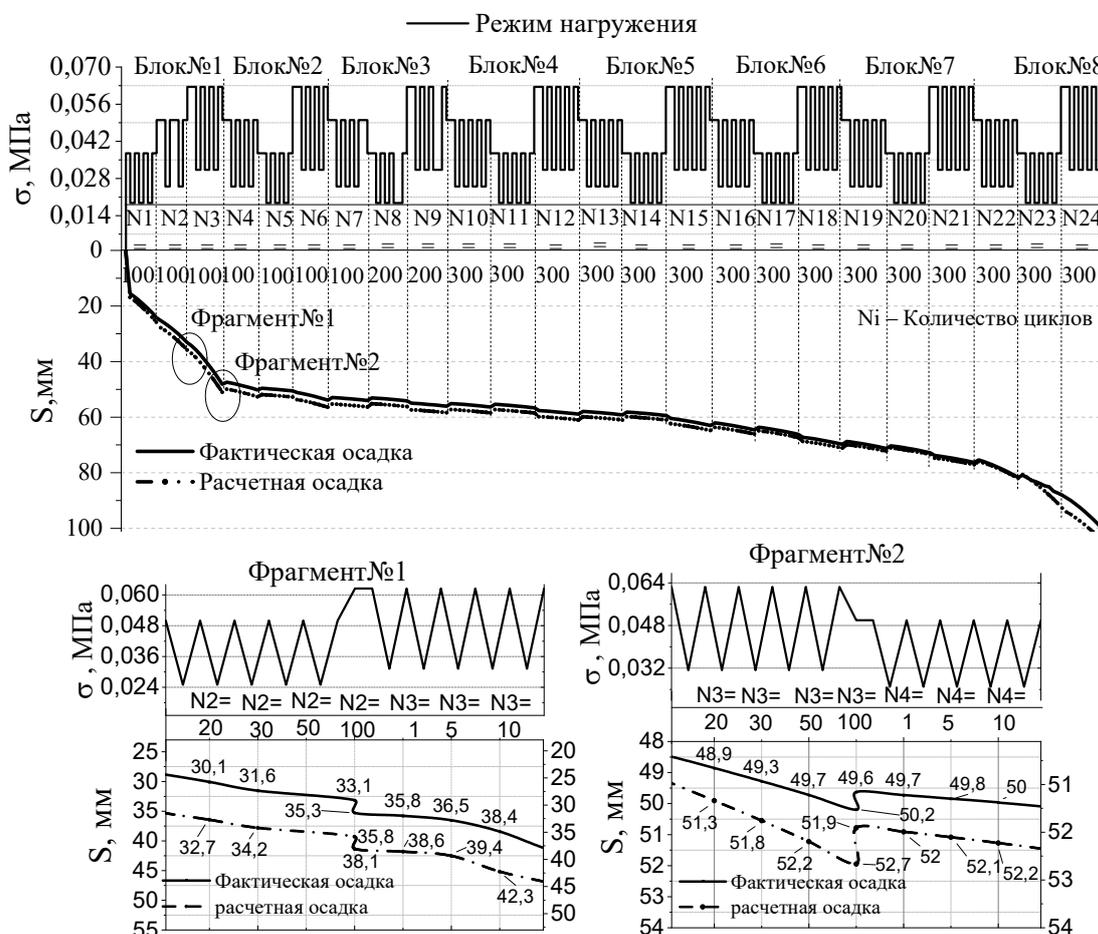


Рис.2. Сопоставление осадки модели плитного фундамента в лабораторных исследованиях и предложенного метода расчета при режимном блочном циклическом нагружении.

(иллюстрация авторов)

Fig. 2. Comparison settlement of the plate foundation model in laboratory studies and the method of the proposed calculation under mode block cyclic loading. (Illustration by the authors).

Сравнение полученных результатов измерений по развитию осадок модели плитного фундамента в лабораторных испытаниях и мониторинга развития осадки плитного фундамента резервуаров при режимном блочном циклическом нагружении показывает, что изменение развития осадки фундамента происходит весь период испытания, но это развитие можно условно разделить на три стадии.

На первой стадии осадка фундамента развивается с увеличением максимальных нагрузок и количества циклов нагружения, при этом величина осадки составляет 50-54% от величины предельной осадки.

На второй стадии, видно, что скорость развития осадок фундаментов уменьшается или происходит их полная стабилизация в повышающемся блочном циклическом режиме, а осадка фундаментов уменьшается в понижающемся блочном циклическом режиме.

На третьем этапе наблюдается увеличение развития осадки фундамента при увеличении количества циклов нагружения по сравнению с предыдущими стадиями нагружения. Скорость развития осадки увеличивается без стабилизации, пока не достигнет предельного значения осадки.

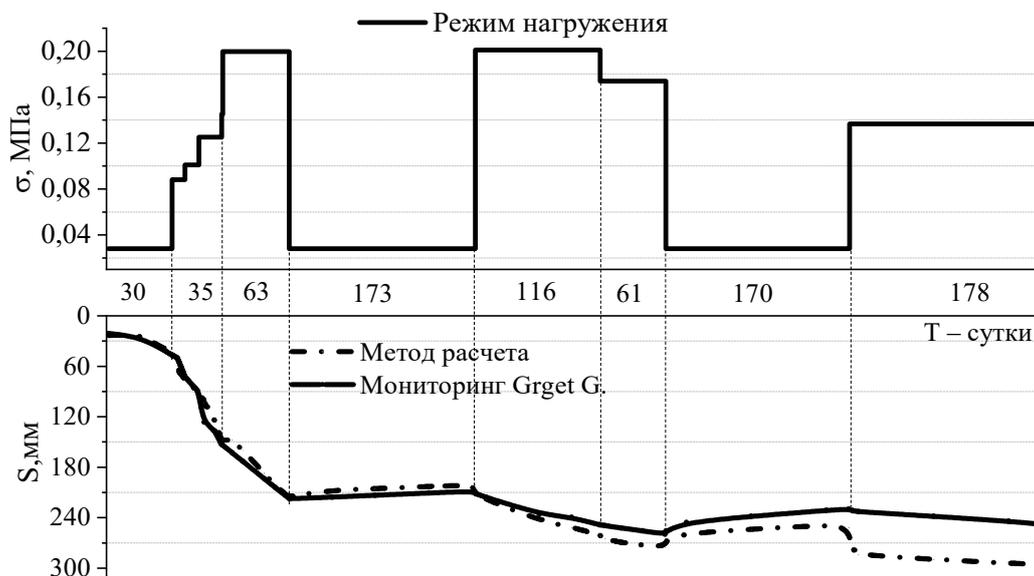


Рис. 3. Сопоставление осадки плитного фундамента резервуаров и предложенного метода расчета при блочном циклическом нагружении. (иллюстрация авторов) [19].

Fig. 3. Comparison settlement of mat foundation of tanks and the method of the proposed calculation under block cyclic loading. (Illustration by the authors) [19].

При действии блочного циклического нагружения, в случае последовательно возрастающего режима, происходит наибольшее изменение осадки в первом блоке в начальный период нагружения. При переходе к более высоким уровням нагружения наблюдалось скачкообразное увеличение суммарных осадок в момент перехода к другому блоку. В дальнейшем по мере увеличения периода нагружения наблюдалось плавное развитие осадки, аналогично развитию осадки во второй фазе в рамках первого блока нагружения. В то же самое время скорость развития этих осадок была меньше, чем в первом блоке.

При переходе к более низким уровням нагрузки происходит ступенчатое уменьшение осадки за счет упругой составляющей и осадки после нагрузки в момент снижения нагрузки. В дальнейшем в течение некоторого времени по мере увеличения числа циклов нагрузки осадка становится еще более незначительной или полностью стабилизируется.

4. Заключение

На основании исследования данной работы в целом можно сформулировать следующие основные выводы:

1. Разработан и представлен инженерный метод расчета осадки фундаментов на основе методики послойного суммирования с учетом последовательного изменения пространственного напряженно-деформированного состояния и механических характеристик глинистых грунтов при режимных блочных циклических нагружениях, что адекватно отражает их характер поведения при режимных блочных циклических нагрузках и обеспечивает надежное и одновременно экономичное проектирование фундаментов зданий и сооружений при режимных блочных циклических нагрузках;

2. При использовании предложенного метода расчета были получены соответствующие результаты, хорошо совпадают с данными лабораторных и натурных исследований. Отклонения составляют от 10 до 20%.

Список литературы / References

1. Kim G., Loreto G., Kim J.-Y., Kurtis K. E., Wall J. J., Jacobs L. J. In situ nonlinear ultrasonic technique for monitoring microcracking in concrete subjected to creep and cyclic loading // *Ultrasonics*. 2018. №88. P. 64–71. DOI: 10.1016/j.ultras.2018.03.006.
2. Li Q., Liu M., Lu Z., Deng X. Creep Model of High-Strength High-Performance Concrete Under Cyclic Loading // *J. Wuhan Univ. Technol. Sci. Ed.* 2019. №3 (34). P. 622–629. DOI: 10.1007/s11595-019-2096-9.
3. Bouziadi F., Boulekbache B., Haddi A., Hamrat M., Djelal C. Finite element modeling of creep behavior of FRP-externally strengthened reinforced concrete beams // *Eng. Struct.* 2020. №204. P. 109908. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109908.
4. Augeard E., Ferrier E., Michel L. Mechanical behavior of timber-concrete composite members under cyclic loading and creep // *Eng. Struct.* 2020. №210. P. 110289. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110289.
5. Mirsayapov I. T., Sharaf H. M. A. Experimental studies of bearing capacity and settlement of foundations on clays under regime block cyclic loading // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. №890. P. 1-10. DOI:10.1088/1757-899X/890/1/012134.
6. Mirsayapov I. T., Sharaf H. M. A. Features of clay soil deformation under triaxial block regime cyclic loading, taking into account the formation of micro and macro-cracks // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. №1928. P. 1-11. DOI:10.1088/1742-6596/1928/1/012038.
7. Mirsayapov, I., Sharaf, H.M.A. (2023). Studies of Clay Soils Under Triaxial Block Cyclic Loading // *XV International Scientific Conference. interagromash 2022.vol 574*. DOI:org/10.1007/978-3-031-21432-5_259.
8. Karim, H.H., Samuel, Z.W., Jassem, A.H.: Behaviour of soft clayey soil improved by fly ash and geogrid under cyclic loading // *Civ. Eng. J.* 6(2), 225–237 (2020). DOI: 10.28991/cej-2020-03091466.
9. Wichtmann, T., Triantafyllidis, T. Monotonic and cyclic tests on kaolin: a database for the development, calibration and verification of constitutive models for cohesive soils with focus to cyclic loading // *Acta Geotechnica* 2018. V.13(5), P. 1103–1128. DOI:10.1007/s11440-017-0588-3.
10. Wang, Y., Wan, Y., Wan, E., Zhang, X., Zhang, B., Zhong, Y. The pore pressure and deformation behavior of natural soft clay caused by long-term cyclic loads subjected to traffic loads // *Marine Georesources and Geotechnology* 2021. V.39(4). P.398–407. DOI:10.1080/1064119X.2019.1707915.
11. Егоров К.Е. Распределение напряжений и перемещений в основании конечной толщины. *Механика грунтов: Научн. тр. НИИОСП им. Н.М.Герсеванова. М.: Госстройиздат. - 1961. - №43. - С.42-63.* [Egorov K.E. Distribution of stresses and displacements in a base of finite thickness. *Soil mechanics: Scientific. tr. NIIOSP named after. N.M. Gersevanova. M.: Gosstroyizdat. - 1961. - No. 43. - P.42-63.*]
12. Ter-Martirosyan Z. G., Ter-Martirosyan A. Z., Sidorov V. V. Creep and long-term bearing capacity of a long pile in clay // *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Paris. 2013. P. 2882-2884.*
13. Мирсаяпов И. Т., Королева И. В. Прогнозирование деформаций оснований фундаментов с учетом длительного нелинейного деформирования грунтов // *Научно-технический журнал «Основания, фундаменты и механика грунтов»*. 2011. №4. С. 16-23. [Mirsayapov I. T., Koroleva I. V. Prediction of deformations of foundations taking into account long-term nonlinear deformation of soils // *Scientific and technical journal “Foundations, foundations and soil mechanics”*. 2011. No. 4. P. 16-23.]
14. Xianzhang L. Permanent deformation characteristics of coarse-grained subgrade soils

- under train-induced repeated load // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2017. № 7. P. 1-15. DOI: 10.1155/2017/6241479.
15. Guo, L., Cai, Y., Jardine, R. J., Yang, Z., Wang, J. Undrained behaviour of intact soft clay under cyclic paths that match vehicle loading conditions // *Canadian Geotechnical Journal* 2018. V.55(1). P.90–106. DOI:10.1139/cgj-2016-0636.
 16. Hirai, H. Analysis of pullout load capacity of suction caissons in clay by a three-dimensional displacement approach // *Marine Georesources and Geotechnology* 2018. V. 36(4). P.425–437. DOI:10.1080/1064119X.2017.1326070.
 17. Mirsayapov I. T., Sabirzyanov D. D. Bearing capacity of foundations base under combined alternating long-term static and cyclic loading // *IOP Publishing IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 2018. №365. P.1-11. DOI:10.1088/1757-899X/365/4/042082
 18. Siraziev L. F. The stressed-stained state experimental researches of multilayered soilbases under the stamp center at short term tests // *Innovatsii*. 2018. № 11. P. 225–228.
 19. Grgt G., Ravnjak K., Szavits-Nossan A. Analysis of results of molasses tanks settlement testing // *Japanese Geotechnical Society, Soils and Foundations*. October 2018. Vol. 58. №5. P. 1260-1271.

Информация об авторах

Мирсаяпов Илизар Талгатович, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: mirsayapov1@mail.ru

Шараф Хани Мохаммед Абдо, Кандидат технической наук, старший преподаватель, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: sharafhani03@gmail.com

Information about the authors

Iizar T. Mirsayapov, Doctor of technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: mirsayapov1@mail.ru

Hani M. A. Sharaf, Candidate of Engineering Sciences, Senior Lecturer. Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: sharafhani03@gmail.com



Влияние модификации на долговечность поливинилхлоридных древесно-полимерных композитов

А.Г. Хантимиров¹, А.М. Сулейманов¹, Л.А. Абдрахманова¹,
Р.К. Низамов¹, О.В. Хохряков¹

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация: *Постановка задачи.* Одной из главных проблем в строительном материаловедении является получение долговечных материалов. Для древесно-полимерных композитов данный вопрос стоит особо остро: использование древесного наполнителя и эксплуатация в суровых климатических условиях негативно сказываются на свойствах. Общеизвестна положительная роль различных модификаторов на физико-механические свойства древеснонаполненных композитов, таких как добавки на углеродной основе и волокнистые наполнители. Однако подобные модифицированные композиты недостаточно изучены с точки зрения долговечности. Цель работы заключается в изучении свойств древесно-полимерных композитов на основе поливинилхлорида в условиях искусственного ускоренного старения. Задачами исследования являются: исследование влияния климатических воздействий на прочностные свойства и внешний вид модифицированных древесно-полимерных композитов и прогнозирование срока их службы.

Результаты. В работе представлены результаты ускоренных испытаний на климатические воздействия модифицированных древесно-полимерных композитов на основе поливинилхлорида. В качестве модификаторов были использованы углеродные нанодобавки и волокнистые наполнители, ранее показавшие свою эффективность для усиления древеснонаполненных композитов. Наиболее эффективными модификаторами по результатам испытаний являются углеродные добавки (механоактивированные нефтяные коксы и нанотрубки), показавшие снижение потери прочности при изгибе после ускоренного старения на 1,9-4,1%.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в том, что прогнозирование срока службы древесно-полимерных композитов на основе поливинилхлорида с повышенными прочностными свойствами позволит расширить область применения изделий на их основе, в том числе и конструкционного назначения.

Ключевые слова: поливинилхлорид, древесно-полимерный композит, базальтовая фибра, асбест, волокнистый модификатор, климатические испытания, испытания на ускоренное старение

Для цитирования: Хантимиров А.Г., Сулейманов А.М., Абдрахманова Л.А., Низамов Р.К., Хохряков О.В. Влияние модификации на долговечность поливинилхлоридных древесно-полимерных композитов // Известия КГАСУ, 2023, № 3(65), с. 26-35, DOI: 10.52409/20731523_2023_3_26, EDN: CMSMHV

The effect of modification on the durability of polyvinyl chloride wood-polymer composites

A.G. Khantimirov¹, A.M. Sulejmanov¹, L.A. Abdrakhmanova¹, R.K. Nizamov¹,
O.V. Khokhryakov¹

¹Kazan State University of Architecture and Engineering
Kazan, Russian Federation

Abstract: *Problem statement.* One of the main problems in building materials science is the production of durable materials. For wood-polymer composites, this issue is particularly acute: the use of wood filler and operation in harsh climatic conditions negatively affect the properties. The positive effect of various modifiers on the physical and mechanical properties of wood-filled composites, such as carbon-based additives and fibrous fillers, is well known. However, such modified composites have not been sufficiently studied in terms of durability. The purpose of the work is to study the properties of wood-polymer composites based on polyvinyl chloride in conditions of artificial accelerated aging. The objectives of the study are: to study the influence of climatic factors on the strength properties and appearance of modified wood-polymer composites and to predict their service life.

Results. The paper presents the results of accelerated tests for climatic effects of modified wood-polymer composites based on polyvinyl chloride. Carbon nanoadditives and fibrous fillers, which had previously shown their effectiveness for strengthening wood-filled composites, were used as modifiers. The most effective modifiers according to the test results are carbon additives (mechanically activated petroleum cokes and nanotubes), which showed a decrease in bending strength loss after accelerated aging by 1.9-4.1%.

Conclusions. The significance of the results obtained for the construction industry is that forecasting the service life of wood-polymer composites based on polyvinyl chloride with increased strength properties will expand the scope of products based on them, including structural purposes.

Key words: polyvinyl chloride, wood-polymer composite, basalt fiber, asbestos, fiber modifier, climatic tests, accelerated aging tests

For citation: Khantimirov A.G., Sulejmanov A.M., Abdrakhmanova L.A., Nizamov R.K., Khokhryakov O.V. The effect of modification on the durability of polyvinyl chloride wood-polymer composites // News KSUAE, 2023, № 3(65), p. 26-35, DOI: 10.52409/20731523_2023_3_26, EDN: CMSMHV

1. Введение

Важным показателем всех строительных материалов является их долговечность [1-3], которая выражается в сохранении как физико-механических свойств, так и эстетичного внешнего вида, что для конечного потребителя зачастую становится главным фактором при выборе изделий. Особенно это касается продукции из древесно-полимерных композитов (ДПК), которая в основном используются для наружного применения.

Большая популярность изделий из ДПК в последние годы обуславливается расширением ассортимента предлагаемых изделий [4]. Активно идет внедрение ДПК для использования в конструкционных изделиях, таких как столбы заборов, опоры различных навесов, брусья для частного домостроения (замена деревянным брусьям), погонажные изделия для стропильных систем (балки, обрешетка и т.д.), способные выдержать значительные снеговые и ветровые нагрузки. Усиление ДПК может осуществляться в двух направлениях: изменение рецептуры (выбор оптимального полимерного связующего, модификация связующими агентами и волокнистыми наполнителями) и увеличение момента инерции изделий (усовершенствование геометрии поперечного сечения профилей, дополнение изделий внутренними металлическими вставками).

Многочисленными работами было показано, что наиболее оптимальным полимером для создания ДПК является поливинилхлорид (ПВХ) [5-7]. За счет высоких физико-механических свойств ДПК-ПВХ конструкционные изделия из них в меньшей степени нуждаются в металлических усиливающих вставках, по сравнению с ДПК на основе полипропилена (ПП) и полиэтилена (ПЭ) [8].

В качестве связующих агентов наиболее эффективными в составе ДПК-ПВХ являются углеродные модификаторы, в частности, нанотрубки и технический углерод [9-11]. Также общеизвестно положительное влияние волокнистых наполнителей на прочностные свойства полимерных композитов, в том числе, древеснонаполненных [12-14].

Авторами данной статьи ранее были проведены исследования по модификации ДПК-ПВХ углеродными нанотрубками [15-17] и волокнистыми наполнителями на основе базальтовой фибры [18]. Работа является логическим продолжением исследований ранее полученных ДПК-ПВХ с повышенными прочностными свойствами для прогнозирования их долговечности.

Наиболее уязвимым компонентом в составе ДПК является органический наполнитель, который под действием внешних факторов достаточно быстро теряет свои свойства. Полимерное связующее, обволакивая древесные частицы, способствует их защите. Но невозможно в полной мере оградить наполнитель от пагубного действия окружающей среды, особенно в поверхностных слоях. Изменения в первую очередь связаны с деструкцией лигнина, от чего разрушается скелет древесной структуры и изменяется цвет.

В введенном недавно ГОСТ Р 59555-2021 «Изделия профильные из древесно-полимерного композита. Технические условия» описывается режим испытаний образцов на ускоренное старение. По данной методике были испытаны полимерно-минеральные композиты на основе поливинилхлорида [19], наполненные золами ТЭС в количестве от 40 до 80 м.ч. на 100 м.ч. ПВХ. Потеря прочности на изгиб образцов составила менее 5%, что соответствует сроку службы более 10 лет. При этом потеря цвета составила $\Delta E=3,72-7,06$. Изменение цвета за 24 ч УФ-облучения (условная светостойкость) составила Ц1 ($\Delta E=1,38$). В результате испытаний получились достаточно высокие показатели долговечности изделий. Это связано как с использованием в качестве наполнителя минеральных зол ТЭС, являющиеся достаточно устойчивыми к действию внешних неблагоприятных факторов, так и мягкими условиями испытаний, рассчитанными для композитов с органическими наполнителями.

В работе [6] проводились климатические испытания образцов промышленно выпускаемых ДПК на основе ПВХ. Исследования проводили с помощью световой камеры (везерометра) при облучении с интенсивностью УФ-облучения 65 Вт/м^2 . Один цикл испытаний включал в себя воздействие света в течение 110 ч, выдержку в климатической камере при $-40 \pm 2^\circ\text{C}$ в течение 1,5 ч и при $+60 - 1$ ч. Полученные данные свидетельствуют о высокой устойчивости материала к действию климатических факторов, а именно сохранению стойкости к удару при $+23^\circ\text{C}$ и -20°C и небольшими изменениями координат цветов ($\Delta E=3,13$). Авторы отмечают, что основные изменения во внешнем виде происходят на начальных стадиях и проявляются в виде увеличения на поверхности числа светлых точек (древесного наполнителя), приводящего к незначительному осветлению образцов. Однако полученные по данной методике результаты не дают четкого понимания относительно срока службы, так как нет установленной корреляции с изменением свойств образцов.

Авторами [20] была проведена визуальная оценка изменения геометрии ДПК-профилей на основе ПЭ, ПП и ПВХ. Условия испытаний на светостойкость и атмосферостойкость образцов соответствовали эксплуатации под дождем и солнцем в течение 2,5 лет. Наименьшие изменения в геометрии показали образцы ДПК-ПВХ, для остальных образцов характерна достаточно высокая степень коробления.

Таким образом, проведенный анализ показал отсутствие литературных данных по климатическим испытаниям древеснонаполненных ПВХ-композитов согласно актуальному стандарту с установлением срока службы.

Целью работы является изучение свойств модифицированных ДПК-ПВХ в условиях искусственного ускоренного старения.

Объектом исследований являются модифицированные ДПК на основе ПВХ. Предмет исследований – влияние модификаторов на физико-механические свойства и внешний вид ДПК-ПВХ после проведения климатических испытаний.

Задачами исследования являются:

- изучение влияния климатических воздействий на прочностные свойства модифицированных ДПК на основе ПВХ и прогнозирование срока их службы;
- оценка влияния модификаторов на изменение внешнего вида образцов ДПК-ПВХ после ускоренного старения.

2. Материалы и методы

В исследованиях использован суспензионный ПВХ марки С-7059-М (ГОСТ 14332-78); модификаторы полимерной матрицы: комплексный стабилизатор – двухосновный стеарат свинца АКСТАВ Рb BLS 51 (CAS 56189-09-4), стабилизатор-смазка – стеарат кальция (ТУ 6-09-4104-87), акриловый модификатор ударной прочности марки KaneAce FM50; наполнитель – древесная мука из хвойных пород марки М180 (ГОСТ 16361-87).

В качестве модификаторов применялись:

- 2 вида механоактивированных отходов производства нефтяных коксов (Павлодарский НХЗ, г. Павлодар, Казахстан). Представляют собой мелкодисперсный порошок черного цвета, имеют разные степени окисления и обозначены как кокс 1 (1,34 мэкв/г) и кокс 2 (0,57 мэкв/г).

- составной стабилизирующий процессинговый комплекс СМ-1230 (Arkema, Dipol Innovation, Франция). Черные гранулы размером 1-2 мм, имеющие следующий состав: МУНТ Graphistrength С100 - 30 %, монтановые воска - 50 %, антиоксиданты Ирганокс 1010 - 10 % и Ирграфос 168 - 10 %.

- базальтовая фибра с длиной волокон 6,4 и 12,7 мм и диаметром 13 и 17 мкм соответственно (ООО «Каменный век», г. Дубна, Россия). Обработаны силановым замасливателем KB13.

- асбест хризотилковый со средней длиной 2 мм из шнура ШАОН 5 (ГОСТ 1779-83). Средний диаметр агрегатов волокон распущенного шнура составляет 10 мкм.

- сухие многослойные углеродные нанотрубки Таунит $M_{\text{функ}}$, функционализированные алкильными группами (ООО «НаноТехЦентр», г. Тамбов, Россия). Средний внешний диаметр 8-15 нм, длина более 2 мкм, степень функционализации 11,5 % (по массе).

Состав базовой композиций представлен в табл. 1. Испытания проводились на образцах с оптимальными концентрациями модификаторов, которые приведены в табл. 2.

Таблица 1

Состав базовой композиций

Компонент	Содержание, м.ч.
1	2
ПВХ С-7059-М	100
Модификатор ударной прочности FM-50	7
Стабилизатор-смазка стеарат кальция	3
Термостабилизатор двухосновный стеарат свинца	5
Древесная мука М180 (ДМ)	50

Таблица 2

Модификаторы и их содержание в композиции

Компонент	Содержание (% от массы ДМ, м.ч. на 100 м.ч. ПВХ)
1	2
Кокс 1	0,1 %
Кокс 2	5%
Таунит $M_{\text{функ}}$	0,35%

Окончание таблицы 2

1	2
СМ-1230	2,6 м.ч.
Фибра 6,4 мм	10 м.ч.
Фибра 12,7 мм	10 м.ч.
Асбест 2 мм	7,5 м.ч.

Образцы подвергали испытаниям на ускоренное старение согласно ГОСТ Р 59555-2021 по режиму: облучение УФ-источником света в течение 500 ч с последующими 20 циклами по следующему порядку: выдержка в 3%-ном растворе соли – 1 ч, замораживание при -30°C – 5 ч, выдержка в воде при 22°C , нагрев до 60°C – 17 ч. Прогнозируемый срок службы композитов определялся по проценту потери прочности при изгибе. Изменение цвета после циклических испытаний и условную светостойкость устанавливали по порогу серой шкалы и по методу цветовых координат.

3. Результаты и обсуждение

Результаты испытаний модифицированных композитов на ускоренное старение представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты испытаний модифицированных ДПК на ускоренное старение

Модификатор	Потеря прочности при изгибе, %	Прогнозируемый срок службы, лет
Базовый состав	4,8	более 10
Кокс 1	2,9	более 10
Кокс 2	2,3	более 10
Таунит $M_{\text{функ}}$	2,0	более 10
СМ-1230	0,7	более 10
Баз. фибра 6,4 мм	3,4	более 10
Баз. фибра 12,7 мм	3,1	более 10
Асбест 2 мм	2,7	более 10

Примечание – прогнозируемый срок службы составляет более 10 лет при потере прочности при изгибе менее 5% и 5-10 лет при 5% и выше.

Для всех составов потеря прочности при изгибе составляет менее 5%, что соответствует прогнозируемому сроку службы изделий более 10 лет. Наименьшую потерю прочности показывают образцы с углеродными наномодификаторами: благодаря черному цвету и нанометровому размеру нанотрубки эффективно поглощают и изменяют длину волны деструктивного ультрафиолетового спектра. Кроме того, полости внутри самих трубок способны адсорбировать молекулы кислорода, предотвращая окисление углеродной цепи ПВХ [21, 22]. Наличие в гранулах комплекса СМ-1230 антиоксидантов Ирганокса 1010 и Иргафоса 168 усиливает стабилизирующее действие нанотрубок, что приводит к минимальной потере прочности при изгибе 0,7%.

Волокнистые наполнители оказывают положительное влияние на долговечность ДПК за счет высокой атмосферостойкости самих базальтовых и асбестовых волокон. Наибольшее изменение прочности имеет исходная композиция, показатели которой близки значениям для срока службы 5-10 лет.

Стоит отметить, что зачастую старение композитов на основе ПВХ сопровождается увеличением прочности, что обусловлено процессами сшивания макромолекул при их деструкции [23]. Однако в случае введения древесного наполнителя прочность после климатического воздействия снижается вследствие деструкции компонентов древесной муки (в особенности, лигнина, отвечающего за прочность древесных волокон).

При воздействии атмосферных факторов также изменяются геометрические размеры профилей из ДПК. Изменение размеров (набухание) и гигроскопичность ДПК определяют после выдержки образцов в кипящей воде в течение 2 ч. Стандартное водопоглощение (в воде комнатной температуры в течение 24 ч) не позволяет определить геометрическую стабильность материала в условиях агрессивных атмосферных

воздействий, так как капельно-жидкая влага не в состоянии проникнуть через полимерную пленку. При кипячении же образуется паровоздушная (молекулярная) влага, которая способна внедриться в толщу композита и вызвать разбухание древесных частиц.

Свойства образцов после кипячения в воде представлены в табл. 4.

Все модифицированные композиты имеют меньшее набухание и водопоглощение по сравнению с базовым составом. Минимальные показатели водопоглощения имеют образцы с модификаторами на углеродной основе, что связано с образованием более плотной структуры ДПК. При введении волокнистых модификаторов в композитах возможно локальное образование микропустот в зонах переплетения волокон, что и обуславливает большие значения водопоглощения.

Таблица 4

Показатели набухания и водопоглощения после кипячения

Модификатор	Набухание в кипящей воде за 2 ч по толщине, %			Водопоглощение в кипящей воде за 2 ч, %
	по толщине	по ширине	по длине	
Базовый состав	1,52	0,93	0,30	3,91
Кокс 1	1,50	0,48	0,20	3,22
Кокс 2	1,45	0,47	0,20	2,48
Таунит М _{фнк}	1,27	0,47	0,15	2,83
СМ-1230	0,96	0,45	0,23	2,96
Баз. фибра 6,4 мм	1,43	0,84	0,30	3,30
Баз. фибра 12,7 мм	1,20	1,01	0,25	3,34
Асбест 2 мм	1,49	0,93	0,39	3,00

Стоит отметить, что наименьшие значения набухания в кипящей воде характерно для композитов с СМ-1230, что обусловлено наличием в его составе большого количества армирующих нанотрубок (0,8 м.ч.). Тем не менее, водопоглощение образцов несмотря на наличие гидрофобного монтажного воска не имеет минимальные значения, что связано с плавлением последнего при температуре выше 70-80°C.

До введения стандарта для ДПК-композитов водопоглощение в кипящей воде также использовали для оценки срока службы изделий. Кипячение проводили до тех пор, пока водопоглощение не превысит значения 5%, при этом 1 ч кипения приравнивали к 5 годам эксплуатации. Однако данный показатель для определения срока службы является достаточно условным, так как такие факторы эксплуатации, как воздействие УФ-излучения, атмосферных осадков, агрессивных сред и значительные перепады знакопеременных температур, заменялись тепловым, хоть и интенсивным воздействием в водной среде. В целом, все полученные композиты по обоим методикам (водопоглощение в кипящей воде и потеря прочности при изгибе после циклических испытаний) имеют срок службы более 10 лет.

Для архитекторов, дизайнеров и конечных потребителей важным критерием выбора любого строительного отделочного материала является внешний вид изделий и его стабильность с течением времени. Древесная мука в поверхностных слоях ДПК наиболее подвержена изменениям цвета. В первую очередь это связано с неблагоприятным воздействием атмосферных осадков и УФ-излучения на лигнин в составе древесины. В связи с этим для ДПК нормируется такой показатель, как условная светостойкость за 24 ч УФ-облучения и потеря цвета при циклических испытаниях на ускоренное старение. Первый показатель отвечает за изменение цвета в начальный период эксплуатации ДПК, когда происходит изменение цвета древесных частиц на поверхностных слоях, что может повлиять на оттенок композита в целом. Второй параметр показывает изменение цвета наполнителя и полимерной матрицы в долгой перспективе до окончания срока службы.

Внешний вид образцов до и после испытаний на ускоренное старение показан на рис. 1. Численные значения изменения окраски представлены в табл. 5.

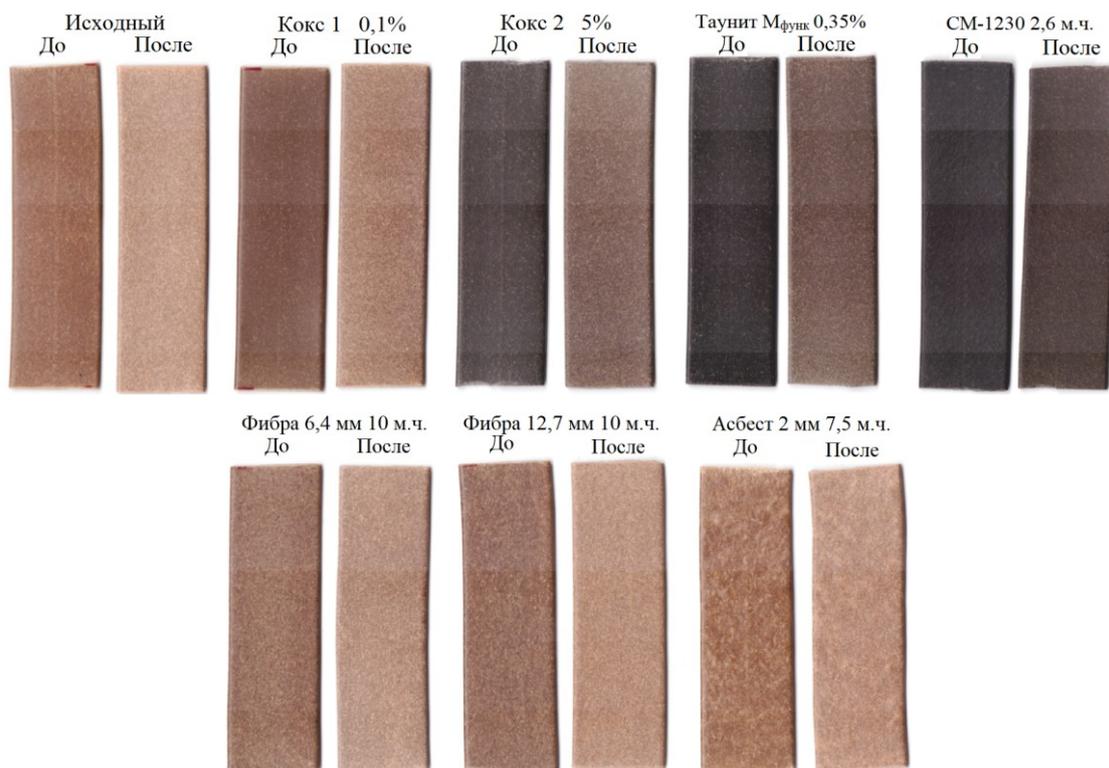


Рис. 1. Образцы ДПК-ПВХ до и после испытаний на ускоренное старение

Fig. 1. WPC-PVC samples before and after accelerated aging tests

Таблица 5

Изменения окраски ДПК-ПВХ после климатических воздействий

Модификатор	Светостойкость за 24 ч	Изменение цвета после циклических испытаний	
	по методу координат, ΔE (балл)	по порогу серой шкалы, балл	по методу координат, ΔE
Базовый состав	2,5 (Ц2)	3	11,9
Кокс 1	1,3 (Ц1)	3-4	9,2
Кокс 2	1,2 (Ц1)	4	9,0
Таунит $M_{\text{функ}} 0,35\%$	1,1 (Ц1)	4-5	8,4
СМ-1230	1,1 (Ц1)	4-5	8,1
Баз. фибра 6,4 мм	1,3 (Ц1)	4	9,3
Баз. фибра 12,7 мм	1,3 (Ц1)	4	8,8
Асбест 2 мм	1,2 (Ц1)	4	8,7

Все полученные модифицированные композиты соответствуют нормативу, балл по светостойкости составляет Ц1, при этом изменение координат цвета в 2 раза меньше, чем для базового состава. После циклических испытаний также наблюдается значительное снижение потери цвета образцов, что подтверждается как визуальным, так и инструментальным методами. Среди модифицированных композитов механоактивированные коксы в большей степени способствовали изменению окраски, что связано с отсутствием в их частицах внутренних полостей, как у нанотрубок, которые могли бы эффективнее поглощать и нивелировать негативное воздействие ультрафиолетовых лучей. Высокую стабильность цвета показали образцы с комплексом СМ-1230, имеющего в составе нанотрубки и антиоксиданты. Приведенные ранее литературные данные [19] показывают, что разработанные модифицированные древесно-полимерные композиты имеют светостойкость за 24 ч на уровне значений полимерно-минеральных композитов ($\Delta E=1,38$), которые достаточно стойки к изменениям цвета.

4. Заключение

Проведенное исследование влияния климатических воздействий на прочностные свойства ДПК-ПВХ показало значительное снижение потерь прочности при изгибе для всех модифицированных составов. Наименьшее изменение прочности характерно для образцов с углеродными добавками, что обусловлено их способностью эффективно поглощать и изменять длину волны ультрафиолета благодаря высокой дисперсности и черному цвету, тем самым препятствуя распространению разрушительного спектра. А наличие в гранулах комплекса СМ-1230 (с 30% УНТ) антиоксидантов усиливает стабилизирующее действие нанотрубок, что практически не изменяет прочность при изгибе (потеря составила 0,7%).

Оценка влияния модификаторов на изменение цвета образцов после 24 ч облучения показала двукратное снижение потери окраски (с $\Delta E=2,5$ для исходного до $\Delta E=1,1-1,3$ для модифицированных). В целом, все составы по долговечности соответствуют ГОСТ 59555-2021 и имеют прогнозируемый срок службы более 10 лет.

Список литературы/ References

1. Сулейманов А.М. Актуальные задачи в прогнозировании долговечности полимерных строительных материалов // Строительные материалы. 2015. № 5. С. 10-13 [Suleymanov A.M. Topical tasks in forecasting the durability of polymeric building materials // Stroitel'nye Materialy [Construction materials]. 2015. Iss. 5. P. 10-13]
2. Konstantinos F. et al. A review on the durability of PVC sewer pipes: research vs. practice // Structure and Infrastructure Engineering. 2020. Iss. 6. P. 880-897. DOI: 10.1080/15732479.2019.1673442.
3. Frigione, M. et al. Assessment of the Ageing and Durability of Polymers // Polymers. 2022. Iss. 14. P. 1934. DOI: 10.3390/polym14101934.
4. Никольская В. Дополнительная нагрузка для ДПК // ЛесПром Информ. 2021. Т. 157, № 3. С. 80-86 [Nikolskaya V. Additional load for WPC // LesPromInform. 2021. Vol. 157, Iss. 3. P. 80-86]
5. Мацевич Т.А. Террасные доски: состав, изготовление, свойства. Часть 1. Механические свойства // Строительные материалы. 2018. № 1-2. С. 101-105 [Matseevich T.A. et al. Terrace boards: composition, manufacture, properties. Part 1. Mechanical properties // Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]. 2018. Iss. 1-2. P. 101-105]
6. Мацевич Т.А. и др. Террасные доски: состав, изготовление, свойства. Часть 2. Термические свойства, водопоглощение, истираемость, твердость, устойчивость к климатическим воздействиям, использование вторичных полимеров // Строительные материалы. 2018. № 3. С. 55-61 [Matseevich T.A. et al. Decking: structure, manufacturing, properties. Part 2. Thermal properties, water absorption, abrasion, hardness, resistance to climatic influences, the use of recycled polymers. Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]. 2018. Iss. 3. P. 55-61]
7. Khuziakhmetova K.R. et al. Polyvinyl Chloride Compounds for Construction Industry // Lecture Notes in Civil Engineering. 2022. P. 191-200.
8. Хантимиров А. Г. и др. Исследование свойств наномодифицированных древесно-полимерных композитов на основе полиэтилена // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2023. Т. 15, № 2. С. 110-116. [Khantimirov A. G. et al. Study of the properties of nanomodified wood-polymer composites based on polyethylene // Nanotechnologies in construction: scientific online journal. 2023. Vol. 15, No. 2. P. 110-116] DOI 10.15828/2075-8545-2023-15-2-110-116. – EDN HCMIRC.
9. Ge Sh. et al. Potential use of different kinds of carbon in production of decayed wood plastic composite // Arabian Journal of Chemistry. 2017. Vol. 11, Iss. 6. P. 838-843.
10. Zhang X. et al. Thermal and mechanical properties of wood-plastic composites filled with multiwalled carbon nanotubes // Journal of Applied Polymer Science. 2018. Vol. 135, Iss. 22. P. 1-7. DOI: 10.1002/app.46308.

11. Lukawski D. et al. Enriching WPCs and NFPCs with Carbon Nanotubes and Graphene // *Polymers*. 2022. Iss. 14. DOI: 10.3390/polym14040745
12. Yu M. et al. Mechanical and thermal properties of R-high density polyethylene composites reinforced with wheat straw particleboard dust and basalt fiber // *International Journal of Polymer Science*. 2018. P. 1–11. DOI: 10.1155/2018/5101937.
13. Jiang L. et al. Wear and thermal behavior of basalt fiber reinforced rice husk / polyvinyl chloride composites // *Applied Polymer science*. 2020. Iss. 8. P. 1-7. DOI: 10.1002/app.50094.
14. Saddem M. et al. Effect of fiber and polymer variability on the rheological properties of wood polymer composites during processing // *Polymer Composites*. 2019. Vol. 40. P. E609–E616. DOI: 10.1002/pc.24909.
15. Абдрахманова Л.А. и др. Эффективность углеродных наноструктур в составе древесно-полимерных композитов на основе поливинилхлорида // *Нанотехнологии в строительстве*. 2021. Т. 13, № 3. С. 150–157. DOI: 10.15828/2075-8545-2021-13-3-150-157 [Abdrakhmanova L.A. et al. Efficiency of carbon nanostructures in wood-polymer composites based on polyvinyl chloride // *Nanotechnologies in construction*. 2021. Vol. 13, Iss. 3. P. 150-157. DOI: 10.15828/2075-8545-2021-13-3-150-157.]
16. Абдрахманова Л.А. и др. Древесно-полимерные наномодифицированные поливинилхлоридные строительные композиты // *Вестник МГСУ*. 2018. Т. 13, № 4 (115). С. 426–434. DOI: 10.22227/1997–0935.2018.4.426-434 [Abdrakhmanova L.A. et al. Wood-polymer nanomodified Polyvinyl chloride Building Composites // *Vestnik MGSU*. 2018. Vol. 13, Iss. 4 (115). P. 426-434. DOI: 10.22227/1997–0935.2018.4.426-434]
17. Galeev R. Resource-saving polymer compositions for construction purposes // *IOP conference series: Materials Science and Engineering, Kazan, 29 april – 15 may 2020*. Vol. 890. Kazan, Russia: IOP Science, 2020. P. 012111. DOI 10.1088/1757-899X/890/1/012111. – EDN LOMNOQ.
18. Хантимиров А.Г. и др. Наполнение древесно-полимерных композитов базальтовыми волокнами // *Известия вузов. Строительство*. 2022. № 10. С.5-13. DOI: 10.32683/0536-1052-2022-766-10-5-13 [Khantimirov A.G. et al. Filling of wood-polymer composites with basalt fibers // *Izvestiya vuzov. Construction*. 2022. Iss. 10. P. 5-13. DOI: 10.32683/0536-1052-2022-766-10-5-13]
19. Барахтенко В.В. Оценка потребительских характеристик изделий из высоконаполненного полимерно-минерального композиционного материала на основе поливинилхлорида и отходов ТЭС // *Инженерно-строительный журнал*. 2014. №3. С. 17-24 [Barakhtenko V.V. Evaluation of consumer characteristics of products made of highly filled polymer-mineral composite material based on polyvinyl chloride and waste from thermal power plants // *Civil Engineering journal*. 2014. Iss. 3. P. 17-24.]
20. Мусин И.Н. и др. Влияние полимерного связующего на свойства древесно-полимерных композитов // *Вестник Казанского технологического университета*. 2014. Т. 17. № 14. С. 306-309. [Musin I.N. and others. The influence of a polymer binder on the properties of wood-polymer composites // *Bulletin of the Kazan Technological University*. 2014. T. 17. No. 14. P. 306-309.]
21. Pyo S. et al. A fully transparent, flexible, sensitive, and visible-blind ultraviolet sensor based on carbon nanotube–graphene hybrid // *Advancad electronic materials*. 2018. 1800737. P. 1-8. DOI: 10.1002/aelm.201800737.
22. Nguyen T. et al. Impact of UV irradiation on multiwall carbon nanotubes in nanocomposites: Formation of entangled surface layer and mechanisms of release resistance // *Carbon*. 2017. Vol. 116. P. 191-200. DOI: 10.1016/j.carbon.2017.01.097.
23. Низамов Р.К. Поливинилхлоридные композиции строительного назначения с полифункциональными наполнителями: дис. докт. техн. Наук. Казань, 2007. 369 с. [Nizamov R.K. Polyvinyl chloride compositions for construction purposes with multifunctional fillers: dis. doct. tech. sciences'. Kazan, 2007. 369 p.]

Информация об авторах

Хантимиров Аяз Габдрашитович, аспирант, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: khantimirov94@kgasu.ru

Сулейманов Альфред Мидхатович, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: sulejmanov@kgasu.ru

Абдрахманова Ляйля Абдулловна, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: laa@kgasu.ru

Низамов Рашит Курбангалиевич, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: Nizamov@kgasu.ru

Хохряков Олег Викторович, доктор технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: olvik@list.ru

Information about the authors

Ayaz G. Khantimirov, post-graduate student, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: khantimirov94@kgasu.ru

Alfred M. Sulejmanov, doctor of technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: sulejmanov@kgasu.ru

Lyaylya A. Abdrakhmanova, doctor of technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: laa@kgasu.ru

Rashit K. Nizamov, doctor of technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: Nizamov@kgasu.ru

Oleg V. Khokhryakov, doctor of technical sciences, docent, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: olvik@list.ru

УДК: 691.678.686

DOI: 10.52409/20731523_2023_3_36

EDN: ENUXGX



Сравнение модифицирующего действия в эпоксидных композициях диоксидсодержащих наполнителей на основе техногенного и растительного сырья

Е.М. Готлиб¹, И.Д. Твердов², Э.Р. Галимов³, А.В. Долгова³, А.Р. Гимранова³

¹Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань,
Российская Федерация

²Комплексная лаборатория «НаноАналитика», г. Казань, Российская Федерация

³Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.
Туполева-КАИ, г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. Природный диоксид обладает высокими электрофизическими и прочностными характеристиками, твердостью, а также устойчивостью к действию кислот, что обуславливает его использование в составе различных видов керамики, фаянса, бетона, сухих смесей и др. Кроме того, он достаточно эффективен как наполнитель полимерных материалов, что показано на примере полиэфирных смол. Однако, из-за дороговизны добычи и больших трудозатрат на измельчение твердой породы дисперсный диоксидсодержащий наполнитель практически отсутствует на отечественном рынке. Проблемой является также неравномерное распределение по территории России месторождений диоксидовой породы. Это делает актуальным синтез диоксидсодержащих наполнителей на основе доступного, недорогого отечественного сырья, в частности, металлургических шлаков и золы рисовой шелухи.

Цель работы заключается в определении влияния модифицирующего действия диоксидсодержащих наполнителей на основе техногенного и растительного сырья в эпоксидных композициях на комплекс эксплуатационных показателей.

Задачами исследования для достижения поставленной цели: являются изучение основных свойств диоксидсодержащих наполнителей, таких как фазовый состав, пористость, рН поверхности, маслосъемкость; анализ физико-механических характеристик эпоксидных композиций, наполненных данными наполнителями.

Результаты. В работе представлены результаты исследований диоксидсодержащих наполнителей, полученных на основе отходов черной металлургии и производства рисовой крупы. Наполнитель на основе металлургического шлака, содержит в 4 раза меньшее количество целевого продукта – диоксида, чем полученный на основе золы рисовой шелухи. У диоксидсодержащего наполнителя на основе металлургического шлака значительно меньшая пористость, по сравнению с наполнителем, который синтезирован на основе золы рисовой шелухи. Удельная поверхность его пор меньше на 30 %. Модификация эпоксидных полимеров диоксидсодержащими наполнителями обеспечивает значительное снижение коэффициента трения и рост износостойкости материалов на их основе, то есть их высокие трибологические характеристики. Одновременно растет твердость наполненных композиций и их адгезия к стали.

Выводы. Применение диоксидсодержащих наполнителей является эффективным для модификации эпоксидных полимеров и разработки защитных покрытий металлических конструкций и клеевых композиций на их основе.

Ключевые слова: диоксид, наполнители, эпоксидные материалы, рисовая шелуха, металлургический шлак.

Для цитирования: Готлиб Е.М., Твердов И.Д., Галимов Э.Р., Долгова А.В., Гимранова А.Р. Сравнение модифицирующего действия в эпоксидных композициях диоксид

содержащих наполнителей на основе техногенного и растительного сырья // Известия КГАСУ, 2023, № 3(65), с.36-44, DOI: 10.52409/20731523_2023_3_36, EDN: ENUXGX

Comparison of modifying action in epoxy compositions of diopside containing fillers based on technogenic and vegetable raw materials

E.M. Gotlib¹, I.D. Tverdov², E.R. Galimov³, A.V. Dolgova³, A.R. Gimranova³

¹National Research Technological University, Kazan, Russian Federation

²Complex Laboratory "NanoAnalytics", Kazan, Russian Federation

³Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI, Kazan, Russian Federation

Abstract. Natural diopside has high electrophysical and strength characteristics, as well as resistance to acids, which causes its use in various types of ceramics. In addition, it is quite effective as a filler of polymer materials, which is shown by the example of polyester resins. However, due to the high cost of extraction and high labor costs for grinding solid rock, dispersed diopside-containing filler is practically absent on the domestic market. In this regard, the main problem is the uneven distribution of the diopside deposit across the territory of Russia. This makes it relevant to synthesize diopside-containing fillers based on available, inexpensive domestic raw materials, in particular, metallurgical slag and rice husk ash.

The purpose of the work is to study the phase composition and properties of diopside - containing fillers based on man - made and vegetable raw materials and to study their modifying effect in epoxy compositions to improve the complex of performance indicators.

The objectives of the study to achieve this goal are to study the basic properties of diopside-containing fillers, such as phase composition, porosity, surface pH, oil capacity; analysis of the physical and mechanical characteristics of epoxy compositions filled with these fillers.

Results. The paper presents the results of studies of diopside-containing fillers obtained on the basis of ferrous metallurgy waste and rice cereal production. The filler based on metallurgical slag contains 4 times less amount of the target product – diopside than the one obtained on the basis of rice husk ash. The diopside-containing filler based on metallurgical slag has significantly lower porosity compared to the filler, which is synthesized on the basis of rice husk ash. The specific surface area of its pores is less by 30%. Modification of epoxy polymers with diopside-containing fillers provides a significant reduction in the coefficient of friction and an increase in the wear resistance of materials based on them, that is, their high tribological characteristics. At the same time, the hardness of the filled compositions and their adhesion to steel increases.

Conclusions. The use of diopside-containing fillers is effective for the modification of epoxy polymers and the development of protective coatings of metal structures and adhesive compositions based on them.

Keywords: diopside, fillers, epoxy materials, rice husk, metallurgical slag.

For citation: Gotlib E.M., Tverdov I.D., Galimov E.R., Dolgova A.V., Gimranova A.R. Comparison of modifying action in epoxy compositions of diopside containing fillers based on technogenic and vegetable raw materials // News KSUAE, 2023, № 3(65), p.36-44, DOI: 10.52409/20731523_2023_3_36, EDN: ENUXGX

1. Введение

Большой интерес для композиционных полимерных материалов представляет использование в качестве минеральных наполнителей [1-3] метасиликата кальция (волластонита) и кальций-магниевого силиката (диопсида – $\text{CaMg}(\text{Si}_2\text{O}_6)$). Они применяются для производства красок, грунтовок, шпатлевок, сухих смесей, фарфора санитарного назначения, бетона, теплоизоляционных материалов и керамики

строительного и электро-технического назначения, а также в резинах и композициях на основе линейных и сетчатых полимеров [4,5].

Диопсид представляет собой кальций-магний-силикат, который кристаллизуется в моноклинной сингонии [6]. Он содержит порядка 26 % оксида кальция, 18 % оксида магния и около 56 % оксида кремния. Цепочечная структура обуславливает призматический габитус кристаллов диопсида [7].

Природный диопсид обладает высокими электрофизическими и прочностными характеристиками, а также устойчивостью к действию кислот, что обуславливает его использование в качестве основной кристаллической фазы в составе различных видов керамики [8]. Кроме того, он достаточно эффективен как наполнитель полимерных материалов, что показано на примере полиэфирных эпоксидных смол [3,9].

Диопсидсодержащие природные наполнители в нашей стране получают из диопсидовых полиминеральных пород Слюдянского месторождения (Иркутская область). Однако разработка этого месторождения носит ограниченный характер, из-за дороговизны добычи.

Кроме того, требуются большие трудозатраты на измельчение твердой породы, что обуславливает практическое отсутствие дисперсного диопсидсодержащего наполнителя на отечественном рынке, несмотря на его востребованность промышленностью [10]. Это делает актуальным синтез диопсидсодержащих наполнителей на основе доступного, недорогого отечественного сырья [11].

Металлургические шлаки, в состав которых входят кислотный диоксид кремния и основные окислы кальция, магния и железа [12] представляют собой кальций-магний-силикаты и могут рассматриваться как диопсидсодержащие наполнители [13].

Особый интерес, с экономической и экологической точек зрения, представляет применение для получения диопсидсодержащих наполнителей золы рисовой шелухи [14], которая была успешно использована, как источник аморфного диоксида кремния, для синтеза, волластонита [15].

Цель работы заключается в определении влияния модифицирующего действия диопсидсодержащих наполнителей на основе техногенного и растительного сырья в эпоксидных композициях на комплекс эксплуатационных показателей

Задачами исследования являются: изучение основных свойств диопсидсодержащих наполнителей, таких как фазовый состав, пористость, pH поверхности, маслосмкость; анализ физико-механических характеристик эпоксидных композиций, наполненных данными наполнителями.

2. Материалы и методы

В работе использовалась эпоксидная диановая смола ЭД-20 (ГОСТ 10587-84), отверждаемая аминоалкилфенолом (АФ-2) (ТУ 2494-052-00205423-2004) при комнатной температуре в течение 7 суток.

Диопсидсодержащие наполнители получали на основе металлургического шлака (ДС₁) и золы рисовой шелухи (ДС₂). Рентгенофазовый количественный анализ (РКФА) проводился на многофункциональном дифрактометре Rigaku SmartLab при параметрах съёмки: угловой интервал от 3° до 65°, с шагом сканирования 0,02, с экспозицией 1 секунда в точке.

Размер частиц наполнителей определялся методом лазерной дифракции в соответствии с ГОСТ Р 8.777-2011.

Площадь удельной поверхности пор ДС оценивали по адсорбции газа методом Брунауэра-Эммета-Теллера (БЭТ), согласно ISO 9277:2010, объем пор по методу ВJН, согласно ISO 15901-2, на анализаторе площади поверхности и размера пор «Nova 1200e»

pH водных вытяжек образцов ДС определялись с помощью комбинированного измерителя SevenMulti по ГОСТ 21119.3-91

Для оценки износостойкости и коэффициента статического трения, эпоксидные покрытия наносились на алюминиевый лист толщиной 1 мм и затем шлифовались до Ra=1,00-1,20 мкм.

Износостойкость наполненных эпоксидных материалов определялась на вертикальном оптиметре ИЗВ-1 при следующем режиме: удельное давление контртела на

испытуемую поверхность образца $P=1$ МПа, скорость скольжения $V_{ск}=1$ м/сек, без смазки.

Исследования трибологических свойств наполненных материалов проводились на автоматизированной машине трения (Tribometer, CSM Instruments, Швейцария), управляемой компьютером, по стандартной схеме испытания «шарик-диск» ASTM G99 – 959, DIN50324 и ISO 20808. Линейная скорость при испытании составляла 8,94см/сек, частота выборки – 10 Гц, температура – 25 °С, влажность – 20 %.

Твердость определялась по методу Шора ГОСТ 24621-91.

Адгезионная прочность оценивалась методом отрыва на образцах стали по ГОСТ 32299-2013.

3. Результаты и обсуждение

Методом РКФА определен фазовый состав (таблица 1) полученных наполнителей.

Таблица 1

Фазовый состав (%) диоксидсодержащих наполнителей

Тип наполнителя	диоксид	акерманит	форстерит
ДС ₁	23	77	-
ДС ₂	95	3	2

Установлено, что наполнитель на основе металлургического шлака, содержит в 4 раза меньшее количество целевого продукта – диоксида, чем полученный на основе золы рисовой шелухи (ЗРШ). В составе ДС₂ также небольшие концентрации примесей (акерманита и форстерита). Акерманит ($Ca_2Mg [Si_2O_7]$) представляет собой островной меллитит, содержащий оксиды кальция, магния и кремния.

Форстерит (Mg_2SiO_4) — ортосиликат магния.

Таблица 2

Характеристики пористости наполнителей

Тип наполнителя	Удельная поверхность пор БЭТ, м ² /г	Общий объем пор по ВЖН, см ³ /г	Средний диаметр пор по ВЖН, нм	Средний размер частиц, мкм	Удельная поверхность см ² /см ³
ДС ₂	0,614	0,001	4,113	76,1	1958
ДС ₁	0,475	-	-	12,4	35264

У диоксидсодержащего наполнителя на основе металлургического шлака значительно меньшая пористость, по сравнению с ДС₂, синтезированного на основе ЗРШ (таблица 2). Удельная поверхность его пор меньше на 30 %, а их размер не позволяет определять разрешающая способность используемого прибора.

Большее количество частиц ДС₁ имеет размер порядка 50 мкм, а у ДС₂ он варьируется в пределах от 10 до 300 мкм, причем максимальное количество частиц наполнителя на основе растительного сырья имеет диаметр порядка 10 мкм (рис. 1а, 1б).

В тоже время средний размер частиц меньше и их удельная поверхность больше у наполнителя, полученного переработкой отходов черной металлургии (таблица 2).

У обоих исследуемых наполнителей унимодалное распределение частиц по размерам, но несколько более широкое у ДС₁ (рис. 1а, рис. 1б).

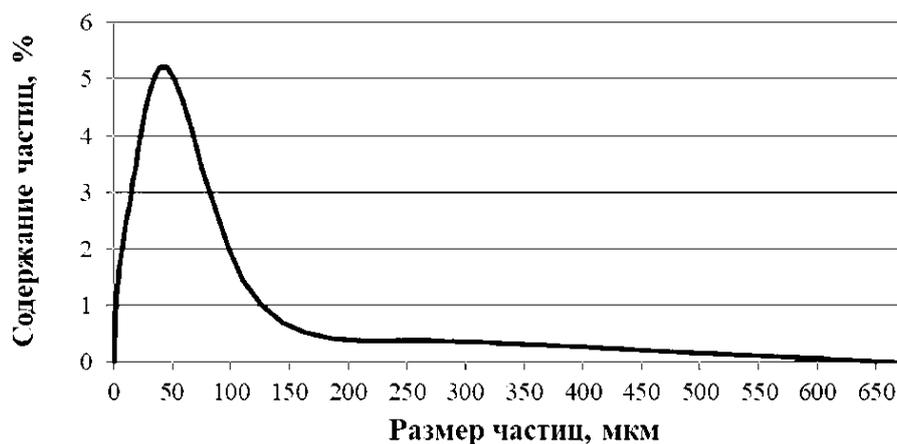


Рис. 1а– Кривая распределения частиц по размерам ДС₁ (иллюстрация авторов)
 Fig. 1a– Particle size distribution curves DC₁ (illustration by the authors)

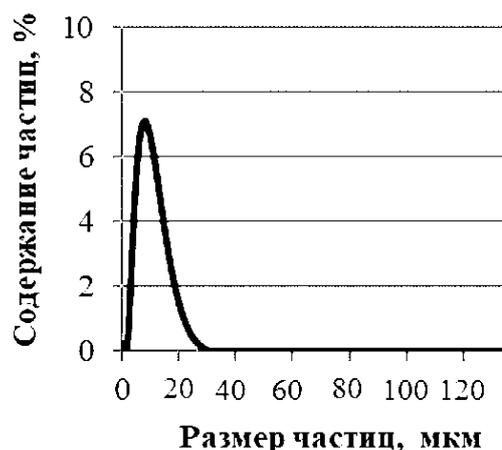


Рис. 1б – Кривая распределения частиц по размерам ДС₂ (иллюстрация авторов)
 Fig. 1b – Particle size distribution curves DC₂ (illustration by the authors)

Маслоемкость ДС₂ почти в 5 раз выше, чем у ДС₁, что в определенной степени коррелирует с пористостью этих диоксидсодержащих наполнителей, и связано также с природой исходного сырья.

Наполнитель на основе металлургического шлака имеют выраженную щелочную природу поверхности. рН диоксидсодержащего наполнителя, полученного с применением ЗРШ, (таблица 3) существенно ниже из-за применения при его твердофазном синтезе борной кислоты в качестве плавня [16].

Таблица 3
 Маслоемкость и кислотно-основные свойства поверхности диоксид содержащих наполнителей

Тип наполнителя	Маслоемкость, г/100 г	рН водной вытяжки при 20°С
ДС ₂	66,9	8.1
ДС ₁	12,8	10,5

Анализ влияния исследованных диоксидсодержащих наполнителей на эксплуатационные характеристики эпоксидных полимеров показал (таблица 4), что имеет место закономерное снижение коэффициента их трения (до 40-42 %) и рост износостойкости (до 33-47 %). То есть улучшаются антифрикционные свойства материалов. Одновременно растет твердость наполненных композиций (до 35%).

При этом, несмотря на большее содержание диопсида в составе наполнителя, полученного на основе ЗРШ, ДС₁ обеспечивает лучшие эксплуатационные характеристики эпоксидных композиций (таблица 4).

Особенно это касается твердости наполненных композитов. Это можно связать с меньшей пористостью ДС₁ и тетрагональной сингонией входящего в его состав акерманита, имеющего столбчатую форму кристаллов [17].

Коэффициент статического трения наполненных ДС₁ и ДС₂ эпоксидных материалов значительно ниже, чем при применении волластонита [15]. Это можно связать с высоким содержанием в составе исследуемых наполнителей диопсида, акерманита и форстерита, включающих оксиды магния, обладающие большей теплопроводностью [18, 19], чем силикаты кальция, что обеспечивает лучший отвод тепла из зоны трения [20, 21].

Таблица 4

Эксплуатационные свойства эпоксидных материалов с диопсидсодержащими наполнителями

Тип наполнителя	Твердость, HSD	Износ, $\times 10^{-6}$, м	Коэффициент трения	Прочность при отрыве к стали, МПа
Базовый состав	37,2	17,7	0,44	3,02
ДС ₁	50,2	9,7	0,16	3,86
ДС ₂	39,4	10,8	0,17	3,72

Примечание: Содержание наполнителя 20 мас. ч. на 100 мас.ч ЭД-20

Кроме того, диопсидсодержащие наполнители увеличивают адгезию эпоксидных покрытий к стали примерно на 20-25 % (таблица 4).

Таким образом, применение диопсидсодержащих наполнителей является эффективным для модификации эпоксидных полимеров.

4. Заключение

В работе представлены результаты исследований диопсидсодержащих наполнителей, полученных на основе отходов черной металлургии и производства рисовой крупы. Наполнитель на основе металлургического шлака, содержит в 4 раза меньше целевого продукта – диопсида, чем наполнитель на основе ЗРШ. У диопсидсодержащего наполнителя на основе металлургического шлака значительно меньшая пористость, по сравнению с наполнителем, который синтезирован на основе ЗРШ. Удельная поверхность его пор меньше на 30 %

Эпоксидные материалы с диопсидсодержащими наполнителями имеют значительно более низкий коэффициент трения и более высокую твердость и износостойкость. Одновременно растет адгезия к стали наполненных композиций. При этом, наполнитель на основе металлургического шлака в значительно большей степени увеличивает твердость материалов.

Список литературы/ References

1. Sangwon Lee , Seunggu Kang. Effect of a ZnO addition on the thermal properties of diopside-based glass ceramics for LED packages // Contemporary Engineering Sciences – 2016. – №29. – P. 1425-1426. DOI:10.12988/ces.2016.69159
2. Сафонова Т.В., Кудисова А.А. Влияние фракционного состава диопсида в массах для производства строительной керамики на ее свойства // Научный альманах – 2016. – №19. – P. 151-155. DOI:10.17117/na.2016.05.03.151. [Safonova T.V., Kudisova A.A. Influence of the fractional composition of diopside in masses for the production of building ceramics on its properties // Scientific almanac - 2016. - No. 19. – P. 151-155. DOI:10.17117/na.2016.05.03.151]
3. Козик В.В., Бородин И.А., Бородин Л.П., Слизов Ю.Г. Влияние природных силикатов на отверждение ненасыщенных полиэфирных смол // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. – 2004. – №1. – С. 112-115. [Kozik V.V., Borodina I.A., Borilo L.P., Slizhov Yu.G. The influence of natural silicates

- on the curing of unsaturated polyester resins // News of higher educational institutions. Chemistry and chemical technology. – 2004. – No. 1. – pp. 112-115]
4. Канаева, Н.С. Анализ кинетики накопления повреждений в структуре эпоксидных полимеров в процессе циклического нагружения / Н.С. Канаева, Д.Р. Низин, Т.А. Низина, А.А. Порватова, А.А. Березенцева // Математическое моделирование в естественных науках. – 2021. – Т. 1. – С. 310-312. [Kanaeva, N.S. Analysis of the kinetics of damage accumulation in the structure of epoxy polymers during cyclic loading / N.S. Kanaeva, D.R. Nizin, T.A. Nizina, A.A. Porvatova, A.A. Berezentseva // Mathematical modelling in natural sciences. – 2021. – Т. 1. – P. 310-312]
 5. Тюльнин В.А., Ткач В.Р., Эйрих В.И. Волластонит – уникальное минеральное сырье многоцелевого назначения // Руда и металлы. – 2020. – №1. – С. 114. [Tyulnin V.A., Tkach V.R., Eirich V.I. Wollastonite is a unique multi-purpose mineral raw material // Ore and metals. – 2020. – No. 1. – P. 114]
 6. Готтлиб Е.М., Ямалеев Е.С., Твердов И.Д. Исследование природного отечественного сырья для получения силикатных наполнителей // Южно-Сибирский научный вестник. – 2022. – №3. – С. 67-73. [Gottlieb E.M., Yamaleev E.S., Tverdov I.D. Study of natural domestic raw materials for the production of silicate fillers // South Siberian Scientific Bulletin. – 2022. – No. 3. – P. 67-73]
 7. Чурсова, Л.В. Эпоксидные смолы, отвердители, модификаторы и связующие на их основе / Л.В. Чурсова, Н.Н. Панина, Т.А. Гребенева, И.Ю. Кутергина. – СПб.: Профессия, 2020. – 576 с. [Chursova, L.V. Epoxy resins, hardeners, modifiers and binders based on them / L.V. Chursova, N.N. Panina, T.A. Grebeneva, I.Yu. Kutergin. – St. Petersburg: Profession, 2020. – 576 p]
 8. David, L.B. A low friction and ultra low wear rate PEEK/PTFE composite / L.B. David, W.S. Gregory // Wear. – 2006. – Vol. 261. – P. 410-418.
 9. Меньшикова В.К., Демина Л.Н. Модификация керамических составов сырьевыми материалами Сибирского региона // Вестник Евразийской науки. – 2020. – №4 – С. 11-19. [Menshikova V.K., Demina L.N. Modification of ceramic compositions with raw materials from the Siberian region // Bulletin of Eurasian Science. – 2020. – No. 4 – P. 11-19]
 10. Каримов, Н.К. Исследование влияния основных факторов на физико-химические свойства композиционных эпоксидных материалов, применяемых в качестве антифрикционных и антикоррозионных покрытий / Н.К. Каримов, И.Н. Ганиев, Н.С. Олимов // Доклады Академии наук Республики Таджикистан «Композиционные материалы». – 2008. – Т. 51. – № 9. – С. 685-689 [Karimov, N.K. Study of the influence of the main factors on the physicochemical properties of composite epoxy materials used as antifriction and anticorrosion coatings / N.K. Karimov, I.N. Ganiev, N.S. Olimov // Reports of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan “Composite materials”. – 2008. – Т. 51. – No. 9. – P. 685-689]
 11. Верещагин В.И., Могилевская Н.В., Сафонова Т.В. Спекание и прочность стеновой керамики и фаянса из композиций глинистого и диопсидсодержащего сырья // Вестник ТГАСУ. – 2019. – №6. – С. 122-131. DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-6-122-133 [Vereshchagin V.I., Mogilevskaya N.V., Safonova T.V. Sintering and strength of wall ceramics and faience from compositions of clay and diopside-containing raw materials // Bulletin of TGASU. – 2019. – No. 6. – pp. 122-131. DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-6-122-133]
 12. Пат. № 2374275, Российская Федерация, МПК C08J 5/16, C08L63/00, C08K 3/34 Антифрикционная полимерная композиция и способ ее изготовления / О.В. Зазимко, И.Ф. Пустовой, Д.Н. Любимов, К.Н. Долгополов; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество «Нанопром» – № 2008133853/04; заявл. 19.08.2008; опубл. 27.11.2009, Бюл. № 33. – 8 с. [Pat. No. 2374275, Russian Federation, IPC C08J 5/16, C08L63/00, C08K 3/34 Antifriction polymer composition and method of its manufacture / O.V. Zazimko, I.F. Pustovoy, D.N. Lyubimov, K.N. Dolgoplov; applicant and patent holder Open Joint Stock Company Nanoprom – No. 2008133853/04; application 08/19/2008; publ. 27.11.2009, Bulletin. No. 33. – 8 p]

13. Готлиб, Е.М. Волластонит и диопсид, содержащие наполнители эпоксидных материалов на основе сельскохозяйственных и техногенных отходов / Е.М. Готлиб, И.Д. Твердов, Т.Н.Ф. Ха, Е.С. Ямалева // Вестник технологического университета. – 2022. – Т. 25. – №8. – С. 164-174. [Gottlieb, E.M. Wollastonite and diopside containing fillers of epoxy materials based on agricultural and technogenic waste / E.M. Gottlieb, I.D. Tverdov, T.N.F. Ha, E.S. Yamaleeva // Bulletin of the Technological University. – 2022. – Т. 25. – No. 8. – P. 164-174]
14. Валеева А.Р. Утилизация рисовой шелухи путем получения наполнителей на ее основе / Е.М. Готлиб, А.Р. Валеева, Р.Ш. Нцуму, А.Р. Гимранова, Э.Р. Галимов // Безопасность, защита и охрана окружающей природной среды: фундаментальные и прикладные исследования Сборник докладов Всероссийской научной конференции. Изд-во: Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова, Белгород. – 2020. – С. 113-118. [Valeeva A.R. Utilization of rice husk by obtaining fillers based on it / E.M. Gottlieb, A.R. Valeeva, R.Sh. Ntsumu, A.R. Gimranova, E.R. Galimov // Safety, protection and conservation of the natural environment: fundamental and applied research Collection of reports of the All-Russian Scientific Conference. Publishing house: Belgorod State Technological University named after. V.G. Shukhova, Belgorod. – 2020. – P. 113-118]
15. Nogueira, R. L., Soares, J. B., Soares, S. de A. Rheological evaluation of cotton seed oil fatty amides as a rejuvenating agent for RAP oxidized asphalts // Construction and Building Materials. – 2019. Vol. 223. – P. 1145–1153. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2019.06.
16. Razali M. N., EzatieMohd Isa S. N., MdSalehanN. A., Musa M., Abd Aziz M. A., Nour A. H., Yunus R. M. Formulation of Emulsified Modification Bitumen from Industrial Wastes // Indonesian Journal of Chemistry. – 2020. Vol. 20. – P. 96–104. DOI:10.22146/ijc.40888.
17. Valeeva, A.R. Anti-friction epoxy coatings modified with rice husk / A.R. Valeeva, A.R. Gimranova, E.M. Gotlib, E.R. Galimov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – № 3. – P. 1-8.
18. Готлиб, Е.М. Волластонит – эффективный наполнитель резин и полимерных материалов на основе линейных и сетчатых полимеров: монография / Е.М. Готлиб и др. – Lambert Academic Publishing, 2017. – 180 с [Gottlieb, E.M. Wollastonite is an effective filler for rubber and polymer materials based on linear and network polymers: monograph / E.M. Gottlieb et al. – Lambert Academic Publishing, 2017. – 180 p]
19. Хантимиров А.Г., Абдрахманова Л.А., Низамов Р.К. Исследование свойств наномодифицированных древесно-полимерных композитов на основе полиэтилена // Нанотехнологии в строительстве. – 2023. – № 3 - с.110-116 [Khantimirov A.G., Abdrakhmanova L.A., Nizamov R.K. Study of the properties of nanomodified wood-polymer composites based on polyethylene // Nanotechnologies in construction. – 2023. – No. 3 - P.110-116]
20. Хозин, В. Г. Карбонатные цементы низкой водопотребности - перспективные вяжущие для бетонов / В. Г. Хозин, О. В. Хохряков, Р. К. Низамов // Бетон и железобетон. – 2020. – № 1(601). – С. 15-28. – EDN VIDDBF. [Khozin, V. G. Carbonate cements of low water demand - promising binders for concrete / V. G. Khozin, O. V. Khokhryakov, R. K. Nizamov // Concrete and reinforced concrete. – 2020. – No. 1(601). – P. 15-28. – EDN VIDDBF]
21. Galeev, R. Nanomodified organic-inorganic polymeric binders for polymer building materials / R. Galeev, L. Abdrakhmanova, R. Nizamov // Solid State Phenomena. – 2018. – Vol. 276. – P. 223-228. – DOI 10.4028/www.scientific.net/SSP.276.223. – EDN YBYFXF.

Информация об авторах

Готлиб Елена Михайловна, докт. техн. наук, профессор, Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань, Российская Федерация
Email: egotlib@yandex.ru

Твердов Илья Дмитриевич, инженер 1 категории, Комплексная лаборатория «НаноАналитика», г. Казань, Российская Федерация

E-mail: idtverdov@gmail.com

Галимов Энгель Рафикович, докт. техн. наук, профессор, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: 89871726737@mail.ru

Долгова Алина Викторовна, студент бакалавриата, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ, г. Казань, Российская Федерация

Email: alinkadolgova@icloud.com

Гимранова Альмира Рамазановна, кан. техн. наук, старший преподаватель, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ, г. Казань, Российская Федерация

Email: miracle543543@mail.ru

Information about the authors

Elena M. Gotlib, doctor technical sciences, professor, Kazan National Research Technological University, Kazan, Russian Federation

Email: egotlib@yandex.ru

Ilya D. Tverdov, engineer of the 1st category, Complex Laboratory «NanoAnalytics», Kazan, Russian Federation

E-mail: idtverdov@gmail.com

Engel R. Galimov, doctor technical sciences, professor, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI, Kazan, Russian Federation

Email: 89871726737@mail.ru

Alina V. Dolgova, undergraduate student, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI, Kazan, Russian Federation

Email: alinkadolgova@icloud.com

Almira R. Gimranova, candidate of technical sciences, senior Lecturer, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI, Kazan, Russian Federation

Email: miracle543543@mail.ru

УДК: 691.32, 544.774
DOI: 10.52409/20731523_2023_3_45
EDN: FCPOKY



Функционализированный минеральный наполнитель – эффективный модификатор цементных бетонов

А.Ю. Беляков¹, О.В. Хохряков¹, В.Г. Хозин¹

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация: *Постановка задачи.* Минеральные наполнители и поверхностно-активные вещества (пластификаторы) позволяют регулировать реологические свойства бетонных смесей, повышать физико-механические показатели бетонов, а также снижать расход цемента в них. Однако самым распространённым способом остается введение химических добавок в состав бетонных смесей с водой затворения, а применение минеральных наполнителей (пуццолановых, гидравлических, инертных) в реальной практике менее распространено.

Альтернативой разделному применению пластификаторов (и других химических добавок) и наполнителей может стать принудительное «закрепление» первых на поверхности минеральных частиц при их совместном помоле. Полученные таким способом функционализированные наполнители могут использоваться в качестве модифицирующих добавок в цементные бетоны, превосходящих по эффективности известные органоминеральные добавки.

В статье рассмотрено влияние функционализации суперпластификаторами минеральных наполнителей различной химической природы на подвижность цементно-минеральных суспензий и бетонных смесей, на физико-механические свойства тяжелых бетонов.

Цель исследования состоит в получении функционализированных наполнителей, обеспечивающих повышенную эффективность суперпластификаторов в бетонных смесях. Для достижения цели ставились следующие задачи:

1. Установить предельно-эффективные концентрации суперпластификаторов в цементно-водных суспензиях;
2. Определить подвижности цементно-минеральных суспензий и обоснование эффективности применения функционализированных наполнителей;
3. Исследовать распределение частиц по размерам в функционализированных наполнителях;
4. Изучить влияние функционализации наполнителей на водопотребность бетонных смесей и прочность бетона.

Результаты. Обоснован способ повышения эффективности действия суперпластификаторов в минерально-водных суспензиях путем функционализации минеральных наполнителей. В тяжелых цементных бетонах он позволяет существенно повысить технологические и физико-механические свойства.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в повышении прочностных показателей бетонов с применением функционализированных наполнителей, полученных из изопластичных бетонных смесей, что позволяет сократить расход портландцемента без снижения физико-механических свойств бетона.

Ключевые слова: функционализированный наполнитель, суперпластификатор, пластифицирующая способность, цементный бетон, модификатор бетона.

Для цитирования: Беляков А.Ю., Хохряков О.В., Хозин В.Г. Функционализированный минеральный наполнитель – эффективный модификатор цементных бетонов // Известия КГАСУ, 2023, № 3(65), с.45-56, DOI: 10.52409/20731523_2023_3_45, EDN: FCPOKY

Functionalized mineral filler is an effective modifier for cement concrete

A.Yu. Belyakov¹, O.V. Khokhryakov¹, V.G. Khozin¹

¹Kazan State University of Architecture and Engineering,
Kazan, Russian Federation

Abstract: *Problem statement.* Mineral fillers and surfactants (plasticizers) make it possible to regulate the rheological properties of concrete mixtures, increase the physical and mechanical properties of concrete, and also reduce the consumption of cement in them. However, the most common method remains the introduction of chemical additives into the composition of concrete mixtures with mixing water, and the use of mineral fillers (pozzolanic, hydraulic, inert) in practice is less common.

An alternative to the separate use of plasticizers (and other chemical additives) and fillers can be the forced “fixation” of the former on the surface of mineral particles when they are ground together. Functionalized fillers obtained in this way can be used as modifying additives in cement concrete, superior in efficiency to known organomineral additives.

The article examines the effect of functionalization of mineral fillers of various chemical nature with superplasticizers on the mobility of cement-mineral suspensions and concrete mixtures, and on the physical and mechanical properties of heavy concrete.

The purpose of the study is to obtain functionalized fillers that provide increased efficiency of superplasticizers in concrete mixtures. To achieve the goal, the following tasks were set:

1. To establish the maximum effective concentrations of superplasticizers in cement-water suspensions;
2. To determine the mobility of cement-mineral suspensions and justify the effectiveness of using functionalized fillers;
3. To investigate the particle size distribution in functionalized fillers;
4. To study the effect of functionalization of fillers on the water requirement of concrete mixtures and the strength of concrete.

Results. A method for increasing the efficiency of superplasticizers in mineral-water suspensions by functionalizing mineral fillers has been substantiated. In heavy cement concrete, the method can significantly improve the technological and physical-mechanical properties.

Conclusions. The significance of the results obtained for the construction industry is to increase the strength properties of concrete using functionalized fillers obtained from isoplastic concrete mixtures, which allows reducing the consumption of Portland cement without reducing the physical and mechanical properties of concrete.

Key words: functionalized filler, superplasticizer, plasticizing ability, cement concrete, concrete modifier.

For citation: Belyakov A.Yu., Khokhryakov O.V., Khozin V.G. Functionalized mineral filler is an effective modifier for cement concrete // News KSUAE, 2023, № 3(65), p.45-56, DOI: 10.52409/20731523_2023_3_45, EDN: FCPOKY

1. Введение

В бетонах главным и наиболее дорогостоящим, энерго- и ресурсозатратным компонентом является портландцемент, поэтому доминирующей тенденцией является снижение клинкероёмкости в производстве цементов. Наиболее результативным является производство цементов низкой водопотребности (ЦНВ) [1], превосходящих по всем техническим показателям все промышленные портландцементы мировых производителей при замене до 80 % клинкера на минеральные наполнители [2–4]. Также возможно повышение реакционной способности портландцемента при его механоактивации с минеральными наполнителями [5], однако данный способ менее эффективен.

Существует и другое направление по снижению клинкероёмкости – использование в составах бетонов наполнителей природного и техногенного происхождения. В современном строительстве бетоны нового поколения [6,7] производят с добавлением комплекса поверхностно-активных веществ (ПАВ) с минеральными наполнителями [8].

Эффективностью влияния минеральных наполнителей в цементных бетонах занимаются во многих странах [9–11], однако внимание уделяется в основном высокопрочным бетонам [12,13] и, в меньшей степени, бетонам низких классов по прочности, несмотря на их более широкое распространение.

Комплексные органоминеральные добавки (ОМД), получаемые смешением тонкомолотых минеральных пород или техногенных отходов с химическими модификаторами [14,15], позволяют упростить процесс приготовления многокомпонентных бетонных смесей, так как ПАВ вводятся совместно с минеральными наполнителями. Применение ОМД также перспективно [16], так как минеральные наполнители в комплексе с ПАВ способствуют повышению плотности и прочности цементного камня [17,18].

По мнению автора [19], процесс связывания воды является разновидностью гидратации частиц вяжущего, протекающий в две стадии. Первоначально под влиянием поверхностных сил разрываются первичные водородные связи между молекулами воды, а на второй стадии они вступают в водородную связь с кислородными и гидроксильными группами на поверхности частиц.

Авторы [2] предполагают, что полярные ПАВ, обладая на 2-3 порядка большей молекулярной массой, чем вода, в процессе теплового движения вытесняют ее молекулы из плотных адсорбционных слоев Штерна. Вытесненные молекулы воды вновь приобретают подвижность свободного объемного состояния, пластифицируя минеральную систему. В ЦНВ молекулы ПАВ посажены на поверхность портландцемента, препятствуя образованию адсорбционного слоя Штерна, сохраняя пластифицирующую способность пластификаторов в полном объеме.

Применение функционализированных наполнителей (ФНП) основано на схожем механизме пластификации, но функцию носителей химических добавок выполняют минеральные наполнители. В работе [20] подробно рассмотрено усиление пластифицирующего эффекта в различных минеральных системах при помоле сухих пластификаторов с минеральными порошками, по сравнению с введением пластифицирующих веществ с водой затворения. Важным открытием стало то, что большинство минеральных порошков, приведенных в исследовании, обладают лучшей совместимостью с пластифицирующими добавками по сравнению с цементами.

Цель исследования состоит в получении функционализированных наполнителей, обеспечивающих повышенную эффективность суперпластификаторов в бетонных смесях. Для достижения цели ставились следующие задачи:

1. Установить предельно-эффективные концентрации суперпластификаторов в цементно-водных суспензиях;
2. Определить подвижности цементно-минеральных суспензий и обоснование эффективности применения функционализированных наполнителей;
3. Исследовать распределение частиц по размерам в функционализированных наполнителях;
4. Изучить влияние функционализации наполнителей на водопотребность бетонных смесей и прочность бетона.

2. Материалы и методы

Объектом исследования были выбраны активные и инертные минеральные наполнители природного и техногенного происхождения, подготовленные из следующих сырьевых материалов:

Известняк Камаевского карьера (г. Менделеевск) фр. 5-40 мм, маркой по дробимости 400.

Известняк Гальянского карьера (г. Нижний Тагил) фр. 0-5 мм, маркой по дробимости 1200.

Известняк Тургоякского карьера (г. Миньяр) фр. 0-5 мм, маркой по дробимости 1200.

Микрокремнезем марки МК-85 (г. Челябинск).

Зола-унос Ново-Иркутской ТЭЦ (г. Иркутск).

Золошлаковая смесь (ЗШС) Усть-Илимской ТЭЦ (г. Иркутск).

Метакаолин производства ООО «Пласт-Рифей» каолиновый карьер Журавлиный лог (г. Пласт).

Содержание основных оксидов активных минеральных наполнителей (микрокремнезема, золы-уноса, ЗШС, метакаолина) представлен в таблице 1.

Таблица 1

Содержание оксидов

Вид минерального сырья	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
Микрокремнезем	97,13	0,52	0,04	0,45	0,36	0,67	0,25
Зола-уноса	56,37	15,6	7,14	13,27	2,92	0,75	0,19
ЗШС	42,57	5,50	7,71	16,98	3,26	0,36	0,23
Метакаолин	53,81	42,60	0,72	0,15	1,87	0,96	0,05

В качестве вяжущего использовали портландцемент (ПЦ) промышленного изготовления ПАО «Мордовцемент» ЦЕМ I 52,5Н ГОСТ 31108-2020. Химико-минералогический состав и физико-механические свойства портландцемента представлены в таблице 2.

Таблица 2

Свойства портландцемента

№ п/п	Наименование показателя	Ед. изм.	Регламентированные значения согласно ГОСТ 31108-2020	Значение показателя	
				по паспорту	факт
1	Удельная поверхность	см ² /г	не нормируется	нет	3700
2	Нормальная густота	%	не нормируется	27	28
3	Начало схватывания	мин	не ранее 45	160	140
4	Активность по прочности при сжатии: - через 28 суток норм. тв.	МПа	не менее 52,5	54,2	53,4
Химико-минералогический состав клинкера					
5	Содержание оксида магния MgO в клинкере	%	не более 5,0	1,3	-
6	C ₃ S	%	не нормируется	69,62	-
7	C ₂ S	%	не нормируется	7,76	-
8	C ₃ A	%	не нормируется	6,47	-
9	C ₄ AF	%	не нормируется	13,63	-

В работе использовали следующие ПАВ:

Анионоактивный суперпластификатор СП-1 (АО «ГК Полипласт»), представляющий собой порошок коричневого цвета с pH = 8 ± 1. Суперпластификатор РС-1701 (ООО «Новый Мир») на основе поликарбоксилатного сополимера. Порошок белого цвета с pH = 8,0 ± 1,0.

В работе приняты следующие способы совмещения ПАВ и минеральных наполнителей для приготовления цементно-водных суспензий (далее ЦВС):

1. Дискретное распределение – совместное перемешивание порошкообразного суперпластификатора, цемента и минерального наполнителя с последующим их затворением водой;

2. Из раствора с водой затворения – приготовление водного раствора суперпластификатора и его смешение с цементом и минеральным наполнителем;

3. Функционализация – совместное перемешивание цемента и функционализированного наполнителя, полученного путем совместного помола в вибрационно-шаровой мельнице с суперпластификатором.

В ходе эксперимента суперпластификатор наносился на поверхность наполнителей в лабораторной вибрационно-шаровой мельнице СВМ-3. Удельную поверхность порошков определяли с помощью прибора ПСХ-10А.

Исходя из опыта ряда исследователей [8,15,17], содержание минеральных наполнителей от массы цемента принимали 30 % для всех применяемых наполнителей, кроме микрокремнезема и метакеолина. Последние добавляли в количестве 10 % от массы портландцемента. Известняки, зола-уноса и ЗШС были размолоты до удельной поверхности 5200-5500 см²/г, метакеолин изначально обладал удельной поверхностью 16500 см²/г, микрокремнезем – 38500 см²/г.

Пластифицирующую способность ПАВ оценивали по распылу ЦВС из миницилиндра (h = 70 мм, ø32 мм) по методике [20].

3. Результаты и обсуждение

На первом этапе работы были определены предельные концентрации сухих суперпластификаторов СП-1 и РС-1701 в цементно-водных суспензиях, при которых достигается наибольшая подвижность цементного теста (рис. 1).

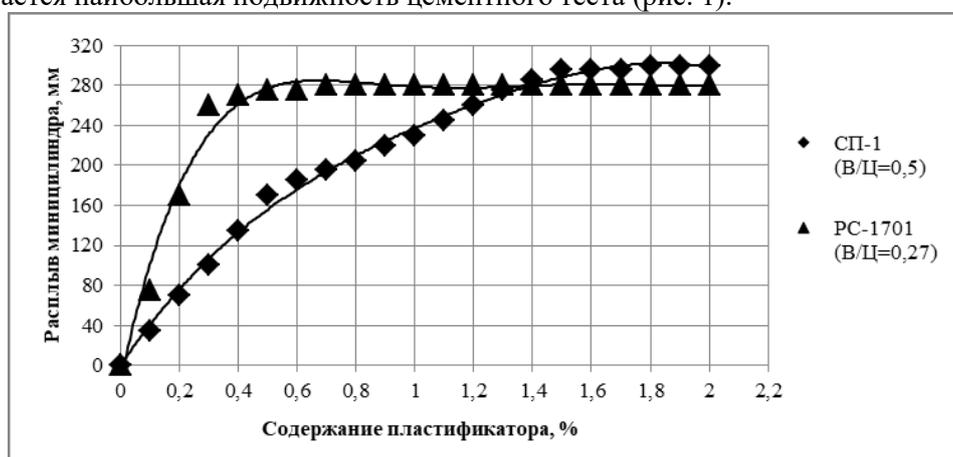


Рис. 1. Изменение подвижности цементной суспензии от концентрации ПАВ (иллюстрация авторов)

Fig. 1. Change in mobility of cement suspension depending on surfactant concentration (illustration by the authors)

Водоцементное отношение принято опытным путем, исходя из реологической чувствительности цементной суспензии с малыми концентрациями ПАВ и ее нерасслаиваемости.

Наибольшая пластификация цементно-водной суспензии с химической добавкой поликарбоксилатного типа РС-1701 обеспечивается при ее концентрации 0,8 %, с добавкой СП-1 – 1,6 % от массы портландцемента. Дальнейшее увеличение содержания ПАВ не повышает подвижность цементно-водных суспензий.

На практике содержание СП-1 ограничивается 1 % от массы портландцемента, что обуславливается его негативным влиянием на скорость схватывания цементного теста и раннюю прочность бетона. С учетом современного опыта применения для функционализации наполнителей были приняты максимальные концентрации суперпластификаторов РС-1701 – 0,8 % и СП-1 – 1 % от массы портландцемента.

Влияние способа введения суперпластификаторов на подвижность ЦВС оценено для СП-1 при В/Т = 0,5, для РС-1701 при В/Т = 0,27. Результаты приведены на рис. 2 и рис. 3, соответственно.

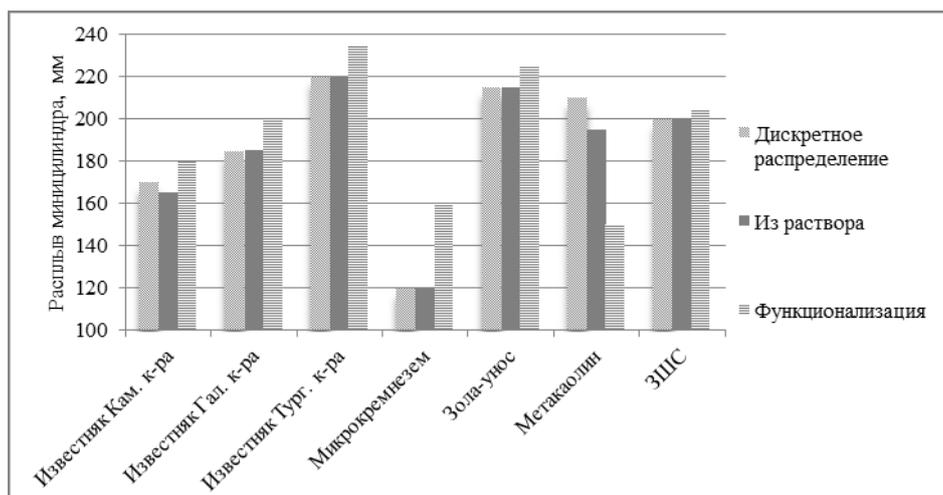


Рис. 2. Изменение подвижности ЦВС в зависимости от вида наполнителя и способа введения суперпластификатора СП-1 (иллюстрация авторов)
 Fig. 2. Change in the mobility of an aqueous cement-mineral suspension depending on the type of filler and the method of introducing superplasticizer SP-1 (illustration by the authors)

Как видно из рис. 2, функционализация наполнителей при прочих равных условиях привела к увеличению подвижности ЦВС. Исключением стала лишь ЦВС с метакаолином, у которой распыл миницилиндра снизился. В процессе помола с СП-1 частицы метакаолина налипали на мелющие тела и корпус мельницы и агрегировались, что не позволило обеспечить эффект функционализации.

При дискретном способе введения СП и наполнителя наибольшей подвижностью обладала ЦВС с известняком Тургоякского карьера (220 мм), наименьшей – с микрокремнеземом (120 мм). Несмотря на это, при функционализации микрокремнезема происходит существенный рост подвижности ЦВС (на 25 %) по сравнению с его дискретным способом введения. Функционализация известняка также привела к росту подвижности ЦВС, однако менее эффективно – на 6,4 %.

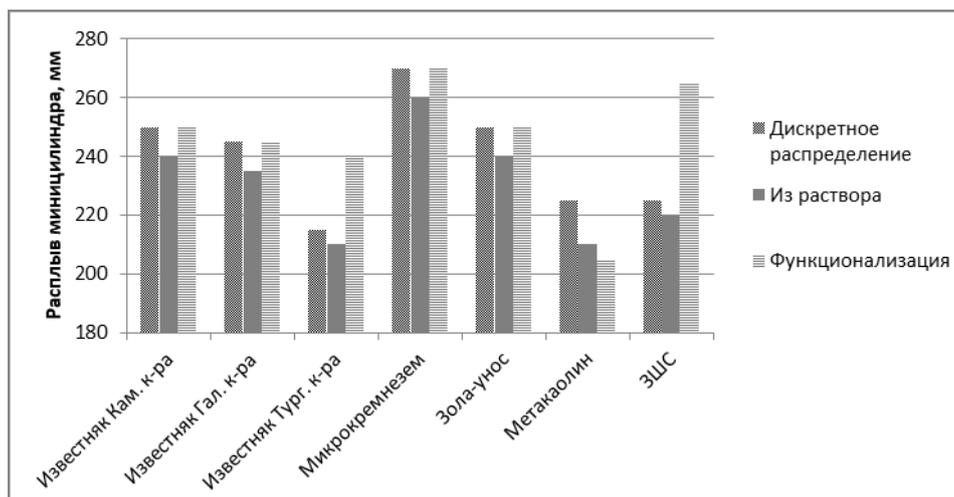
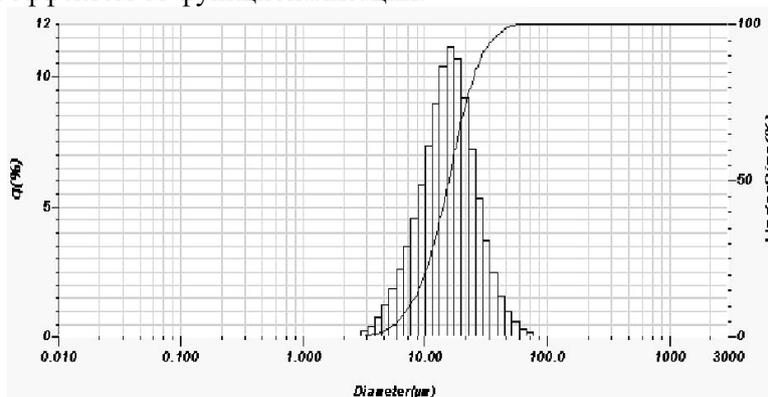


Рис. 3. Изменение подвижности ЦВС в зависимости от вида наполнителя и способа введения суперпластификатора РС-1701 (иллюстрация авторов)
 Fig. 3. Change in the mobility of an aqueous cement-mineral suspension depending on the type of filler and the method of introducing superplasticizer PC-1701 (illustration by the authors)

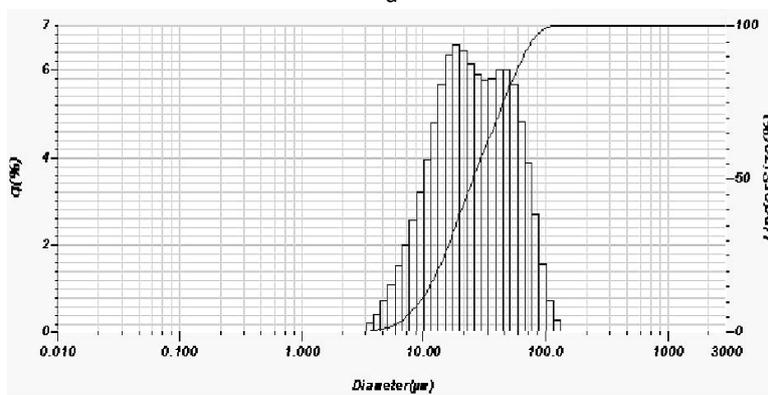
Из рис. 3 следует, что на подвижность ЦВС значительное влияние оказывает вид применяемого наполнителя. При введении поликарбоксилатного РС-1701 дискретным способом наибольшей подвижностью обладает ЦВС с микрокремнеземом (270 мм), а наименьшей – с известняком Тургоякского карьера (215 мм). Функционализация

минеральных наполнителей оказывается эффективной для ЦВС, приготовленной с использованием известняка Тургоякского карьера и ЗШС. Рост распыла миницилиндра относительно дискретного способа составил 10 и 15 %, соответственно.

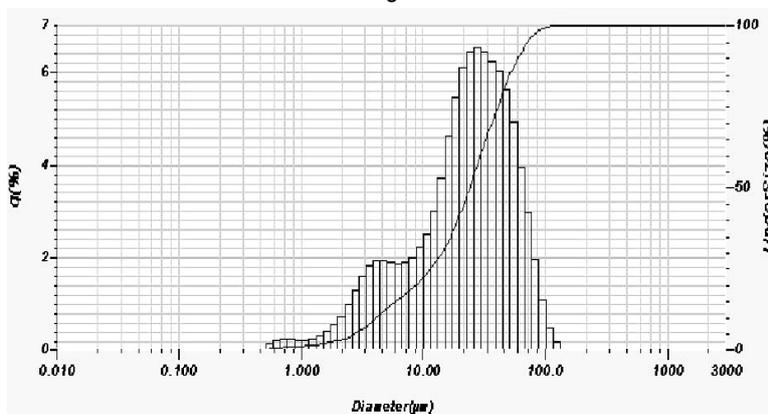
На рис. 4 приведено распределение частиц по размерам минеральных наполнителей с наибольшим эффектом от функционализации.



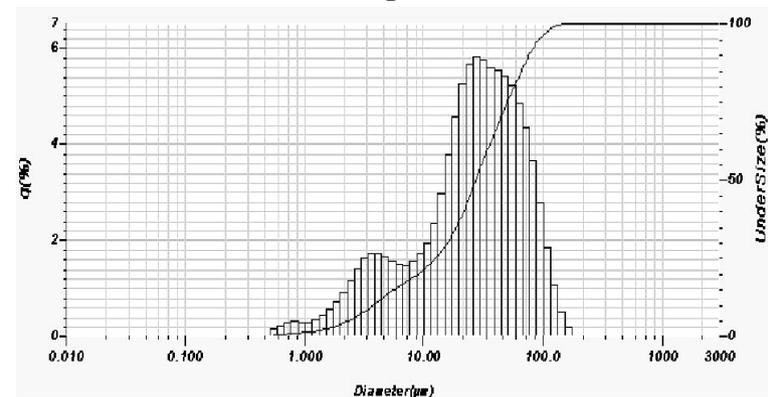
а



б



в



г

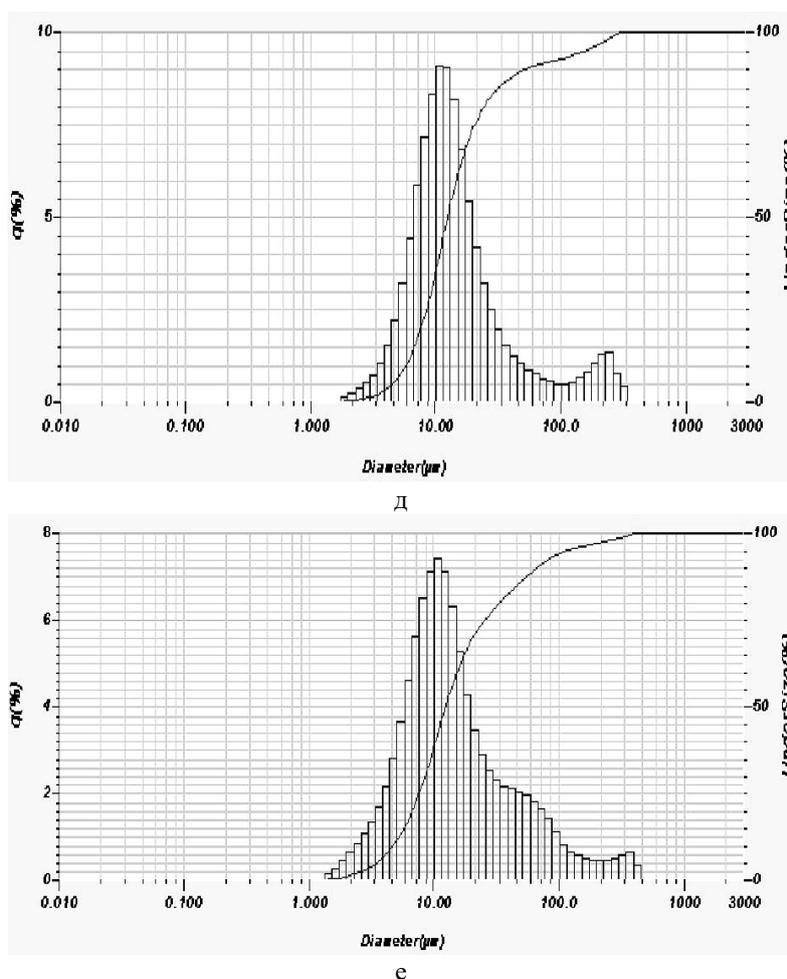


Рис. 4. Распределение частиц по размерам:

а – микрокремнезема, б – функционализированного СП-1 микрокремнезема, в – ЗШС, г – функционализированного РС-1701 ЗШС, д – известняка Тургойского карьера, е – функционализированного РС-1701 известняка (иллюстрация авторов)

Fig. 4. Particle size distribution:

a – microsilica, b – functionalized SP-1 microsilica, c – ash and slag mixture, d – functionalized PC-1701 ash and slag mixture, e – limestone from the Turgoyak quarry, f – functionalized PC-1701 limestone (illustration by the authors)

Медианный (срединный) размер частиц микрокремнезема (рис. 4а) составляет 15,7 мкм, после функционализации (рис. 4б) – 25,4 мкм. Медианный размер частиц ЗШС (рис. 4в) – 24,0 мкм, а после функционализации (рис. 4г) – 27,5 мкм. Для известняка значения данного параметра составляет (рис. 4д) 12,6 мкм, после функционализации – 12,5 мкм.

Увеличение срединного размера частиц может быть связано с агрегацией частиц минеральных наполнителей в процессе помола, либо с присутствием свободных частиц ПАВ, которые не адсорбировались на поверхность минеральных наполнителей. Также на это указывает увеличение количества частиц с размерами 10-50 мкм после функционализации минеральных наполнителей.

Эффективность функционализации минеральных наполнителей оценивали по водопотребности тяжелых бетонных смесей с подвижностью П5 (20-22 см) и прочности на сжатие контрольных образцов-кубов с размерами 100×100×100 мм на 28 суток. Результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3

Свойства тяжелых бетонных смесей и бетона с функционализированными наполнителями

№	Состав бетонной смеси						В/Ц	Плотность бетонной смеси	Прочность на сжатие
	ЦЕМ I 52,5Н	Щебень фр. 5-20	Песок М _к 2,4	МН		СП*			
	кг/м ³	кг/м ³	кг/м ³	вид	кг/м ³	кг/м ³			
1	400	1100	800	микрокремнезем	40	4	0,6	2346	35,6
2				функц. микрокр.		-	0,48	2374	44,3
3			680	ЗШС	120	3,2	0,44	2328	45
4				функц. ЗШС		-	0,4	2344	53,2
5				изв. Тург. к-ра		3,2	0,45	2320	43,5
6				функц. изв. Тург. к-ра		-	0,4	2348	47,8

* – Суперпластификатор в составах с функционализированными наполнителями содержится в минеральной добавке в том же количестве, что и в контрольных составах

Как видно из таблицы 3, водопотребность бетонных смесей с функционализированными наполнителями снижается на 20, 9 и 11 %, соответственно, для смесей №2, №4 и №6. Закономерно возрастает плотность смесей и прочность бетона. Для бетона с микрокремнеземом после функционализации она возросла на 20 %, с ЗШС – на 15 %, с известняком – на 9 %.

4. Заключение

Таким образом, на основании проведенных исследований получены следующие результаты:

1. Определены оптимальные концентрации суперпластификаторов СП-1 и РС-1701, при которых достигается наибольшая пластификация цементно-водной суспензии: СП-1 – 1 % от массы портландцемента; РС-1701 – 0,8 % от массы портландцемента.
2. Установлена зависимость подвижности ЦВС от способа введения в них суперпластификаторов. Показано, что функционализация минеральных наполнителей суперпластификатором повышает подвижность ЦВС. Наибольший прирост подвижности (25 %) при функционализации с суперпластификатором СП-1 обладает ЦВС с микрокремнеземом. При функционализации минеральных наполнителей суперпластификатором РС-1701 прирост подвижности ЦВС с известняком Тургоякского карьера составил 10 %, с золошлаковой смесью – 15 %.
3. Оценено распределение частиц по размерам минеральных наполнителей с наибольшим эффектом от функционализации. Показано, что после функционализации медианный размер частиц возрастает у всех минеральных наполнителей и увеличивается количество частиц с размерами 10-50 мкм.
4. Показано, что водопотребность бетонных смесей с функционализированными минеральными наполнителями снижается на 20 % для микрокремнезема, на 9 % для золошлаковой смеси и на 11 % для известняка Тургоякского карьера по сравнению с другими способами введения СП. Закономерно возрастает прочность на сжатие бетона, соответственно на 20, 15 и 9 %.

Список литературы/References

1. Хохряков О.В., Хозин В.Г., Харченко И.Я. и др. Цементы низкой водопотребности – путь эффективного использования клинкера и минеральных наполнителей в бетонах // Вестник МГСУ. 2017. Т. 109, № 10 Т. 12. С. 1145–1152. [Khokhryakov O.V., Khozin V.G., Kharchenko I.Ya. and others. Low water demand cements – a way to effectively use clinker and mineral fillers in concrete // Bulletin of MGSU. 2017. Vol. 109, No. 10 Vol. 12. P. 1145–1152.]
2. Хозин В.Г., Хохряков О.В., Сибгатуллин И.Р. «Карбонатные» цементы низкой водопотребности. Издательство АСВ, 2021. 366 с. [Khozin V.G., Khokhryakov O.V.,

- Sibgatullin I.R. "Carbonate" cements with low water demand. Publishing house DIA, 2021. 366 p.]
3. Хозин В.Г., Хохряков О.В., Низамов Р.К. Карбонатные цементы низкой водопотребности – перспективные вяжущие для бетонов // Бетон и железобетон. 2020. Т. 601, № 1. С. 15–28. – EDN VIDDBF. [Khozin V.G., Khokhryakov O.V., Nizamov R.K. Carbonate cements with low water demand are promising binders for concrete // Concrete and reinforced concrete. 2020. Vol. 601, No. 1. P. 15–28. – EDN VIDDBF.]
 4. Хозин В.Г., Хохряков О.В., Низамов Р.К. и др. Опыт наномодификации цементов низкой водопотребности // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 1. С. 53–57. [Khozin V.G., Khokhryakov O.V., Nizamov R.K. and others. Experience of nanomodification of cements with low water demand // Industrial and civil construction. 2018. No. 1. P. 53–57.]
 5. Морозова Н.Н., Кайс Х.А. Повышение реакционной способности цеолитсодержащих цементов механической активацией // Вестник Технологического университета. 2016. Т. Т. 19, № 14. С. 79–82. [Morozova N.N., Kays H.A. Increasing the reactivity of zeolite-containing cements by mechanical activation // Bulletin of the Technological University. 2016. T. T. 19, no. 14. pp. 79–82.]
 6. Каприелов С.С., Батраков В.Г., Шейнфельд А.В. Модифицированные бетоны нового поколения: реальность и перспектива // Бетон и железобетон. 1999. № 6. С. 6-10. – EDN ХМСВФJ. [Kaprielov S.S., Batrakov V.G., Sheinfeld A.V. New generation modified concretes: reality and prospects // Concrete and reinforced concrete. 1999. No. 6. P. 6-10. – EDN ХМСВФJ.]
 7. Калашников В.И., Тараканов О.В., Кузнецов Ю.С. и др. Бетоны нового поколения на основе сухих тонкозернисто-порошковых смесей // Инженерно-строительный журнал. 2012. Т. 34, № 8. С. 47–53. – EDN PJWLHF. [Kalashnikov V.I., Tarakanov O.V., Kuznetsov Yu.S. and others. New generation concretes based on dry fine-grained powder mixtures // Engineering and Construction Journal. 2012. Vol. 34, No. 8. P. 47–53. – EDN PJWLHF.]
 8. Калашников В.И., Москвин Р.Н., Белякова Е.А. Высокодисперсные наполнители для порошково-активированных бетонов нового поколения // Системы. Методы. Технологии. 2014. Т. 22, № 2. С. 113–118. – EDN SFPCLD. [Kalashnikov V.I., Moskvina R.N., Belyakova E.A. Highly dispersed fillers for new generation powder-activated concrete // Systems. Methods. Technologies. 2014. Vol. 22, No. 2. P. 113–118. – EDN SFPCLD.]
 9. Mayhoub O.A., Nasr E.S.A.R., Ali Y.A. The influence of ingredients on the properties of reactive powder concrete: A review // Ain Shams Eng. J. Faculty of Engineering, Ain Shams University, 2021. Vol. 12, № 1. P. 145–158.
 10. Ahmad J., Martínez-García R., De-Prado-gil J. Concrete with Partial Substitution of Waste Glass and Recycled Concrete Aggregate // Materials (Basel). 2022. Vol. 15, № 2.
 11. Ge W., Wang A., Zhang Z. Study on the workability, mechanical property and water absorption of reactive powder concrete // Case Stud. Constr. Mater. Elsevier Ltd, 2023. T. 18, № October 2022. С. e01777.
 12. Alharbi Y.R., Abadel A.A., Mayhoub O.A. Effect of using available metakaoline and nano materials on the behavior of reactive powder concrete // Constr. Build. Mater. Elsevier Ltd, 2021. T. 269, № xxxx. С. 121344.
 13. Alharbi Y.R., Abadel A.A., Salah A.A. Engineering properties of alkali activated materials reactive powder concrete // Constr. Build. Mater. Elsevier Ltd, 2021. T. 271, № xxxx. С. 121550.
 14. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Батраков В.Г. Комплексный модификатор бетона марки МБ-01 // Бетон и железобетон. 1997. № 5. С. 38–41. – EDN WLLWRB. [Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V., Batrakov V.G. Complex concrete modifier brand MB-01 // Concrete and reinforced concrete. 1997. No. 5. P. 38–41. – EDN WLLWRB.]
 15. Перцев В.Т., Леденев А.А., Халилбеков Я.З. Комплексные органоминеральные добавки для бетонов // Символ науки: международный научный журнал. 2017. № 4 Т. 2. С. 89–91 – EDN YNEJNL. [Pertsev V.T., Ledenev A.A., Khalilbekov Ya.Z.

- Complex organomineral additives for concrete // Symbol of Science: international scientific journal. 2017. No. 4 Vol. 2. P. 89–91 – EDN YNEJNL.]
16. Тараканов О.В., Акчурин Т.К., Белякова Е.А. и др. Перспективы применения комплексных органоминеральных добавок в бетонах нового поколения // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия Строительство и архитектура. 2023. Т. 91, № 2. С. 88–98. – EDN VXWGFN. [Tarakanov O.V., Akchurin T.K., Belyakova E.A. and others. Prospects for the use of complex organomineral additives in new generation concretes // Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series Construction and architecture. 2023. Vol. 91, No. 2. P. 88–98. – EDN VXWGFN.]
 17. Перцев В.Т., Леденев А.А., Ноаров В.Б. и др. Свойства цементных систем, модифицированных химическими и минеральными добавками // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения. 2017. Т. 14, № 1. С. 49–52 – EDN ZEZUQT. [Pertsev V.T., Ledenev A.A., Noarov V.B. and others. Properties of cement systems modified with chemical and mineral additives // Scientific Bulletin of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Physico-chemical problems and high technologies of building materials science. 2017. Vol. 14, no. 1. P. 49–52 – EDN ZEZUQT.]
 18. Перцев В.Т., Леденев А.А., Рудаков О.Б. Физико-химические подходы к разработке эффективных органоминеральных добавок для бетона // Конденсированные среды и межфазные границы. 2018. Т. 3, № 20. С. 432–442. [Pertsev V.T., Ledenev A.A., Rudakov O.B. Physico-chemical approaches to the development of effective organomineral additives for concrete // Condensed media and interphase boundaries. 2018. Vol. 3, No. 20. P. 432–442.]
 19. Ахвердов И.Н. Основы физики бетона. М.: Стройиздат, 1981. 464 с. [Akhverdov I.N. Fundamentals of concrete physics. M.: Stroyizdat, 1981. 464 p.]
 20. Калашников В.И., Мороз М.Н., Тараканов О.В. и др. Новые представления о механизме действия суперпластификаторов, совместно размолотых с цементом или минеральными породами // научно-технический и производственный журнал «Строительные материалы». 2014. № 9. С. 70–75. [Kalashnikov V.I., Moroz M.N., Tarakanov O.V. and others. New ideas about the mechanism of action of superplasticizers, jointly ground with cement or mineral rocks // scientific, technical and production journal “Building Materials”. 2014. No. 9. P. 70–75.]

Информация об авторах

Беляков Андрей Юрьевич, аспирант, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация.

Email: belyakoffandrey@mail.ru

Хохряков Олег Викторович, доктор технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация.

Email: olvik@list.ru

Хозин Вадим Григорьевич, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация.

Email: khozin.vadim@yandex.ru

Information about the authors

Andrey Yu. Belyakov, post-graduate student, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.

Email: belyakoffandrey@mail.ru

Oleg V. Khokhryakov, doctor of technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.

Email: olvik@list.ru

Vadim G. Khozin, doctor of technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.
Email: khozin.vadim@yandex.ru

УДК: 630.812
DOI: 10.52409/20731523_2023_3_57
EDN: FMBXRU



Расчет клеефанерных панелей покрытия, вопросы их долговечности

З.А. Камалова¹, А.И. Валиев¹

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. *Постановка задачи.* Одной из проблем широкого применения клеефанерных панелей покрытия в строительной отрасли является возможность использования типовых вариантов для разных климатических зон. Целью исследования является расчет клеефанерных панелей покрытия, изучение вопросов их долговечности. Основные задачи исследования заключаются в теплотехническом расчете с последующим подбором толщины утеплителя «теплых» клеефанерных панелей покрытия для разных климатических зон, прочностном расчете, оценке влияния теплового старения на физико-механические свойства наиболее напряженного материала панели (фанеры), влияющей на долговечность изделия.

Результаты. В работе рассмотрена типовая клеефанерная панель покрытия, выполнены расчеты, сделаны выводы о возможности ее применения для различных климатических зон, определен наиболее напряженный материал в панели, изучены изменения физических свойств, механической прочности фанеры в процессе теплового старения, выполнена оценка долговечности исходной и состаренной фанеры.

Выводы. Значимость полученных результатов в строительной отрасли заключается в определении работы типовых клеефанерных панелей покрытия для различных климатических зон, возможности дальнейшего изучения долговечности клеефанерных панелей покрытия, расширения области применения данных видов изделий.

Ключевые слова: клеефанерная панель покрытия, долговечность, тепловое старение, поперечный изгиб, прочность.

Для цитирования: Камалова З.А., Валиев А.И. Расчет клеефанерных панелей покрытия, вопросы их долговечности // Известия КГАСУ, 2023, № 3(65), с.57-65, DOI: 10.52409/20731523_2023_3_57, EDN: FMBXRU

Calculation of glue plywood covering panels, the issues of their durability

Z.A. Kamalova¹, A.I. Valiev¹

¹Kazan State University of Architecture and Engineering
Kazan, Russian Federation

Abstract. One of the problems of wide application of glue plywood covering panels in the construction industry is the possibility of using typical panels for different climatic zones. The purpose of the study is to calculate the glue plywood panels, to study the issues of their durability. The main objectives of the study are the thermal calculation with subsequent selection of the insulation thickness of "warm" glue plywood panels for different climatic zones, strength calculation, evaluation of the effect of thermal aging on the physical and mechanical properties of the most stressed material of the panel (plywood), which affects the durability of the product.

Results. A typical glue plywood covering panel was considered in the work, calculations were performed, conclusions were made about the possibility of its use for various climatic zones, the

most stressed material in the panel was determined, changes in the physical properties and mechanical strength of plywood during the process of thermal aging were studied, and the durability of the original and aged plywood was assessed.

Conclusions. The significance of the results obtained for the construction industry lies in determining the performance of typical glue plywood covering panels for various climatic zones, the possibility of further studying the durability of glue plywood covering panels, and expanding the scope of application of these types of products.

Keywords: glue covering panel, durability, thermal aging, transverse bending, strength.

For citation: Kamalova Z.A., Valiev A.I. Calculation of glue covering panels, the issues of their durability//News KSUAE, 2023, № 3(65), p.57-65, DOI: 10.52409/20731523_2023_3_57, EDN: FMBXRU

1. Введение

Клеефанерные панели покрытия являются облегченными конструкциями и состоят из каркаса и обшивок. Малая масса и высокая несущая способность панелей обеспечивается совмещением в фанерной обшивке ограждающих и несущих функций.

Выделяют «холодные» и «теплые» клеефанерные панели покрытия. Для «теплых» клеефанерных панелей в качестве теплоизоляционного слоя применяют биостойкие, негорючие материалы.

Выделяют методы прогнозирования изменения свойств композитов при старении [1-3], которые основаны на трансформации энергетических значений факторов естественного старения в лабораторные режимы испытаний [4-6], определяют срок службы материала ускоренным искусственным старением, вызывающим изменения в материале аналогичные изменениям при эксплуатации. [7-9]

Согласно ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований», долговечность – способность строительного объекта сохранять прочностные, физические и другие свойства, устанавливаемые при проектировании и обеспечивающие его нормальную эксплуатацию в течение расчетного срока службы.

Для древесных композитов резко проявляется температурно-временная зависимость прочности, предела текучести и отсутствует безопасное напряжение. [10-12] Исследование долговечности древесных композитов проводится с позиции термофлуктуационной концепции прочности и деформирования твердых тел. [13-15]

Целью исследования является расчет клеефанерных панелей покрытия, оценка влияния теплового старения на физико-механические свойства наиболее напряженного материала панели (фанеры).

Для достижения цели необходимо:

- согласно теплотехническому расчету подобрать толщину утеплителя для разных климатических зон;
- выявить наиболее напряженный элемент панели;
- произвести оценку влияния теплового старения на физико-механические свойства,
- выполнить оценку долговечности.

2. Материалы и методы

Для расчета рассмотрена типовая клеефанерная панель покрытия согласно типовой серии ПКД-01-04 со следующими исходными данными:

- размеры плиты в плане – $l_n \times b_n = 6000 \times 1500$ мм;
- обшивки из фанеры по ГОСТ 3916.1. Расчётный модуль упругости фанеры $E_f = 0,9 \times 10^4$ МПа;
- продольные и поперечные ребра по ГОСТ 8486. Модуль упругости древесины $E_d = 1 \times 10^4$ МПа (сосна);
- клей, обеспечивающий высокую водостойкость соединений (карбамидный). Соотношение компонентов и условия отверждения клея определяют согласно техническим данным;

- утеплитель – минераловатные плиты по со значением теплопроводности 0,052 Вт/(м°С). Толщина плиты определена согласно теплотехнического расчёта см. таблицу 1);
- пароизоляция;
- кровля рулонная по СП 17.13330.

Каркас клеефанерной панели покрытия состоит из 4-х продольных рёбер 194×46 мм и 5-ти поперечных рёбер 169×46 мм, обшивки из фанеры $t=10,0$ мм(верхняя), $t=6,0$ мм (нижняя).

Поперечное сечение панели покрытия представлено на рис. 1.

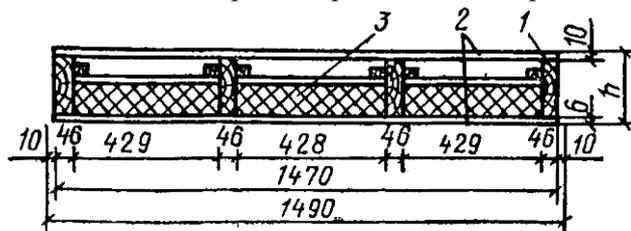


Рис. 1: Поперечное сечение клеефанерной панели покрытия (типовая серия ПКД-01-04)

1—продольные ребра, 2— фанерные обшивки, 3— утеплитель.

Fig. 1: Cross-section of the glue-phenol coating panel. (standard series PKD-01-04)

1—longitudinal ribs, 2— plywood sheathing, 3— thermal insulation.

Тепловое старение наиболее напряженного материала панели (фанеры) производилось при температурах 40°С, 60°С, для оценки влияния старения на физико-механические свойства фанеры были проведены кратковременные и длительные испытания на поперечный изгиб. Образцы (200×50×3мм) подвергали тепловому старению, помещали на опоры с пролетом в 100мм и доводили до разрушения с фиксацией максимальной разрушающей нагрузки при кратковременных испытаниях, с подсчетом времени разрушения с заданным напряжением (0,7-0,9) $\sigma_{раз}$ при длительном испытании на поперечный изгиб. Тепловое старение в лабораторной печи при температурах 40°С, 60°С, испытания на поперечный изгиб представлены на рис. 2.



Рис. 2: Тепловое старение в лабораторной печи при температурах 40°С, 60°С, испытания на поперечный изгиб (иллюстрация авторов)

Fig. 2: Thermal aging in laboratory oven at temperatures of 40°С, 60°С, transverse bending tests (illustration by the authors)

Исследование долговечности проводилось с позиции термофлуктуационной концепции прочности и деформирования твердых тел. Связь времени (t) напряжения (σ) и температуры (T) описывается уравнением (1).

$$\lg(t) = \lg(t_m) + (U_0 - \gamma \cdot \sigma) / (2,3 \cdot R \cdot T) \cdot (1 - T/T_m) \quad (1)$$

где, t_m -период колебания кинетических единиц, с;

U_0 -эффективная энергия активации, кДж/моль;

γ -структурно-механическая константа, кДж/(МПа·моль);

σ -напряжение в материале, МПа;
 R -универсальная газовая постоянная, кДж/(моль·К);
 t -время до разрушения (долговечность), с.

Вычисление термофлуктуационных констант выполняли графоаналитическим методом путем построения зависимости $(\lg(t)-\sigma)$ по данным длительных испытаний на поперечный изгиб, с последующим перестроением в $(\lg(t)-10^3/T)$. В точках пересечений прямых определяли константы t_m и T_m , по тангенсу угла наклона прямых по формуле $U=4,2 \cdot 4,6 \cdot \Delta \lg(t)/(\Delta 10^3/T)$ рассчитали U при напряжениях σ с последующим построением зависимости $(U-\sigma)$. U_0 определяли экстраполяцией на $\sigma=0$, значение γ определяли по тангенсу угла наклона прямой.

3. Результаты

Для разных климатических зон согласно СП 50.13330 и, исходя из экономических соображений, были выполнены теплотехнические расчеты в части определения оптимальных толщин утеплителя для клефанерных панелей покрытия. Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1

Толщины слоя утеплителя для клефанерных панелей покрытия

Температурный район	I (г. Краснодар)	II (г. Астрахань)	III (г. Казань)	IV (г. Барнаул)	V (г. Владивосток)	VI (г. Благовещенск)	VII (г. Якутск)	VIII (г. Томпо)
$t_{от}$ – средняя температура наружного воздуха,	2.5	-0.8	-4.8	-7.5	-4.3	-10.7	-20.9	-23.3
$Z_{от}$ – продолжительность, сут, отопительного периода	145	164	208	213	198	210	252	269
ГСОП, °С·сут	2537.5	3411.2	5158.4	5857.5	4811.4	6447.0	10306.8	11647.7
Требуемое сопротивление теплопередаче $R_{отр}$	0,95	1,28	1,93	2,2	1,8	2,42	3,87	4,37
Условное сопротивление теплопередаче $R_0^{усл}$ С	1,15	1,53	2,11	2,5	2,11	3,08	4,23	5,0
Приведенное сопротивление теплопередаче $R_{0пр}$, (м ² °С/Вт)	1,06	1,41	1,95	2,3	1,95	2,83	3,89	4,6
Толщина утеплителя, мм	50	70	100	120	100	150	210	250

По теплотехническому расчету для типовой клефанерной панели серии ПКД-01-04 можно сделать вывод о невозможности применения на VII и VIII климатическом районе.

Типовую панель серии ПКД-01-04 возможно использовать в климатических районах: I-VI. Наиболее рациональным применение типовой панели ПКД-01-04 выявлено для IV и V климатических районов.

Данные таблицы 1 является рекомендательной частью по проектированию конструкций из клефанерных панелей.

Также были выполнены прочностные расчеты клефанерных панелей покрытия. За счет увеличения толщины утеплителя, снеговых, ветровых нагрузок целесообразно менять поперечные сечения. Расчеты в каждом случае индивидуальны, конструктивные

элементы отличны от типовой панели и не поддаются сравнению для разных температурных районов.

Для всех рассчитанных клефанерных панелей покрытия за счет различных значений модуля упругости конструктивных элементов, можно выделить наиболее напряженный материал изделия (верхней фанеры), которая располагается в зоне максимальных нормальных напряжений, возникающих при изгибе панели. В общем случае распределение нормальных напряжений при изгибе по поперечному сечению и по ширине клефанерной панели представлено на рисунке 3.

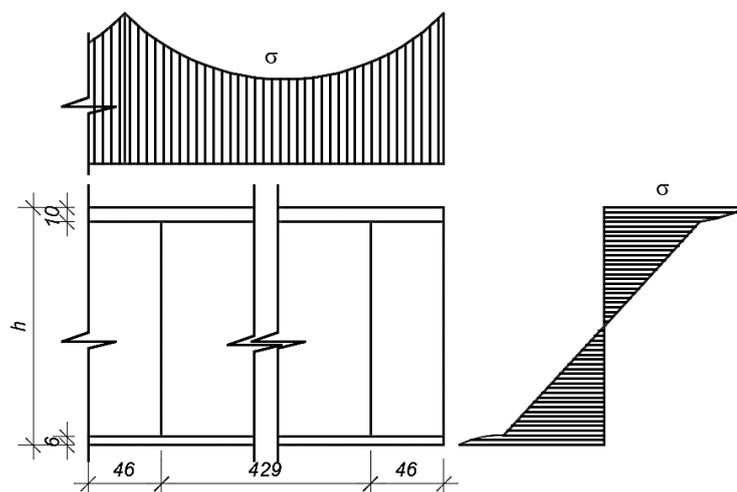


Рис. 3: Распределение нормальных напряжений при изгибе по поперечному сечению, по ширине панели (иллюстрация авторов)

Fig. 3: Distribution of normal stresses during bending along the cross section, along the width of the panel (illustration by the authors)

В качестве сравнительного расчета для климатических районов I-VI приведены результаты преимущественно прочностного расчета на устойчивость сжатой верхней обшивки с учетом коэффициента приведения ($n = E_d/E_f = 1,11$) для панели с оптимальной высотой по экономическим соображениям ($h = 210$ мм) приведен в таблице 2. Для климатического района VI условие прочности на устойчивость не выполняется ($R_{ф.с} = 12$ МПа).

Таблица 2

Сравнительный прочностной расчет на устойчивость сжатой верхней обшивки

Температурный район	I (г. Краснояр)	II (г. Астрахань)	III (г. Казань)	IV (г. Барнаул)	V (г. Владивосток)
$M/(\varphi * W)$, МПа	6,07	7,09	9,13	11,01	11,72

В процессе эксплуатации клефанерные панели покрытия находятся под действием кратковременных, длительных нагрузок, других внешних факторов (температур, УФ-облучений, агрессивных сред и т.д.).

В данной статье рассмотрены вопросы изменения долговечности клефанерных панелей покрытия. Выявлен наиболее напряженный материал (фанера), неблагоприятный фактор (длительное тепловое старение), который влияет на долговечность как отдельного элемента изделия, так и целого. С этой целью для испытаний использовалась трехслойная фанера (ФК IV/IV). Ранее изготовленные образцы (200x50x3 мм) подвергали искусственному старению при температуре 40°C (согласно СП 131.13330 абсолютная максимальная положительная температура воздуха для всех климатических районов

составляет 37-42 °С) и 60°С (более жесточенные условия эксплуатации с увеличением температуры на 20°С для сравнения) в течение заданного времени. Влияние искусственного изотермического термостарения определялась по изменению физико-механических свойств материала (рис. 4, 5).

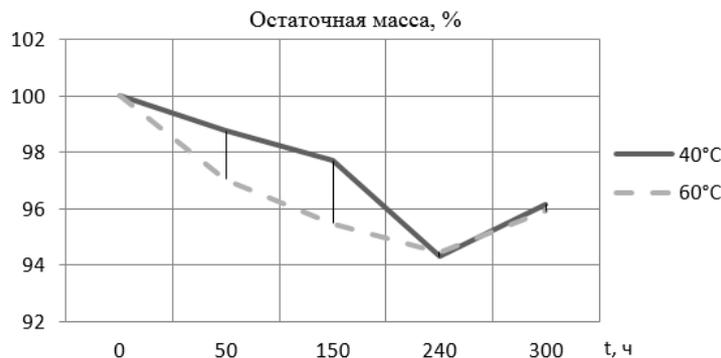


Рис. 4: Влияние теплового старения на физические свойства фанеры (иллюстрация авторов)
Fig. 4: Effect of thermal aging on the physical properties of plywood (illustration by the authors)

Согласно результатам влияния теплового старения на физические свойства фанеры можно проследить потери массы образцов и для 50 часов искусственного изотермического термостарения при 40°С потери составили 1,24%, а при 60 °С – 2,96 %, что связано с испарением влаги из древесного шпона. Для 120 часов термостарения при 40°С потери составили 2,3%, а при 60 °С – 4,52 %.

Изменение механических свойств образцов в процессе искусственного изотермического термостарения представлено на рис. 4.



Рис. 5: Влияние термостарения на механические свойства фанеры (иллюстрация авторов)
Fig. 5: Effect of thermal aging on mechanical properties of plywood (illustration by the authors)

Согласно результатам влияния теплового старения на механические свойства фанеры для 50 часов при 40°С наблюдается увеличение прочности фанеры на 14,8%, а при 60°С на 19,2%. Далее для температуры эксплуатации 40°С наблюдается уменьшение прочности, для температуры эксплуатации 60°С процессы термостарения неоднозначно сказываются на изменении прочности и требуют проведение дополнительных исследований.

Исследование долговечности фанеры в данной работе проводилось с позиции термофлуктуационной концепции прочности и деформирования твердых тел. Исходную фанеру и состаренную предварительно при 40°С, помещали на опоры испытательной машины, испытание проводилось при 20°С, задавалось напряжение $(0,7-0,9)\sigma_{раз}$ по результатам кратковременных испытаний, с помощью секундомера высчитывалось время от нагружения до разрушения образца, в зависимости от времени теплового старения (0 ч. ; 150 ч.) получены по 5 точек, соответствующих 5 испытаниям. На рис.6 приведены результаты длительных испытаний на поперечный изгиб.

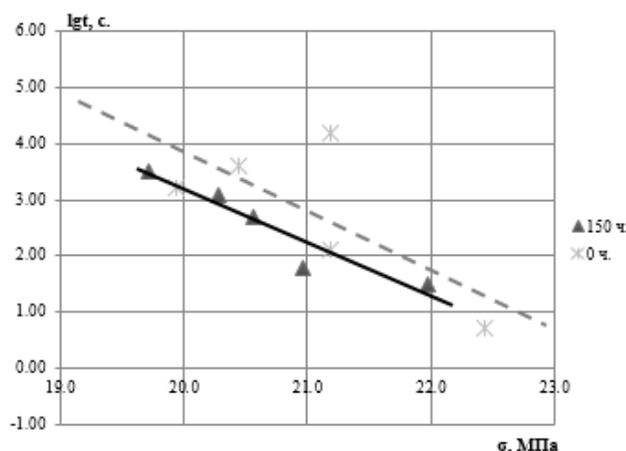


Рис. 6: Результаты длительных испытаний фанеры на поперечный изгиб (иллюстрация авторов)

Figure 6: Results of long-term transverse bending tests on plywood (illustration by the authors)

Графоаналитическим методом рассчитаны значения термофлуктуационных констант, результаты приведены в таблице 3.

Таблица 3

Значения термофлуктуационных констант

Время, ч	t_m , с.	T_m , К	U_0 , кДж/моль	γ , кДж/(моль*МПа)
0	$10^{5,1}$	207	-98	-1,2
150	$10^{1,9}$	360	618	5,2

По таблице 3 видно, что после 150 часов теплового старения при температуре 40°C снижается значение константы t_m , увеличивается значения константы T_m , U_0 , γ .

По результатам подсчета долговечности ($\lg(t)$) по значениям термофлуктуационных констант при заданном напряжении $\sigma=21$ МПа исходной ($\lg(t)=5,52$) и подверженной старению фанеры ($\lg(t)=1,91$) можно проследить снижение долговечности.

Таким образом, проведенные нами испытания показали, что, используя результаты влияния термостарения на механические свойства, можно прогнозировать и привести данные по долговечности для различных температур и продолжительности с использованием графоаналитического метода.

4. Обсуждения

Типовая клефанерная панель серии ПКД-01-04 не предусматривает возможность использования во всех климатических зонах. Перед применением необходим целостный расчет конструкции. Данные статьи являются рекомендательной частью по проектированию конструкций из клефанерных панелей.

Тепловое старение, вызывающее изменения физико-механических свойств фанеры, оказывает влияние на работоспособность панели при эксплуатации, что необходимо учитывать при проектировании конструкций из клефанерных панелей покрытия. Результаты исследований сопоставимы с результатами, приведенными в [1-3, 12, 15], так при тепловом старении при 60°C потери массы образцов из фанеры составили 3,5%, а при 80°C — 4,8%. Результаты влияния термостарения на механические свойства является исходными данными для прогнозирования долговечности для различных температур и продолжительности с использованием графоаналитического метода [4].

5. Заключение

На основании результатов исследования можно сделать следующие выводы:

1. Типовую панель серии ПКД-01-04 возможно использовать только в климатических районах: I-VI. Наиболее рациональным применение типовой панели выявлено для IV и V климатических районов с учетом подобранной толщины утеплителя.

2. Прочностной расчет клефанерных панелей покрытия выявил наиболее напряженный, «слабый» материал изделия (фанера), которая располагается в зоне максимальных нормальных напряжений, возникающих при изгибе панели, влияет на долговечность как отдельного элемента изделия, так и целого. Представлены результаты влияния теплового старения на физико-механические свойства фанеры при кратковременных и длительных испытаниях на поперечный изгиб.

Список библиографических ссылок/ References

1. Ярцев, В.П., Киселева О.А. Физико-механические испытания строительных композитных материалов: Методические указания к лабораторным работам / В.П. Ярцев, О.А. Киселева. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2003. – 24 с. [Yartsev V.P., Kiseleva O.A. Physico-mechanical tests of building composite materials: Methodical instructions for laboratory works / V.P. Yartsev, O.A. Kiseleva. - Tambov: TSTU, 2003. - 24 p.]
2. Дружинина, В.Н. Термическое и световое старение древесноволокнистых плит / В.Н. Дружинина, С.А. Мамонтов, О.А. Киселева // Журнал Academia «Архитектура и строительство». - № 1, 2014. - С. 94-97. [Druzhinina V.N. Thermal and light aging of wood-fiber boards / V.N. Druzhinina, S.A. Mamontov, O.A. Kiseleva // Academia Journal "Architecture and Construction". - № 1, 2014. - P. 94-97.]
3. Мамонтов, С.А. Методика прогнозирования долговечности материалов, эксплуатируемых в условиях естественного климатического старения / С.А. Мамонтов, О.А. Киселева // Современные тенденции развития науки и технологий: Сб. материалов 4 – ой Международ. науч.-практ. конф. - Белгород, 2015. - Часть IV- С. 124-128. [Mamontov S.A. Method of prognostication of durability of materials operated in conditions of natural climatic aging / S.A. Mamontov, O.A. Kiseleva // Modern trends in science and technology: Proceedings of the 4th International Scientific-Practical Conference -Belgorod, 2015 - Part IV - P. 124-128.]
4. Мамонтов, С.А. Новый графоаналитический метод прогнозирования долговечности состаренных древесных композитов / С.А. Мамонтов, О.А. Киселева // Современные тенденции развития науки и технологий: Сб. материалов 4 – ой Международ. науч.-практ. конф.- Белгород, 2015.- Часть IV- С. 128-132. [Mamontov S.A. New graph-analytical method of forecasting the durability of aged wood composites / S.A. Mamontov, O.A. Kiseleva // Modern trends in science and technology: Proceedings of the 4th International Scientific-Practical Conference - Belgorod, 2015 - Part IV - P. 128-132.]
5. Сулейманов, А.М. Актуальные задачи в прогнозировании долговечности полимерных строительных материалов // А.М. Сулейманов /Строительные материалы, № 5. – 2015. – С.10-13. [Suleymanov A.M. Actual problems in predicting the durability of polymeric building materials // A.M. Suleymanov / Building Materials, № 5. - 2015. - P.10-13.]
6. Bulgakov A.G., Mamontov S., Mamontov A., Rapatsky Yu.L. Characteristics of aging of wood-fiberboard from the position of IR spectroscopy. Journal of Applied Engineering Science. - 2020. - Vol. 18. № 4. - P. 624-630
7. Chen, Wenbo & He, Hui & Zhu, Hongxiang & Cheng, Meixiao & Li, Yunhua & Wang, Shuangfei. (2018). Thermo-Responsive Cellulose-Based Material with Switchable Wettability for Controllable Oil/Water Separation. Polymers. DOI:10. 592. 10.3390/polym10060592.
8. Zhang, Hui & Xu, Yaoguang & Li, Yuqi & Lu, Zexiang & Cao, Shilin & Fan, Mizi & Huang, Liulian & Chen, Lihui. (2017). Facile Cellulose Dissolution and Characterization in the Newly Synthesized 1,3-Diallyl-2-ethylimidazolium Acetate Ionic Liquid. Polymers. 9. 526. 10.3390/polym9100526.
9. Voronych, Oleksandra & Kurta, Sergiy & Starchevskyy, Volodymyr & Fedorchenko, Sofiya. (2016). Technology of Recycling, Properties and Use of Polyvinylchloride-Coated Paper Waste. Chemistry and Chemical Technology. 10. 10.23939/chcht10.02.219.
10. Ghavidel, Amir & Scheglov, Anna & Karius, Volker & Mai, Carsten & Tarmian, Asghar & Viöl, Wolfgang & Vasilache, Viorica & Sandu, Ion. (2020). Indepth studies on the

- modifying effects of natural ageing on the chemical structure of European spruce (*Picea abies*) and silver fir (*Abies alba*) woods. *Journal of Wood Science*. 66.
11. Gu, Y.; Bian, H.; Wei, L.; Wang, R. Enhancement of Hydrotropic Fractionation of Poplar Wood Using Autohydrolysis and Disk Refining Pretreatment: Morphology and Overall Chemical Characterization. *Polymers* 2019, 11, 685.
 12. Мамонтов, С.А. Учёт факторов старения и длительного механического воздействия при прогнозировании долговечности древесных композитов / С.А. Мамонтов, А.А. Мамонтов, О.А. Киселева // БСТ: Бюллетень строительной техники,- 2021, - № 9 (1045) - С. 38-41. [Mamontov S.A., Mamontov A.A., Kiseleva O.A. Taking into account the factors of aging and long-term mechanical action when forecasting the durability of wood composites / S.A. Mamontov, A.A. Mamontov, O.A. Kiseleva // BST: Bulletin of Construction Engineering,- 2021, - № 9 (1045) - P. 38-41.]
 13. Абдрахманова, Л.А. Эффективность углеродных наноструктур в составе древесно-полимерных композитов на основе поливинилхлорида / Л.А. Абдрахманова, Р.Р. Галеев, А.Г. Хантимиров, В.Г. Хозин// Нанотехнологии в строительстве: научный интернет- журнал. - 2021. - Т. 13, № 3. - С. 150-157. [Abdrakhmanova L.A. Effectiveness of carbon nanostructures in the composition of wood-polymer composites based on polyvinyl chloride / L.A. Abdrakhmanova, R.R. Galeev, A.G. Khantimirov, V.G. Khozin // Nanotechnology in construction: scientific online journal. - Vol. 13, № 3. - P. 150-157.]
 14. Saldaev V.A., Storodubtseva T.N., Safin R.G. Wood-filled polyurethane foam and modeling properties of the heat-insulating material obtained from IT. В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. electronic edition. Vladivostok, 2018.- С. 042044.
 15. Мамонтов С.А., Киселева О.А. Тепловое и световое старение фанеры строительного назначения // Вестник гражданских инженеров. - 2014. - № 5(46). - С. 85 - 89. [Mamontov S.A. Thermal and light aging of plywood for construction purposes // Bulletin of Civil Engineers. - 2014. - № 5(46). - P. 85 - 89.]

Информация об авторах

Камалова Загиря Абдулловна, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г.Казань, Российская Федерация

E-mail: zagira_kamalova@mail.ru

Валиев Алмаз Илсурович, аспирант, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г.Казань, Российская Федерация

E-mail: almazon050@mail.ru

Information about the authors

Zagira A. Kamalova, candidate of technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: zagira_kamalova@mail.ru

Almaz I. Valiev, post-graduate student, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: almazon050@mail.ru

УДК: 691.168
DOI: 10.52409/20731523_2023_3_66
EDN: DXTELC



Исследование свойств мелкозернистых асфальтобетонов запроектированных разными методами

Д.С. Смирнов¹, К.Р. Белаева¹, О.В. Хохряков¹

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. Дорожная одежда предназначена для равномерного распределения давления на грунт от подвижных нагрузок. Наибольшее давление возникает в верхних слоях покрытия и уменьшается по мере увеличения глубины перераспределения. Очевидно, что наиболее интенсивное воздействие как от подвижного состава, так и атмосферных факторов испытывают верхние слои конструкции дорожной одежды. Поэтому для повышения сроков эксплуатации автомобильной дороги, прежде всего, необходимо обеспечить ее качественным материалом покрытия. Целью данного исследования является сравнительный анализ устойчивости асфальтобетонов, подобранных разными методами, к образованию колеи пластичности. Задачами исследования являются: подбор состава методами предельных кривых плотных смесей, объемными методами проектирования, а также проведение оценки физико-механических свойств асфальтобетонных смесей, подобранных различными методами и оценки склонности подобранных составов к образованию колеи пластичности.

Результаты. В работе представлены результаты сравнительных испытаний асфальтобетонов, подобранных объемными методами проектирования (SP-16, А16ВН) и методом предельных кривых (тип Б Марки I), а также результаты испытаний образцов асфальтобетонов на образование колеи пластичности. Сравнительные испытания физико-механических свойств асфальтобетонов SP-16, А16ВН и тип Б Марки I показали, что коэффициент водостойкости для асфальтобетонов SP-16 и А16ВН соответствует требованиям нормативным параметров и составляет для SP-16(0,96%), для А16ВН (0,93%). Для асфальтобетона Тип Б марки I коэффициент водостойкости составляет (0,79%). Результаты испытаний на образование колеи пластичности показали, для асфальтобетонов SP-16 и А16ВН колея соответствует требованиям нормативных документов и составляет 2,29 мм и 5,74 мм соответственно, а для асфальтобетона Тип Б марки I составляет 12,22 мм. Коэффициент водостойкости и стойкость к колееобразованию асфальтобетона Тип Б марки I значительно уступает асфальтобетонам SP-16 и А16ВН.

Выводы. Результаты проведенного исследования позволят сделать выводы о наиболее эффективных методах подбора асфальтобетонов с точки зрения устойчивости к образованию колеи пластичности. Полученные данные могут быть использованы при строительстве и эксплуатации дорожного покрытия для повышения его долговечности и устойчивости.

Ключевые слова: дорожная одежда, асфальтобетон, зерновой состав, морозостойкость, водостойкость, колееобразование.

Для цитирования: Смирнов Д.С., Белаева К.Р., Хохряков О.В. Исследование свойств мелкозернистых асфальтобетонов запроектированных разными методами // Известия КГАСУ, 2023, № 3(65), с. 66-76, DOI: 10.52409/20731523_2023_3_66, EDN: DXTELC

Investigation of the properties of fine-grained asphalt concrete designed by different methods

D.S. Smirnov¹, K.R. Belyaeva¹, O.V. Khokhryakov¹

¹Kazan State University of Architecture and Engineering
Kazan, Russian Federation

Abstract. The road structural layers consist of the underlying layer, the base and the coating layers. It perceives pressures from mobile loads and distributes them along the roadbed. Since the greatest pressure occurs on the surface and decreases in depth, the road needs durable structural layers, which in turn require the use of high-quality materials compacted to a high density. The aim of the work is a comparative analysis of the stability of asphalt concrete, selected by different methods, to the formation of plasticity rutting. The objectives of the study are the selection of composition by methods of limit curves of dense mixtures, volumetric design methods, as well as evaluation of the physical and mechanical properties of asphalt concrete mixtures selected by various methods and evaluation of the propensity of selected compositions to form plasticity rutting.

Results. The paper presents the results of comparative tests of asphalt concrete selected by volumetric design methods (SP-16, A16BH) and the method of limit curves (type B Grade I), as well as the results of testing samples of asphalt concrete for the formation of plasticity rutting. Comparative tests of the physical and mechanical properties of asphalt concrete SP-16, A16BH and type B Grade I showed that the coefficient of water resistance for asphalt concrete SP-16 and A16BH meets the requirements of regulatory parameters and is (0.96%) for SP-16, (0.93%) for A16BH. For asphalt concrete Type B grade I, the coefficient of water resistance is (0.79%). The results of tests for the formation of plasticity rutting showed that for asphalt concrete SP-16 and A16BH, the rutting meets the requirements of regulatory documents and is 2.29 mm and 5.74 mm, respectively, and for asphalt concrete Type B grade I is 12.22 mm. The coefficient of water resistance and resistance to rutting of asphalt concrete Type B grade I is significantly inferior to asphalt concrete SP-16 and A16BH.

Conclusions. The results of the study will allow us to draw conclusions about the most effective methods of selecting asphalt concrete from the point of view of resistance to the formation of plasticity rutting. The data obtained can be used in the construction and operation of the road surface to increase its durability and stability.

Keywords: road structural layers, asphalt concrete, grain composition, frost resistance, water resistance, rutting.

For citation: Smirnov D.S., Belyaeva K.R., Khokhryakov O.V. Investigation of the properties of fine-grained asphalt concrete designed by different methods // News KSUAE, 2023, № 3(65), p. 66-76, DOI: 10.52409/20731523_2023_3_66, EDN: DXTELC

1. Введение

Дорожная одежда – это конструктивный элемент дороги, который воспринимает на себя нагрузки от транспортного средства и передает эти напряжения в земляное полотно. Дороги с твердым покрытием имеют асфальтобетонную или цементобетонную поверхность, обладающее соответствующей устойчивостью к скольжению, истиранию, непроницаемостью и долговечностью в сочетании с несущими характеристиками.

Асфальтобетон – это материал, который получают после уплотнения асфальтобетонной смеси, приготовленной в смесителях в нагретом состоянии щебня или гравия, песка, минерального порошка и битума в рационально подобранных соотношениях. [1-3].

В процессе подбора и оптимизации состава асфальтобетонной смеси регулируются: вид применяемых материалов, фракционный состав щебня и песка, наибольшая крупность заполнителя, содержание битума и минерального порошка и других параметров, включая применение различных химических модификаторов и

стабилизирующих добавок. Поэтому составы асфальтобетонных смесей весьма разнообразны и отличаются структурными характеристиками и эксплуатационными свойствами после их укладки в покрытие [4]. Основные механические характеристики воспринимаются твердым каркасом основную функцию, в котором играет щебень, формирующий так называемый каменный скелет.

На сегодняшний день в России асфальтобетон, по ряду причин, является наиболее распространенным видом твердого покрытия. Однако долговечность его значительно уступает покрытию из цементобетона, особенно по таким показателям как образование колеи износа и пластичности. [5-7]. В связи с этим основной задачей при проектировании асфальтобетона является создание структуры, которая обеспечивала бы эксплуатационно-технические характеристики покрытия с учетом воздействия на него атмосферных факторов в определенных дорожно-климатических условиях.

Разработка технических требований к дорожно-строительным материалам является не только материаловедческой, но и экономической задачей. Проектирование асфальтобетонных смесей состоит из трех этапов: определение свойств материала, установление соответствия требованиям и установление рациональных соотношений компонентов для получения требуемых свойств.

Гранулометрический состав асфальтобетонных смесей определяет содержание пор в минеральной части асфальтобетона, что, в свою очередь, определяет количество асфальта в смеси и взаимосвязано с остаточной пористостью. Оптимальная остаточная пористость зависит от вязкости вяжущего и совокупности таких эксплуатационных факторов, как транспорт, атмосфера и климат. Например, маловязкий разжиженный битум требует высокой пористости в асфальтобетоне для обеспечения быстрого испарения легких фракций из битума, что повышает его устойчивость к воздействию эксплуатационных факторов.

Комплекс эксплуатационных факторов также влияет на выбор марки битума. В холодном климате следует использовать битум с меньшей вязкостью, чем в жарком климате. Интенсивное движение транспортных средств диктует необходимость использования высоковязкого битума. Образование колеи пластичности является одной из проблем, возникающих при использовании асфальтобетона. [8-10].

Сегодня известно множество различных методик проектирования асфальтобетона, но большой интерес представляют методы, наиболее точно характеризующие физико-механические свойства и эксплуатационные характеристики асфальтобетона – модуль упругости (жесткость) при различных температурах, устойчивость к образованию колеи, чувствительность к влаге (водостойкость), прочность и долговечность асфальтобетона, трещиностойкость.

Экспериментальный, метод кривых и американский метод стандартных смесей – три основных метода подбора плотных смесей. Впервые они были сформулированы в первой половине 20 века и дальнейшем получили широкое распространение [11].

Первый способ заключается в заполнении пор зернами разного размера. Данный способ управления структурой асфальтобетона предполагает проведение оптимизации состава с учетом возможности регулирования технических и экономических показателей. Варьируются параметры раздвижки зерен щебня, гравия и песка, а также концентрация минерального порошка в вяжущем. Содержание компонентов в смеси определялось на основе предварительных значений плотности материала. Окончательный состав определялся экспериментальным путем. Оптимальным считался состав с минимальной пористостью.

Второй метод подбора зернового состава асфальтобетона основан на подборе плотных минеральных смесей, зерновой состав которых приближается к идеальным кривым Фуллера, Графа, Хермана, Боломея, Тэлбота-Ричарда, Китт-Пейфа и других исследователей. Так как по мере повышения плотности упаковки возрастает удельная поверхность заполнителя, идеальная кривая подбирается из условия, чтобы количество пустот в смеси и удельная поверхность требовали минимального расхода вяжущего при обеспечении заданных технических и технологических свойств. Эти кривые представляют собой степенные зависимости, которые отражают требуемое содержание зерна в различных фракциях. В большинстве случаев эти кривые представлены

степенными зависимостями требуемого содержания зерен в смеси от их размера. Этот метод нашел широкое применение в отечественной практике подбора состава асфальтобетонных смесей. В основу данного метода положена теория, предложенная профессором В.В. Охотиным, о том, что наиболее плотную смесь можно получить только при условии, если размер зерен заполнителя, составляющих материал, будет уменьшаться пропорционально. Позже было уточнено соотношение размеров частиц смежных фракций, исключающее раздвижку крупных зерен в многофракционной минеральной смеси. По данным П.И. Боженова, для того чтобы исключить проскальзывание крупных зерен через мелкие зерна, отношение диаметра мелкой фракции к диаметру крупной фракции не должно быть более 0,225 (т.е. как 1:4,44). Существенный вклад в обоснование расчетов при определении оптимальных составов асфальтобетонных смесей внес профессор Н.Н. Иванов, который предложил использовать для подбора смесей кривые гранулометрического состава с коэффициентом сбега в пределах от 0,65 до 0,90 [12-14].

Цель исследования заключается в проведении сравнительного анализа устойчивости асфальтобетонов, приготовленных на одних и тех же материалах, но подобранных разными методами, к данному явлению.

Для достижения этой цели проведены следующие задачи: подбор состава методами предельных кривых плотных смесей, объемными методами проектирования, а также оценка физико-механических свойств асфальтобетонных смесей, подобранных различными методами, и оценка склонности таких составов к образованию колеи пластичности.

2. Материалы и методы

В исследованиях был использован асфальтобетон SP-16, A16BH и типа Б марки I. подобранные по нормативам, представленным в таблице 1.

Таблица 1

Применяемые нормативные документы

1	ГОСТ Р 58401.1-2019 «Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Система объемно-функционального проектирования»
2	ГОСТ Р 58406.2-2020 «Смеси горячие асфальтобетонные и асфальтобетон»
3	ГОСТ 9128-2013 «Смеси асфальтобетонные, полимерасфальтобетонные, асфальтобетон, полимерасфальтобетон для автомобильных дорог и аэродромов.

Зерновые составы асфальтобетонных смесей, подобранных разными методами представлены в таблицах 2, 3, 4.

Таблица 2

Зерновой состав для асфальтобетона SP-16

Полные проходы, %	Диаметр отверстий сит, мм.												Содержание вяжущего, %
	31,5	22,4	16,0	11,2	8,0	4,0	2,0	1,0	0,5	0,25	0,125	0,063	
Фактические значения	100	95,8	65,6	53,6	38,9	23,1	17,9	14,9	12,8	11,4	10,0	8,1	4,9
Требования ГОСТ Р 58401.2-2019	-	90-100	45-86	28-65	24-52	18-28	14-24	-	-	-	-	7-10	

Таблица 3

Зерновой состав асфальтобетонной смеси марки А16ВН

Полные проходы, %	Диаметр отверстий сит, мм.												Содержание вяжущего, %
	31,5	22,4	16,0	11,2	8,0	4,0	2,0	1,0	0,5	0,25	0,125	0,063	
Фактические значения	100	100	98,1	78,7	63,0	39,8	27,0	18,1	13,7	11,2	9,7	8,1	5,3
Требования ГОСТ Р 58401.2-2019	-	-	90-100	70-85	-	37-58	25-40	-	-	-	7-20	5-9	

Таблица 4

Зерновой состав асфальтобетонной смеси тип Б марки I

Полные проходы, %	Диаметр отверстий сит, мм.											Содержание вяжущего, %
	40	20	15	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	0,071	
Фактические значения	100	98,5	85,7	72,0	58,0	45,4	38,4	30,2	18,5	11,8	9,2	5,4
Требования ГОСТ Р 58401.2-2019	100	90-100	80-100	70-100	50-60	38-60	28-60	20-60	14-34	10-20	6-12	

На первом этапе испытаний определялся предел прочности асфальтобетона на растяжение при изгибе, а также предельная относительная деформация растяжения. Для этого на нижнюю плиту пресса устанавливали опорное устройство, таким образом, чтобы исключить возможность его перемещения по плите (рис. 1). Расстояние между опорами должно быть $(20,0 \pm 0,5)$ см. [15], далее испытуемый образец устанавливали на опорное устройство вверх гранью. Сверху на образец устанавливаем стержень, затем опускаем верхнюю плиту обеспечивая зазор между плитой и стержнем в 5 мм. Нагружение испытуемого образца производим со скоростью 10 мм/мин, во время разрушения фиксируем максимальное значение нагрузки для испытуемого образца, которое принимается как разрушающая нагрузка P (Н), и максимальное значение прогиба в момент разрушения l пр, см.

Для каждого испытуемого образца вычисляем предел прочности при непрямом растяжении S кПа по формуле:

$$S = 2000P/\pi hD, \quad (1)$$

где P – максимальная нагрузка. Н:

h – толщина образца, мм;

D – диаметр образца, мм.

На втором этапе оценивался коэффициент водостойкости TSR, который вычисляется как отношение среднеарифметических пределов прочности при непрямом растяжении между второй и первой группами образцов по формуле:

$$TSR = S2 / S1, \quad (2)$$

где, $S2$ – среднеарифметическое значение предела прочности при непрямом растяжении образцов из второй группы. кПа;

$S1$ – среднеарифметическое значение предела прочности при непрямом растяжении образцов из первой группы. кПа.

Образцы второй группы подвергались водонасыщению в разраженной атмосфере вакуумной камеры в течении 10 минут под давлением 20 кПа, после чего проводилось их термостатирование в морозильной камере при минус 20°C в течении 16 часов. Водостойкость асфальтобетона определялось в соответствии с ГОСТ Р 58401.18-2019 на образцах высотой 95 мм уплотненных на гираторе с содержанием воздушных пустот 7%.

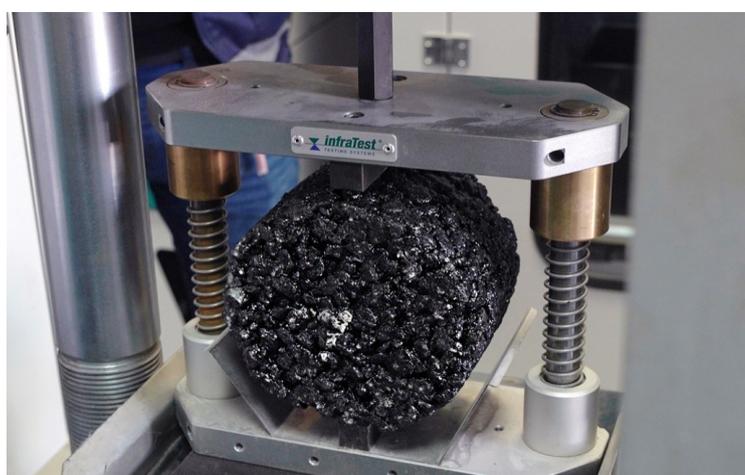


Рис.1. Определение предела прочности при непрямом растяжении. (иллюстрация авторов)

Fig.1 Determination of indirect tensile strength (illustration by the authors)

Водостойкость асфальтобетона в соответствии с ГОСТ Р 58401.1-2019 должна быть не менее 0,80.

На последнем этапе исследований оценивалась склонность подобранных асфальтобетонов к образованию колеи пластичности, которую определяли на установке Omiereur Pavement Rutting Tester. Размер плиты составил 600×400 мм.

Приготовление образцов-плит осуществляют в соответствии с ГОСТ Р 58406.4. С этой целью для каждого состава формовалось по две плиты. Согласно ГОСТ 58401.13 плиты перед испытанием выдерживались в помещении лаборатории при температуре $22 \pm 3^\circ\text{C}$ в течении суток.

После первых десяти циклов нагрузки фиксировали первоначальное показание вертикального положения колеса. Далее в течении первого часа испытания показания фиксировали еще 20 раз, а затем фиксацию проводили каждые 500 циклов нагрузки. Вертикальное положение колеса определяют, как среднеарифметическое значение высот в 25 равномерно распределенных точках по оси движения колеса на расстоянии по (50 ± 2) мм в разные стороны от геометрического центра поверхности испытуемого образца, измерения проводили без остановки, в течении 10 000 циклов нагрузки (20 000 прокатываний колеса). Температура испытания в камере установки составляла 60°C. Средняя глубина колеи определялась как среднеарифметическое значение глубины колеи двух испытуемых образцов, измерения проводились с точностью до 0,1 мм. Пропорциональную глубину колеи PRD, %, вычисляли по формуле:

$$PRD = RD h \cdot 100, \quad (3)$$

где RD – глубина колеи при определенном количестве прокатываний, мм;

h – фактическая толщина испытуемого образца, мм.

Значение пропорциональной глубины колеи записывали с точностью до 0,1 %. За результат испытания принимается среднеарифметическое значение пропорциональной глубины колеи двух испытуемых образцов.

Угол наклона кривой колееобразования WTS, мм/1000 циклов, вычисляется по формуле:

$$WTS = d10\ 000 - d5000 \cdot 5, \quad (4)$$

где d10 000 – глубина колеи после 10000 циклов нагружения, мм;

d5000 – глубина колеи после 5000 циклов нагружения, мм.

Значение угла наклона кривой колееобразования фиксировалось с точностью до 0,01 мм. Результатом считается среднеарифметическое значение угла наклона кривой колееобразования двух образцов.

3. Результаты и обсуждение

Результаты испытания запроектированных асфальтобетонов на определение предела прочности при непрямом растяжении на водостойкость приведены в таблице 5

Таблица 5

Определение предела прочности при непрямом растяжении асфальтобетонов

	SP-16	A16BH	Б марки I
S1	3,197	3,080	2,560
S2	3,457	3,357	3,171
TSR	0,96	0,93	0,79

Как видно из полученных результатов водостойкость асфальтобетона SP-16 на 3 % выше чем у асфальтобетона A16BH и почти на 18 % выше чем у асфальтобетона типа Б марки I.

Были проведены испытания образцов асфальтобетонов на образование колеи пластичности для асфальтобетонов SP-16, A16BH и типа Б марки I. На основе испытаний были составлены графики испытаний:

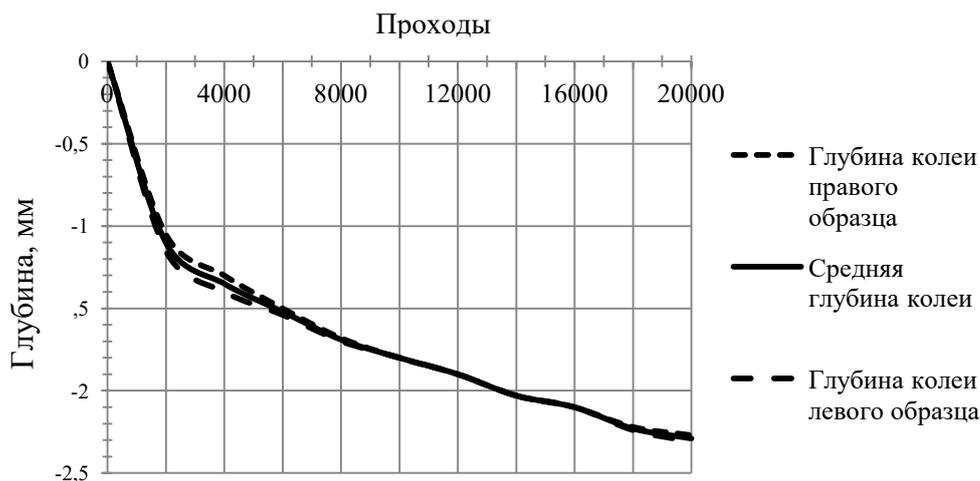


Рис.2. Испытание на образование колеи пластичности для SP-16 (иллюстрация авторов)
 Fig.2 Plasticity Rutting Test for SP-16 (illustration by the authors)

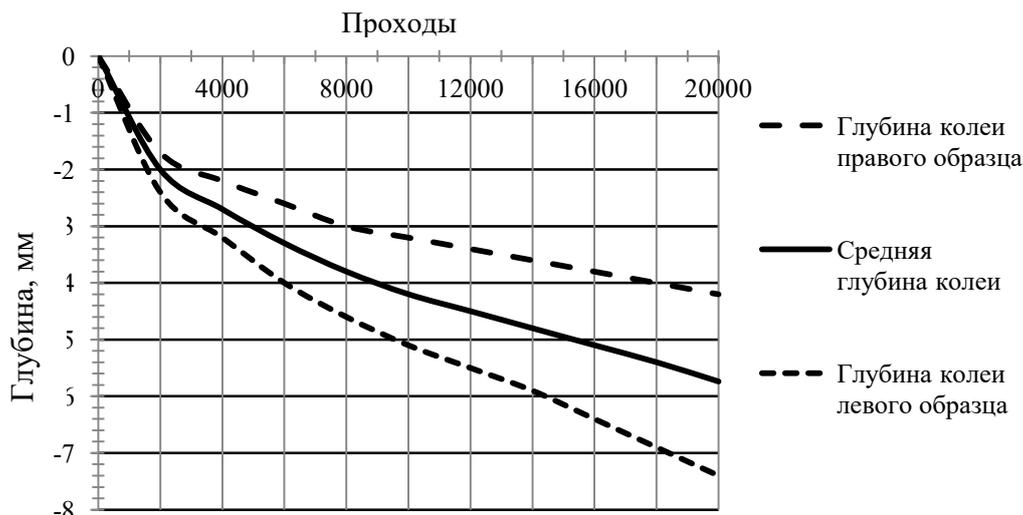


Рис.3. Испытание на образование колеи пластичности для А16ВН (иллюстрация авторов)
 Fig.3 Plasticity rutting test for A16VN (illustration by the authors)

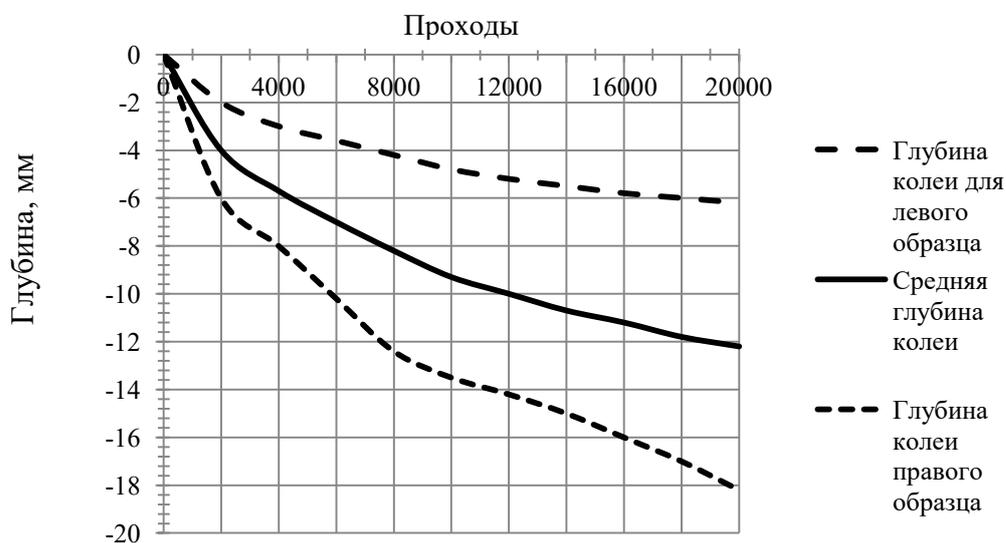


Рис.4. Испытание на образование колеи пластичности для типа Б марки I (иллюстрация авторов)
 Fig. 4 Plasticity Rutting Test for Type B Grade I (illustration by the authors)

Проведен сравнительный анализ полученных образцов на склонность к образованию колеи пластичности и сведен в таблицу 6.

Таблица 6

Сравнение образцов на склонность к образованию колеи пластичности.

Наименование	SP-16 (ГОСТ Р 58401.1-2019)	A16ВН (ГОСТ Р 58406.2-2020)	Тип Б марки I (ГОСТ 9128-2013)
Глубина колеи по нормативу, мм	2,50	6,0	Не нормируется
Полученная колея, мм	2,29	5,74	12,22
Износ, %	4,6	11,48	24,44
Изменение колеи для SP-16 и A16ВН от типа Б марки I	+19,84	+12,96	

По проведенным испытаниям было выполнено сравнение асфальтобетонов SP-16, А16ВН и Типа Б Марки I.

Таблица 7

Сравнение испытаний полученных асфальтобетонов

№ п/п	Наименование показателя	Ед. изм.	SP-16	А16ВН	Тип Б марки I
1	2	3	4	5	6
1	Объемная плотность образцов	г/см ³	2,508	2,520	2,550
2	Максимальная плотность смеси	г/см ³	2,552	2,637	2,638
3	Содержание воздушных пустот	%	3,9	4,5	1,7
4	Пустоты в минеральном заполнителе (ПМЗ)	%	13,7	13,3	12,9
5	Пустоты наполненные битумом (ПНБ)	%	74	74	76,6
6	Отношение пыль вяжущее		0,8	1,47	1,4
7	Содержание битумного вяжущего	%	4,9	5,3	5,4
8	Глубина колеи	мм	2,29	5,74	12,22

Из полученных данных видим, что прочностные характеристики и стойкость к колееобразованию асфальтобетона Тип Б марки I уступает асфальтобетонам SP-16, А16ВН.

Заключение

Были проведены испытания по определению зернового состава асфальтобетонов объемными методами проектирования по (ГОСТ Р 58401.1-2019, ГОСТ Р 58406.2-2020) SP-16, А16ВН и методом предельных кривых по (ГОСТ 9128-2013) тип Б Марки I.

Были проведены экспериментальные исследования с целью изучения физико-механических свойств асфальтобетонов SP-16, А16ВН и тип Б Марки I.

Были проведены испытания запроецированных асфальтобетонов на определение предела прочности при непрямом растяжении на водостойкость.

Результаты испытаний показали, что коэффициент водостойкости для асфальтобетонов SP-16 и А16ВН соответствует требованиям нормативным параметров и составляет для SP-16(0,96%), для А16ВН (0,93%). Для асфальтобетона Тип Б марки I коэффициент водостойкости составляет (0,79%). Водостойкость асфальтобетона в соответствии с ГОСТ Р 58401.1-2019 должна быть не менее 0,80%.

Были проведены испытания образцов асфальтобетонов на образование колеи пластичности для асфальтобетонов SP-16, А16ВН и типа Б марки I.

Результаты испытаний показали, что глубина колеи для асфальтобетонов SP-16 и А16ВН соответствует требованиям нормативных документов и составляет для SP-16 (2,29мм.), для А16ВН (5,74мм.), а для асфальтобетона Тип Б марки I составляет (12,22мм.)

Из полученных данных видим, что прочностные характеристики и стойкость к колееобразованию асфальтобетона Тип Б марки I уступает асфальтобетонам SP-16, А16ВН.

Список литературы

1. Aleksandrov A.S., Semenova T.V., Aleksandrova N.P. Analysis of permanent deformations in granular materials of road structures // Roads and Bridges. 2017. Vol.15. No 4. P. 271–284. DOI: 10.7409/rabdim.016.017
2. Смирнов Д.С., Лобанова А.С. Исследование пластического колееобразования дорожных покрытий из щебеночно-мастичного асфальтобетона в Республике Татарстан // Техника и технология транспорта. 2019. Т. 5. Вып. 11. С.38. [Smirnov

- D.S., Lobanova A.S. Investigation of plastic rutting of road surfaces made of crushed-mastic asphalt concrete in the Republic of Tatarstan // *Technique and technology of transport*. 2019. Vol. 5. Issue 11. P. 38.]
3. Коротков Ю.М., Богомолов С.В. Оценка характеристик сдвигоустойчивости крупнозернистых щебеночно-мастичных асфальтобетонов: сб. материалов X всероссийской, научно-практической конференции молодых ученых с международным участием «Россия молодая». 2018. С. 42302.1-42302.4. [Korotkov Yu.M., Bogomolov S.V. Assessment of shear stability characteristics of coarse-grained crushed-mastic asphalt concrete: collection of materials of the X All-Russian scientific and practical conference of young scientists with international participation "Young Russia". 2018. P. 42302.1-42302.4]
 4. Матвиенко О.В., Базуев В.П., Веник В.Н., Базаров Р.Б., Арутюнян Э.Р. Математическое моделирование сдвигоустойчивости асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2017. Т.4. С. 158-170. [Matvienko O.V., Bazuev V.P., Venik V.N., Bazarov R.B., Harutyunyan E.R. Mathematical modeling of shear stability of asphalt concrete pavements // *Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2017. Vol.4. P. 158-170.]
 5. Kandhal P. S. and I. Rickards. Premature Failure of Asphalt Overlays from StriPing: Case Histories // *Asphalt Paving Technology*. 2001. Vol. 70. P. 1–33.
 6. Linbing Wang, Hongren Gong, Yue Hou, Xiang Shu, Baoshan Huang *Advances in Pavement materials, design, characterisation, and simulation // Road Materials and Pavement Design*. 2017 Vol.18. No. S3 P. 1-11. DOI: 10.1080/14680629.2017.1329856
 7. А.С. Александров, Т.В. Семенова, А.Л.Калинин Анализ причин колеобразования на покрытиях нежестких дорожных одежд и рекомендации по уменьшению этого явления // *Вестник СибАДИ*. 2019. Т. 16. Вып.6. С.718–745. [A.S. Alexandrov, T.V. Semenova, A.L.Kalinin Analysis of the causes of rutting on flexible pavements and recommendations for reducing this phenomenon // *Bulletin of SibADI*. 2019. Vol. 16. Issue 6. P. 718–745.]
 8. Li, Jiange & Sha, Aimin & Jiang, Wei & Ren, Xueyuan Investigation on internal mechanical response of asphalt mixture during creep test utilizing the Smart Aggregate// *Construction and Building Materials*. 2022 Vol.349. No. 1 P. 1-16. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128800
 9. Журавлев И.Н. Вопросы влияния повышенных динамических нагрузок на состояние дорожных одежд // *Colloquium-journal*. 2019. Т. 22. Вып. 46. С. 50-53. [Zhuravlev I.N. Questions of the influence of increased dynamic loads on the condition of pavements// *Colloquium-journal*. 2019. Vol. 22. Issue 46. P. 50-53.]
 10. Chen, D., Ling, J., Li, D., & Zheng, C. Monitoring and evaluating techniques of highway subgrade safety in the operation period // *Road Materials and Pavement Design*. 2017 Vol.18. No. S3 P. 215-225. DOI: 10.1080/14680629.2017.1329876
 11. Vysotskaya M., Vdovin E., Kuznetsov D., Shiryayev A. Alternative mineral powders for asphalt concrete // II International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering (STCCE-2021). 2021. Vol. 169. P. 297-307. doi: 10.1007/978-3-030-80103-8_32.
 12. Навольный А.С., Чернов С.А. Пути подборов составов мелкозернистых асфальтобетонных смесей, наиболее устойчивых к процессам колеобразования // *Интернет-журнал «Транспортные сооружения»*. 2018. Т. 5. Вып. 1. С.1. DOI: 10.15862/01SATS118. [Navolny A.S., Chernov S.A. Ways of selecting compositions of fine-grained asphalt concrete mixtures that are most resistant to the processes of rutting formation // *Online magazine "Transport facilities"*. 2018. Vol. 5. Issue 1. P.1. DOI: 10.15862/01SATS118]
 13. Павлова Л.Н., Зайнутдинов В.В. Асфальтобетонные смеси «SUPERPAVE» // *Universum: технические науки : электрон. научн. журн*. 2023. Т. 6. Вып. 111. С. 60-62. [Pavlova L.N., Zaynutdinov V.V. Asphalt concrete mixtures "SUPERPAVE" // *Universum: technical sciences: electron. scientific. journal*. 2023. Vol. 6. Issue 111. P. 60-62.]

14. Веюков Е.В., Салихов М.Г., Толстова А.Г., Тихвинская Д.П. Проектирование дорожных одежд с учетом процессов старения асфальтобетонов // Инвестиции и инновации. 2022. Т. 4. С.191-195. [Veyukov E.V., Salikhov M.G., Tolstova A.G., Tikhvinskaya D.P. Designing Road structural layers taking into account the aging processes of asphalt concrete // Investments and innovations. 2022. Vol. 4. p.191-195.]
15. Кочнев В.И., Котлярский Э.В. Оптимизация проектирования состава асфальтобетона: сб. ст. Научные технологии и инновации / Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. 2014. С. 44-48. [Kochnev V.I., Kotlyarsky E.V. Optimization of asphalt concrete composition design: collection of high-tech technologies and innovations / Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 2014. P. 44-48.]
16. Траутвайн А.И., Акимов А.Е., Денисов В.П., Лашин М.В. Особенности метода объемного проектирования асфальтобетона по технологии Superpave // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова 2019. Вып. 3. С.8-12.[Trautvain A.I., Akimov A.E., Denisov V.P., Lashin M.V. Features of the method of volumetric design of asphalt concrete using Superpave technology // Bulletin of VG. Shukhov BSTU 2019. Issue 3. P.8-12.]

Информация об авторах

Смирнов Денис Сергеевич, кандидат технических наук, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г.Казань, Российская Федерация.

Email: denis27111974@yandex.ru

Белаева Камиля Равиловна, лаборант, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г.Казань, Российская Федерация.

Email: belaeva.kam@gmail.com

Хохряков Олег Викторович, доктор технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация.

Email: olvik@list.ru

Information about the authors

Denis S. Smirnov, candidate of technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Russian Federation.

Email: Denis27111974@yandex.ru

Kamilya R. Belaeva, laboratory assistant, Kazan State University of Architecture and Engineering, Russian Federation.

Email: belaeva.kam@gmail.com

Oleg V. Khokhryakov, doctor of technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.

Email: ninamor@mail.ru

УДК: 532.11, 691.17
DOI: 10.52409/20731523_2023_3_77
EDN: DZETXA



Влияние гидростатического давления на структуру и свойства эпоксикаучуковых полимеров с эффектом «память формы»

В.Ф.Строганов¹, Д.Е.Страхов¹, И.В.Строганов², А.С. Ахметшин³

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет,

²Казанский национальный исследовательский технологический университет,
г. Казань, Российская Федерация

³Администрация Смоленской области, г. Смоленск, Российская Федерация

Аннотация: Одной из проблем получения эпоксидных композиций, особенно при наличии высоковязких модификаторов, является совместимость компонентов. Повышение уровня совместимости обеспечивает положительное изменение как технологических, так и эксплуатационных характеристик композиций и полимера. Цель работы заключается в исследовании влияния физической модификации (высокого гидростатического давления) на высоковязкие эпоксикаучуковые олигомерные композиции для повышения уровня их однородности и физико-механических характеристик эпоксиполимеров. Задачами исследования являются: определение изменений структурных и прочностных показателей эпоксидных полимеров в результате физической модификации. Установлено, что применение гидростатического давления оказывает влияние как на изменение структуры: молекулярной массы межузловых фрагментов (M_c), эффективной плотности узлов полимерной сетки (V_c) и температуры стеклования (T_c), так и прочностных показателей: прочности при растяжении (σ_p), модуля упругости (E) и относительной высокоэластической деформации ($\epsilon_{вэ}$). Значимость полученных результатов для строительной отрасли заключается в расширении возможностей применения выпускаемых промышленностью высоковязких модификаторов для изготовления различных композиционных материалов, например, муфт с памятью формы для соединения трубопроводов, в том числе, из разнородных материалов.

Ключевые слова: физическая модификация, гидростатическое давление, структура и свойства, межмолекулярные взаимодействия, эффект памяти формы.

Для цитирования: Строганов В.Ф., Страхов Д.Е., Строганов И.В., Ахметшин А.С. Влияние гидростатического давления на структуру и свойства эпоксидаучуковых полимеров с эффектом «память формы» // Известия КГАСУ, 2023, № 3(65), с.77-85, DOI: 10.52409/20731523_2023_3_77, EDN: DZETXA

Influence of hydrostatic pressure on the structure and properties of epoxy rubber polymers with the “shape memory” effect

V.F. Stroganov¹, D.E. Strakhov¹, I.V. Stroganov², A.S. Akhmetshin³

¹Kazan State University of Architecture and Civil Engineering,

²Kazan National Research Technological University

Kazan, Russian Federation

³Administration of the Smolensk region, Smolensk, Russian Federation

Abstract: One of the problems in producing epoxy compositions, especially in the presence of high-viscosity modifiers, is the compatibility of the components. Increasing the level of compatibility ensures a positive change in both technological and operational characteristics of the compositions and the polymer. The purpose of the work is to study the effect of physical modification (high hydrostatic pressure) on high-viscosity epoxy rubber oligomer compositions to increase the level of their homogeneity and physical and mechanical characteristics of epoxy polymers. The objectives of the study are: to determine changes in the structural and strength parameters of epoxy polymers as a result of physical modification. It has been established that a change in hydrostatic pressure affects both the change in structure: molecular weight of interstitial fragments (M_c) and effective density of polymer network nodes (V_c), glass transition temperature (T_c), and strength indicators: tensile strength (σ_p), modulus of elasticity (E) and relative highly elastic deformation ($\epsilon_{в.э.}$).

The significance of the results obtained for the construction industry lies in expanding the possibilities of changing manufactured industrial modifiers for the production of various composite materials, for example, shape memory couplings for connecting pipelines, including those made of dissimilar materials.

Keywords: physical modification, hydrostatic pressure, structure and properties, intermolecular interactions, shape memory effect.

For citation: Stroganov V.F., Strakhov D.E., Stroganov I.V., Akhmetshin A.S. Study of hydrostatic pressure on the structure and properties of epoxy rubber polymers with the “shape memory” effect // News KSUAE, 2023, № 3(65), p.77-85, DOI: 10.52409/20731523_2023_3_77, EDN: DZETXA

1. Введение

Известно, что эпоксидные полимеры (ЭП) обладают комплексом свойств (адгезионных, механических, электрических и др.), которые во многих случаях характеризует их как незаменимые в качестве основы полимерных адгезивов, покрытий, компаундов и армированных пластиков [1-4]. Широкий спектр свойств обусловил их важную роль в ряду промышленных полимерных материалов, в том числе среди полимеров, обладающих уникальным свойством «память формы» [5]. Сетчатая структура ЭП наряду высоким уровнем ряда показателей: адгезия к различным материалам, прочность, устойчивость к внешним воздействиям и др., придает свойства хрупкости и жесткости композиционным материалам на их основе. Методы физико-химической модификации с целью нивелирования жесткости ЭП рассмотрены во многих публикациях, в том числе для эпоксидных материалов с эффектом «памяти формы» (ЭПФ)[5-8].

Ранее нами для практической реализации ЭПФ предложено применение в качестве модификаторов эпокси- и гидроксипуретановых каучуков с молекулярной массой от 1500 до 2100. Установлены оптимальные значения уровня молекулярных масс в интервале 1200-1900 [6], при котором обеспечивается большая однородность композиций и наиболее высокий уровень физико-механических характеристик. С увеличением молекулярной массы эпоксикаучуковых олигомеров отмечено проявление влияния стерических затруднений (за счет увеличения количества молекулярной массы и

уретановых групп) как на реологические характеристики композиций и их однородность, при приготовлении и применении, так и на снижение физико-механических свойств (за счет увеличения дефектов при изготовлении полимерных материалов: соединительных муфт и пр.) [7].

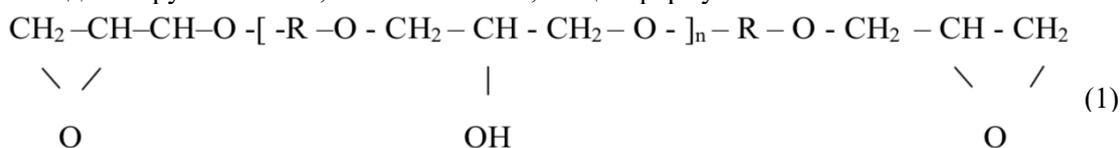
Известно, что способность запоминать свою форму не является исключительной особенностью полимеров. Термин «эффект памяти формы» (ЭПФ) вначале использовался главным образом для металлических сплавов [9-10]. Для высокомолекулярных соединений ранее чаще употреблялось определение «термическая усадка» при рассмотрении особенностей восстановления размеров после их ориентационной вытяжки [5, 21]. По сравнению с металлическими сплавами обладающими памятью формы, полимеры с ЭПФ имеют низкую плотность, высокую способность к восстановлению деформации, легкую обрабатываемость, способность к окрашиванию и более низкую стоимость.

Фундаментальность знаний в управлении структурой и деформационно-прочностными характеристиками металлов, как и в случае наследования эффекта «память формы» [8-10], стимулировали начало и развитие исследований по влиянию давления на свойства полимеров. На начальном этапе эти исследования не носили системного характера, а в период 60-80х годов XX века наблюдалось увеличение активности в изучении роли высоких давлений в формировании комплекса физико-механических и эксплуатационных свойств полимерных материалов. Среди многочисленных публикаций следует выделить монографии [5, 11,12] и ряд статей по исследованию влияния давления на динамическую релаксацию [13,14], диэлектрические свойства [15-18] полимеров, в том числе на структурообразование эпоксидных полимеров [19-21]. Обширный массив публикационного материала о влиянии давления на поведение полимеров представлены в следующих направлениях исследований: физические и механические свойства, релаксационные и фазовые переходы, структурная модификация и ее влияние на свойства полимерных материалов. Учитывая имеющиеся литературные данные, определена цель работы: исследование влияния эффекта высокого гидростатического давления на эпоксикаучуковые олигомерные композиции для повышения уровня их однородности и физико-механических характеристик эпоксиполимеров. Задачами исследования являются: определение изменений структурных и прочностных показателей эпоксидных полимеров в результате физической модификации.

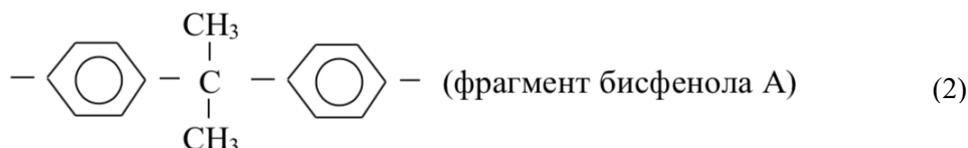
2. Материалы и методы

В работе применяли эпоксикаучуковые композиции, состоящие из смоляной (эпоксидные и эпоксикаучуковые олигомеры) и отверждающей (триэтаноламинотитанат) частей:

- Эпоксиднодиановый олигомер, смола эпоксидиановая марки ЭД-20, содержание эпоксидных групп – 21.5%, ГОСТ 10587-84, общей формулы:

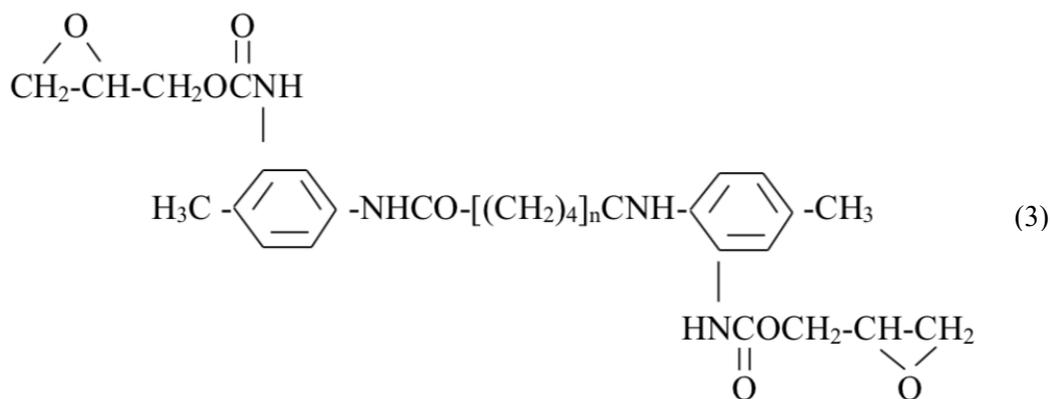


где R -



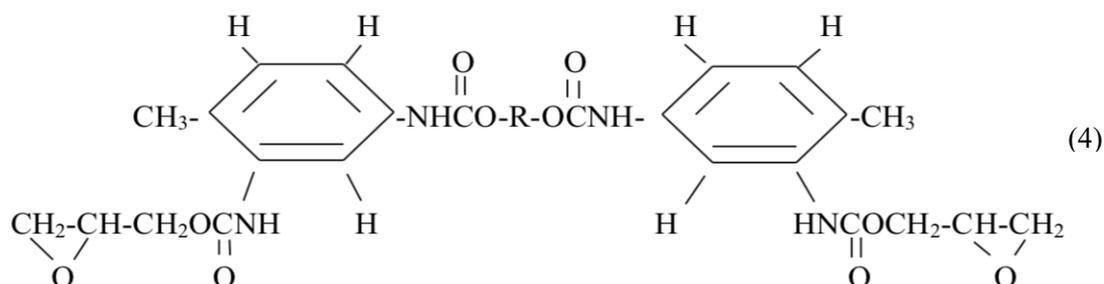
- Эпоксикаучуковые олигомеры (изготовитель з-д.СК, г.Казань):

Олигоэпоксиуретан ПЭФ-3АГ (ТУ 38.50302-89) содержание эпоксидных групп– 9-12%, общей формулы:



где $n=12-17$.

- Олигодиепексид, марки ПДИ-3А (ТУ38.103410-85), содержание эпоксидных групп – 2.5 - 4.0%, общей формулы:



где $R = (\text{C}_4\text{H}_6)_p - (\text{C}_5\text{H}_8)_m - (\text{C}_4\text{H}_5)_p$ - бутаденизопреновый блок-сополимер, где $m = 11-17$, $p = 24-26$.

- Отвердитель - триэаноламинотитанат (ТЭАТ-1) – смесь двух продуктов:
- 1-(н-бутокси) триэаноламинотитаната и 1-(бис(2-оксиэтил)-1-аминоэтокси) триэаноламинотитаната, ТУ6-09-11-2119-93 (изм.№3) [22].

Отвердитель применяется для «горячего» отверждения эпоксидных смол в различных отраслях промышленности. Жизнеспособность с ЭД-20: ~10 суток при 25⁰С, 120 мин. при 90⁰С. Рекомендуемые режимы отверждения композиций, содержит (4-10) масс частей ТЭАТ-1 и 100 масс частей ЭД-20 (21% эп.гр.): 10 час при 80⁰С + 10 час. При 120⁰С. Оптимальное соотношение и режим потребителем определяется экспериментально (табл.1). В работе применяли режим: 10час. - 80⁰С + 3час. - 120⁰С.

Композиции готовили предварительно, совмещая при легком перемешивании олигомеры: ЭД-20 с необходимым количеством модификатора, а затем, непосредственно перед помещением в контейнер, для обработки гидростатическим давлением, совмещали с отвердителем (ТЭАТ-1). Изостатическую обработку эпоксидных композиций проводили при давлении 0.1-250МПа на установке типа «поршень-цилиндр», смонтированной на базе гидравлического пресса [23]. Исследуемые эпоксидные композиции помещали в цилиндрические контейнеры, изготовленные из полиэтилентетрафалата.

Термомеханический анализ (ТМА) эпоксиполимеров выполнялся на лабораторной автоматической установке в условиях одноосного сжатия образцов цилиндрической формы $\varnothing 10$ и $h 10$ мм напряжением 0,6-1,2 МПа и скорости подъема температуры 2-4⁰С/мин. По данным ТМА определяли температуру стеклования (T_c).

Важнейшие технологические параметры пространственной полимерной сетки – молекулярную массу межузловых фрагментов цепи (M_c) определяли по формуле Уолла:

$$M_c = \frac{3 * \rho * R * T_c * \epsilon_{вэ}}{\sigma_p} \quad (5)$$

где ρ - плотность полимера, кг/м³;
 T_c – температура стеклования, К;
 R – газовая постоянная, Дж/(моль · К);

$\varepsilon_{вз}$ – относительная высокоэластическая деформация;

σ_p – предел прочности при разрушении, Па.

Эффективная плотность узлов полимерной сетки ν_c определяется из соотношения [2]:

$$\nu_c = \frac{2 * \rho * N_a}{3 * M_c} \quad (6)$$

где ρ - плотность, кг/м³;

N_a – число Авогадро, 1/моль.

Прочность оценивали по показателям: предела прочности (σ_p) при равномерном растяжении по ГОСТ 11262-80. Исследования проводили как на стандартных образцах, так и на гладких муфтах из отвержденных ЭП (длина – 63 мм, средний диаметр – 50,5 мм, толщина – 5 мм).

Полимерные муфты изготавливали методом заливки в разборной пресс-форме, в которой муфты отверждались в кольцевом зазоре (рис.1) по заданному технологическому режиму. После отверждения композиции и охлаждения муфты ниже T_c полимера, форму разбирали и полимерную муфту (6) снимали с сердечника при помощи гидравлического пресса и специальной трубчатой оправки. Для придания муфте эффекта «памяти формы» использовали оснастку (рис.2а), позволяющую осуществить процесс ее деформирования (раздачи) с увеличением диаметра ($D_0 < D_1$, где D_0 – внутренний диаметр заготовки до деформирования, D_1 – диаметр после деформирования). Деформирование выполняли следующим образом: нагретую до температуры $>T_c$ муфту одевали на утолщенную часть дорна, а съем деформированной муфты, после снижения температуры $<T_c$, производили путем перемещения дорна относительно опорной плиты (рис.2б).

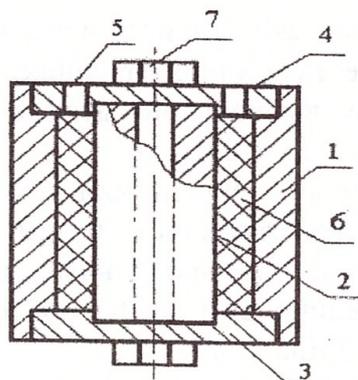


Рис. 1. Форма для заливки полимерных композиций:

1-стакан; 2-сердечник; 3-нижняя крышка; 4-верхняя крышка; 5-отверстие для заливки; 6- полимерная композиция; 7-крепежный винт (иллюстрация автора)

Fig. 1. Form for pouring polymer compositions:

1-glass; 2-core; 3-bottom cover; 4-top cover; 5-hole for filling; 6-polymer composition; 7-fixing screw (illustration by the author)

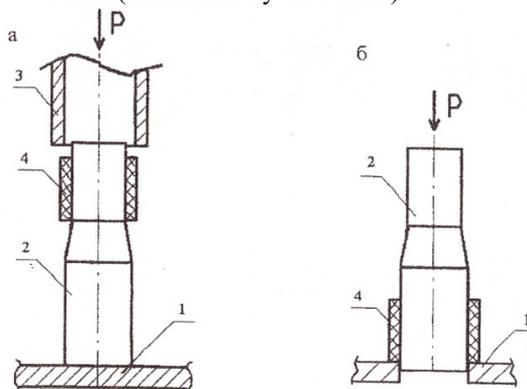


Рис. 2. Схемы деформирования и снятия полимерной муфты:

1-опорная плита; 2-дорн; 3-втулка; 4-полимерная муфта (иллюстрация автора)

Fig. 2. Schemes for deforming and removing the polymer coupling:

1-base plate; 2-dorn; 3-sleeve; 4-polymer coupling (illustration by the author)

Для полимерных муфт прочность при растяжении (σ_p) и модуль упругости (E) определяли при осевых и окружных напряжениях до 15 МПа (табл. 2).

3. Результаты и методы

В соответствии с данными ряда публикаций [13-15] о наследовании изменений в свойствах полимеров, обусловленном гидростатическим воздействием повышенных давлений, в работе принцип наследования свойств впервые исследован и подтвержден для эпоксикаучуковых композиций (ЭК). Результаты термомеханического анализа свидетельствуют о том, что изменения в структуре эпоксидных композиций после воздействия давления, проявляются и сохраняются и после их отверждения. Установлено, что модифицированные давлением эпоксикаучуковые полимеры обладают более высокими значениями температуры стеклования (рис.3.).

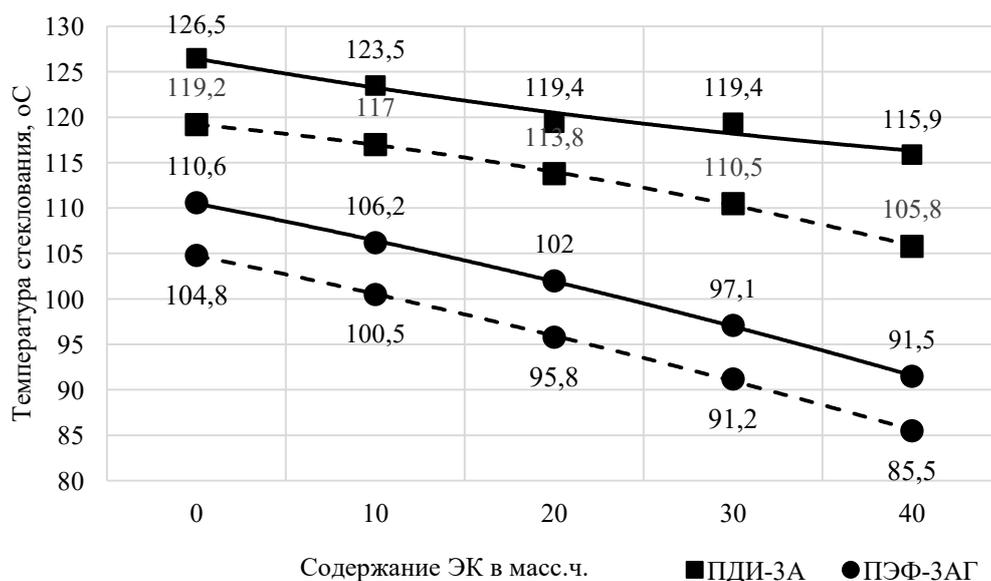


Рис. 3. Зависимость температуры стеклования (T_g) полимеров от содержания эпоксикаучуков (ЭК):
 — при давлении 250 МПа; а при 0,1 МПа
 (иллюстрация автора)

Fig. 3. Dependence of the glass transition temperature (T_g) of polymers on the content of epoxy rubbers (ER):
 — at a pressure of 250 MPa; and at 0.1 MPa
 (illustration by the author)

Как результат физической модификации давлением, следует отметить реализацию возможностей увеличения межмолекулярных взаимодействий и, как их следствие, увеличение молекулярной массы межузловых фрагментов – M_c и уменьшение эффективной плотности узлов полимерной сетки. – v_c (табл. 1).

Таблица 1

Состав эпоксикаучуковых композиций и топологические параметры пространственной сетки эпоксидных полимеров

Обозначение композиций	Состав композиций, мас.ч.				Топологические параметры сетки	
	Эпоксидная смола ЭД-20	Отвердитель ТЭАТ-1	Эпоксикаучуки		Молекулярная масса межузловых фрагментов (M_c)	Эффективная плотность узлов полимерной сетки (v_c)
			ПЭФ-3АГ	ПДИ-3А		
ЭКК	100	15	-	-	1350/1450	9.65/9.58
ЭКК-1Ф	90	15	10	10	1470/1520	9.54/9.48
ЭКК-2Ф	80	15	20	20	1600/1675	9.46/9.35

ЭКК-3Ф	70	15	30	30	1750/1920	9.38/9.20
ЭКК-4Ф	60	15	40	40	1930/2120	9.15/8.95
ЭКК-1И	90	15	10	10	1645/1750	9.40/9.31
ЭКК-2И	80	15	20	20	1768/1920	9.25/9.14
ЭКК-3И	70	15	30	30	1915/2120	9.15/8.92
ЭКК-4И	60	15	40	40	2015/2210	8.89/8.65

В соответствии с изменениями топологических показателей полимерной сетки изменяются прочностные характеристики эпоксикаучуковых полимеров (табл. 2).

Таблица 2

Прочностные характеристики эпоксикаучуковых полимеров

Обозначение оксидных полимеров	Прочность при растяжении (σ_p), МПа	Модуль упругости (E), ГПа
ЭП-0	86.5/84.8	3.85/3.62
ЭП-1Ф	85.0/83.5	3.6/3.4
ЭП-2Ф	83.3/81.4	3.5/3.2
ЭП-3Ф	82.0/80.2	3.2/2.9
ЭП-4Ф	78.5/75.2	2.8/2.5
ЭП-1И	78.4/76.5	4.2/3.9
ЭП-2И	76.0/74.7	4.0/3.6
ЭП-3И	73.5/71.9	3.7/3.3
ЭП-4И	71.0/68.5	3.4/3.0

Следует отметить, что при модификации ЭП эпоксикаучуками снижение прочностных характеристик весьма незначительное: 8-9 МПа.

4. Заключение

В результате модификации эпоксидиановых аминных композиций высоковязкими эпоксипуретановыми каучуками при применении физической модификации гидростатическим давлением 250 МПа удалось повысить как уровень однородности модифицированной смеси олигомеров, так и качество полимерных образцов термоусаживающихся муфт, обладающих эффектом памяти формы.

Следует отметить, что модификация позволила увеличить диапазон (по молекулярной массы) применяемых эпоксикаучуков, снизить хрупкость полимеров при практическом сохранении высоких показателей характеристик прочности.

Список литературы

1. А.М. Пакен. Эпоксидные соединения и эпоксидные смолы (пер. с нем., под ред. Х.С. Эфроса. Л.- Тосхимиздат. - 964 с.[А.М. Paquin. Epoxy compounds and epoxy resins (translated from German, edited by H.S. Efros. L.- Goskhimizdat. – 964 p.]
2. И.З. Чернин, Ф.М. Смехов, Ю.В. Жердев. Эпоксидные смолы и композиции. –М., Химия. 1982г. – 232с.[I.Z. Chernin, F.M. Smekhov, Yu.V. Zherdev. Epoxy resins and compositions. –M., Chemistry. 1982. – 292p.]
3. В.И. Иржак. Эпоксидные полимеры и нанокompозиты. – Черноголовка: изд-во ИПХФ РАН. 2021, – 319с.[V.I. Irzhak. Epoxy polymers and nanocomposites. – Chernogolovka: publishing house of IPHF RAS. 2021, – 319 p.]
4. Resource-saving polymer compositions for construction purposes / R. Galeev, R. Nizamov, L. Abdrakhmanova, V. Khozin // IOP conference series : Materials Science and Engineering, Kazan, 29 апреля – 15 2020 года. Vol. 890. – Kazan, Russia: IOP Science, 2020. – P. 012111. – DOI 10.1088/1757-899X/890/1/012111. – EDN LOMNOQ.
5. В.Ф. Строганов, И.В. Строганов, В.А. Белошенко. Эпоксидные полимеры с эффектом памяти формы: структура, свойство, применение – Казань. Изд-во Казанского архитектурно-строительного университета. 2017. – 244с.[V.F. Stroganov, I.V. Stroganov, V.A. Beloshenko. Epoxy polymers with shape memory

- effect: structure, property, application – Kazan. Publishing House of Kazan State University of Architecture and Engineering. 2017. – 244 p.]
6. В.Ф. Строганов, Р.А. Каюмов, Д.Е. Страхов. Технологии получения термоусаживающихся муфт и муфто-клеевых соединений трубопроводов на основе эпоксидных полимеров. – Казань, изд-во КГАСУ.2012. – 88с.[V.F. Stroganov, R.A. Kayumov, D.E. Strakhov. Technologies for obtaining heat-shrinkable couplings and coupling-adhesive connections of pipelines based on epoxy polymers. – Kazan, publishing house of KGASU.2012. – 88 p.]
 7. В.Ф. Строганов, Д.Е. Страхов, И.В. Строганов, К.П. Алексеев. Композиция для изготовления термоусаживающихся изделий. Патент РФ № 2253659 от 10.06.2005. [V.F. Stroganov, D.E. Strakhov, I.V. Stroganov, K.P. Alekseev. Composition for the manufacture of heat-shrinkable products. RF Patent No. 2253659 dated 10.06.2005.]
 8. LanLuo, Fenghua Zhang, and Jinsong Leng Shape Memory Epoxy Resin and Its Composites/ Materials to Applications., Volume 2022(3), P. 1-25.
 9. Лихачев В.А., Кузьмин С.Л., Каменцева З.П. Эффект памяти формы. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та. 1987. – 216 с. [Likhachev V.A., Kuzmin S.L., Kamentseva Z.P. The effect of form memory. – L.: Publishing House of the Leningrad University. 1987. – 216 p.]
 10. Ооцука К., Симидзу К., Судзуки Ю. и др. Сплавы с эффектом памяти формы. – М.: Металлургия. 1990. – 224 с. [Ootsuka K., Shimizu K., Suzuki Yu. and others . Alloys with shape memory effect. – М.: Metallurgy. 1990. – 224 p.]
 11. Журавлев В.Н., Пушин В.Г. Сплавы с термомеханической памятью и их применение в медицине. – Екатеринбург. Изд-во УрО РАН, 2000. – 150 с. [Zhuravlev V.N., Pushin V.G. Alloys with thermomechanical memory and their application in medicine. – Yekaterinburg. Publishing house of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2000. – 150 p.]
 12. Белошенко В.А., Варюхин В.Н. Эффект памяти формы в полимерных материалах. – Киев.: Наукова Думка. 2005. – 192 с. [Beloshenko V.A., Varyukhin V.N. Shape memory effect in polymer materials. – Kiev.: Naukova Dumka. 2005. – 192 p.]
 13. Heinrich W., Stoll B. Dielectric investigation of the glass relaxation in poly(vinyl acetate) and poly(vinyl chloride) under high hydrostatic pressure //Coll. Polym. Sci. - 1985. - V.263, №11 - P. 873-878.
 14. Нехода А.Р., Ростиашвили В.Г., Иржак В.И., Иржак Т.Ф. Влияние давления на динамические свойства полимеров //Высокомоле. соединения. Сер.А. - 1989. - Т.31, №8. - С.1624-1630.[Nekhoda A.R., Rostiashevili V.G., Irzhak V.I., Irzhak T.F. Influence of pressure on dynamic properties of polymers //High-molecular compounds. Ser.A. - 1989. - Vol.31, No. 8. - P.1624-1630.]
 15. Месенжник Я.З. Свойства полимеров, находящихся под воздействием гидростатического давления до 250 МПа //Пластические массы. - 1991. - №3. - С.26-28. [Mesenzhnik Ya.3. Properties of polymers under the influence of hydrostatic pressure up to 250 MPa //Plastic masses. - 1991. - No. 3. - P.26-28.]
 16. Файнштейн Е.Б., Лущейкин Г.А., Игонин Л.А. Исследование особенностей электропроводности и диэлектрических потерь полипиромеллитимида с применением высокого давления //Высокомоле. соединения. Сер.А. 1974. - Т.16, №7. - С.1677-1680.[Feinstein E.B., Lushcheikin G.A., Igonin L.A. Investigation of the features of electrical conductivity and dielectric losses of polypyromellitimide using high pressure // High-molecular compounds. Ser.A. 1974. - Vol.16, No. 7. - P.1677-1680.]
 17. Рае К.Д., Bhateja S.K. The effects of hydrostatic pressure on the 45. mechanical behavior of polymers //J. Macromol. Sci. C. - 1975. - V.13, №1. - P.1-75.
 18. Masamichi H. Effect of molecular weight on phase transition of polyethylene under high pressure //Jap. J. Appl. Phys. - 1981. - V.20, №3. - P. 617-621.
 19. Ольховик О.Е., Бляхман Е.М. Исследование структурирования эпоксидных полимеров в условиях всестороннего сжатия //Высокомоле. соединения. Сер. Б. - 1976. - Т.18, №1. - С.36-39. [Olkhovik O.E., Blyakhman E.M. Investigation of the structuring of epoxy polymers under conditions of comprehensive compression // High-molecular compounds. Ser. B. - 1976. - Vol. 18, No. 1. - P.36-39.]

20. Katsuhiko N., Takashi N., Xu A., Kohro T. Pressure dependence of the curing behavior of epoxy resin //Polym. J. - 1991. - V.23, №10. - P.1157-1162.
21. Иржак В.И., Розенберг Б.А., Ениколопян Н.С. Сетчатые полимеры. Синтез, структура, свойства. - М.: Наука, 1979. - 248с. [Irzhak V.I., Rosenberg B.A., Enikolopyan N.S. Mesh polymers. Synthesis, structure, properties. - M.: Nauka, 1979. - 248 p.]
22. Эпоксидные смолы. Компаунды. Отвердители. Ускорители. Пластификаторы. Активные разбавители. 2006. Изд-во Химэкс Лимитед. С-П. 92с.[Epoxy resins. Compounds. Hardeners. Accelerators. Plasticizers. Active diluents. 2006. Himex Publishing House Limited. S-P. 92 p.]
23. Аскадский А.В., Белошенко В.А., Бычко К.А. и др. Гидростатическая экструзия ароматических поликетонов//Высокомолекулярные соединения. Сер.А. – 1994. Т.36, №7. – С. 1143-1147.[Askadsky A.V., Beloshenko V.A., Bychko K.A. and others. Hydrostatic extrusion of aromatic polyketones// High-molecular compounds. Ser.A. – 1994. Vol.36, No. 7. – P. 1143-1147.]

Информация об авторах

Строганов Виктор Федорович, доктор химических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г.Казань, Российская федерация

Email:svf08@mail.ru

Страхов Дмитрий Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г.Казань, Российская федерация

Email:strachovde@mail.ru

Строганов Илья Викторович, кандидат технических наук, доцент, Казанский национальный технологический университет г.Казань, Российская федерация

Email:tarhankut68@mail.ru

Ахметшин Алмаз Салимович, администрация Смоленской области, заместитель губернатора Смоленской области, Российская федерация

Information about the authors

Viktor F. Stroganov, Doctor of chemical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Civil Engineering, Kazan, Russian Federation.

Email:svf08@mail.ru

Dmitry E. Strakhov, candidate of technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Civil Engineering, Kazan, Russian Federation.

Email:strachovde@mail.ru

Ilya V. Stroganov, candidate of technical sciences, associate professor, Kazan National Research Technological University, Kazan, Russian Federation.

Email:tarhankut68@mail.ru

Almaz S. Akhmetshin, administration of the Smolensk Region, Deputy Governor of the Smolensk Region, Russian Federation

УДК: 691.327-431
DOI: 10.52409/20731523_2023_3_86
EDN: FUMXDN



Проблемы высолообразования в бетонных вибропрессованных тротуарных плитах

О.В. Хохряков¹, Е.Г. Гуляков¹, В.Г. Хозин¹, А.Ю. Беляков¹

¹ Казанский государственный архитектурно-строительный университет
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация: В настоящее время бетонные изделия для покрытий тротуаров активно применяются в благоустройстве. Их отличает выразительность, простота производства и укладки, различная цветовая гамма, а также широкая номенклатура. На протяжении всего времени эксплуатации изделия находятся под влиянием многих видов воздействий, к которым относятся осадки, солнечное облучение, высушивание, попеременное замораживание и оттаивание, механический износ, противогололедные реагенты и т.д. Чаще всего на лицевой поверхности появляются дефекты в виде выцветов и высолообразований, хотя их наличие не влияет на физико-механические свойства, однако снижает эстетическое качество. Целью данного исследования является анализ современных данных и проведение физико-химических испытаний бетона тротуарных плит для выявления причин высолообразования и изменения их цвета. Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

1. Выполнить анализ литературных данных о причинах высолообразования в цементобетонных изделиях.
2. Определить изменение цвета бетонных плит;
3. Провести сравнительные микроскопические исследования поверхности бетонных плит;
4. Изучить рН-среды водного раствора, в котором находились образцы бетона;
5. Провести качественную оценку высолообразования;
6. Определить содержание ионов хлора в бетонных плитах.

Результаты. В результате исследований были определены основные факторы, вызывающие высолообразование и изменение цвета тротуарных плит. При сравнении внешнего вида эталонных изделий с образцами, отобранными с объекта, выявлена повышенная разница в цвете их поверхности между ними. Выявлена основная причина высолообразования – выщелачивание гидратной извести, которое дополняется также миграцией на поверхность активных веществ при действии влаги на изделия вследствие их повышенной пористости. На основании результатов исследования разработаны рекомендации по корректировке технологии производства тротуарных плит.

Выводы. Ценность результатов состоит в выявлении факторов, приводящих к высолообразованию и изменению цвета бетонных плит, и в обосновании способов их устранения.

Ключевые слова: бетон, высолообразование, мелкозернистый цементный бетон, плиты для тротуаров, вибропрессованные плиты

Для цитирования: Хохряков О.В., Гуляков Е.Г., Хозин В.Г., Беляков А.Ю. Проблемы высолообразования в бетонных вибропрессованных тротуарных плитах // Известия КГАСУ, 2023, № 3(65), с. 86-100, DOI: 10.52409/20731523_2023_3_86, EDN: FUMXDN

Problems of efflorescence in concrete vibro-pressed paving slabs

O.V. Khokhryakov¹, E.G. Gulyakov¹, V.G. Khozin¹, A.Yu. Belyakov¹

¹ Kazan State University of Architecture and Engineering
Kazan, Russian Federation

Abstract: Currently, concrete products for sidewalk coverings are actively used in landscaping. They are distinguished by their expressiveness, ease of production and installation, different colors, as well as a wide range. Throughout the entire period of operation, the products are under the influence of many types of influences, which include precipitation, solar radiation, drying, alternating freezing and thawing, mechanical wear, de-icing reagents, etc. Most often, defects appear on the front surface in the form of efflorescence and discoloration, although their presence does not affect the physical and mechanical properties, but reduces the aesthetic quality. The purpose of this study is to analyze modern data and conduct physical and chemical tests of concrete paving slabs to identify the causes of efflorescence and changes in their color. To achieve this goal, the following tasks were identified:

1. Perform an analysis of literature data on the causes of efflorescence on cement concrete products.
2. Determine the color change of concrete slabs;
3. Conduct comparative microscopic studies of the surface of concrete slabs;
4. Study the pH environment of the aqueous solution in which the concrete samples were located;
5. Conduct a qualitative assessment of efflorescence;
6. Determine the content of chlorine ions in concrete slabs.

Results. As a result of the research, the main factors causing efflorescence and discoloration of paving slabs were identified. When comparing the appearance of reference products with samples taken from the site, an increased difference in the color of their surface was revealed between them. The main cause of efflorescence has been determined - leaching of hydrated lime, which is also supplemented by the migration of active substances to the surface when moisture acts on the products due to their increased porosity. Based on the results of the study, recommendations were developed for adjusting the production technology of paving slabs.

Conclusions. The value of the results lies in identifying the factors leading to efflorescence and discoloration of concrete slabs, and in justifying ways to eliminate them.

Key words: concrete, efflorescence, fine-grained cement concrete, slabs for sidewalks, vibropressed slabs

For citation: Khokhryakov O.V., Gulyakov E.G., Khozin V.G., Belyakov A.Yu. Problems of efflorescence in concrete vibro-pressed paving slabs // News KSUAE, 2023, № 3(65), p. 86-100, DOI: 10.52409/20731523_2023_3_86, EDN: FUMXDN

1. Введение

Причины высолообразования на поверхности бетонных изделий подразделяются по времени появления – на первичные и вторичные. Первичные высолы проявляются в процессе структурообразования бетона на ранней стадии твердения. Вторичные связаны с миграцией влаги с водорастворимыми солями на лицевую поверхность изделий в период их эксплуатации.

К основным факторам, приводящим к высолообразованию на поверхности бетона [1], относят:

1. Состав и свойства сырьевых материалов, используемых для приготовления бетона;
2. Структура бетона;
3. Технология прессования изделий и организация складского хранения;
4. Воздействие внешних факторов.

Основным компонентом, из-за которого на поверхности изделий появляются т.н. белесые отложения, является цементное вяжущее. Как правило, в качестве такого применяется высокоактивный бездобавочный портландцемент класса по прочности на сжатие не ниже 42,5. Его расход для мелкозернистого бетона лицевого слоя принимается весьма высоким, ориентировочно - 440-460 кг на 1 м³. При этом современные портландцементы выпускаются с относительно большим содержанием минерала алита и обладают повышенной тониной помола 360-420 м²/кг.

Всё это приводит к образованию высокой доли «балластной» гидролизной извести Са(ОН)₂ (портландит), которая выделяется в процессе гидратации портландцемента и откладывается в несвязанном виде в порах и межзерновых прослойках цементного камня [2]. Атмосферная влага, попадающая на поверхность бетона, приводит к растворению Са(ОН)₂ и постепенной её миграции в направлении воздействия этой влаги – к лицевой поверхности изделия. После испарения влаги портландит, имея природный белый цвет, создает на поверхности бетона выцветы (высолы) [3]. Процесс их появления справедливее назвать выщелачиванием, а не высолообразованием. При длительном нахождении на поверхности бетонных изделий известь карбонизируется под воздействием углекислого газа с образованием нерастворимого СаСО₃ [4,5]. Он переходит в более растворимый бикарбонат кальция Са(НСО₃)₂, однако это процесс протекает в течение весьма длительного периода времени.

Для уменьшения доли свободного портландита принято вводить в состав бетона активные минеральные добавки (микрокремнезем, зола-уноса и др.) [6,7,8]. Они связывают его в нерастворимые гидросиликаты кальция по пуццолановому механизму взаимодействия [9,10]. Однако эта химическая реакция при нормальных условиях протекает очень медленно, что не позволяет в полной мере избавиться от белесых щелочных налётов на поверхности бетонных изделий [11].

Для борьбы с высолообразованием в качестве вяжущего для бетона рекомендуется использовать цементы типа ЦЕМ II...V, которые содержат в своём составе различные минеральные добавки. Несмотря на это, из-за низкой активности этих цементов на ранней стадии твердения и, соответственно, замедленного темпа набора прочности бетона, практического применения данный способ не нашёл. Эффективным можно было бы считать применение карбонатных цементов низкой водопотребности [12].

Иные водорастворимые соединения, например, оксиды щелочных металлов, содержащиеся в цементе и заполнителях, или соли, находящиеся в воде затворения, не оказывают существенного влияния на высолообразование, поскольку содержание этих веществ незначительно.

Вторым негативным фактором, ускоряющим высолообразование на поверхности бетона, является неоднородная структура бетона с повышенной открытой и капиллярной пористостью. Главным образом, это связано с нерационально подобранным гранулометрическим составом заполнителей, повышенным водоцементным отношением, высокой удельной поверхностью цемента и пр. Относительно низкая плотность ускоряет миграцию влаги с растворенными в ней солями через «тело» бетона [12,13]. В связи с этим рекомендуется проектировать состав бетона с наиболее плотной структурой, при которой минимизируется объем поровой жидкости, способной к мигрированию к поверхности изделия при высушивании.

Третий фактор, приводящий к появлению высолов (выцветов) на поверхности изделий, связан с технологией их формования. Дело в том, что нарушение режима прессования может привести к недоуплотнению бетона, вследствие чего его структура приобретает повышенную пористость [14,15]. Как и в предыдущем случае это ускоряет процесс массопереноса влаги через «тело» бетона с закономерным образованием высолов на поверхности изделий [16].

Высолообразование также происходит при неблагоприятных условиях хранения на складе готовой продукции. Например, быстрая упаковка свежесформованных изделий в стрейч-пленку провоцирует значительное образование конденсата. А ненадежное укрытие или прокол этой пленки приводит к прямому попаданию атмосферной влаги на изделия. В результате высолы на них проявляются до отгрузки потребителю. Наибольшему высолообразованию в транспортной паллете подвержены те участки, из

которых влага удаляется относительно дольше [17]. Это касается мест соприкосновения изделий, а также нижних рядов паллеты.

Четвертый фактор, приводящий к опасности высолообразования, главным образом, связан с внешними воздействиями, которые возникают по разным причинам. Например, известно, что значительное содержание солей-электролитов может находиться в грунтовой влаге (сульфатные, хлористые и др.). С другой стороны, карбонатные соли могут проникать в бетонные изделия из щебня осадочного происхождения, который засыпают в декоративных целях вблизи уложенного тротуарного покрытия. В-третьих, в холодный период года эти покрытия подсыпают антигололёдными реагентами, представляющими собой смесь неорганических солей. Возможна миграция щелочных соединений (портландита, соли натрия и калия) или противоморозных солей на поверхность бетонных изделий из подстилающих монтажных слоёв, изготавливаемых из цементного раствора. Немаловажно создавать уклоны или дренажные системы тротуарных покрытий, чтобы вода не застаивалась и не провоцировала образование высолов.

Как следует из выполненного обзора, причин, приводящих к негативному появлению высолов на поверхности бетонных изделий, множество. Очевидно, что для устранения потенциальных разногласий и спорных моментов Заказчик и завод-изготовитель должны своевременно учитывать все вышеприведенные факторы, как на стадии производства изделий [18,19], так и при укладке и эксплуатации тротуарного покрытия.

Цель данного исследования – выявить причину высолообразования, изменения цвета плит бетонных тротуарных и разработать рекомендации по их предотвращению.

Для достижения поставленной цели определены следующие задачи:

1. Выполнить анализ причин высолообразования на поверхности цементобетонных плит. Привести требования современной нормативной документации;
2. Определить изменение цвета бетонных плит колориметрическим методом;
3. Провести сравнительные микроскопические исследования поверхности бетонных плит;
4. Смоделировать условия эксплуатации плит на образцах мелкозернистого бетона и изучить pH-среды водного раствора, в котором они находились;
5. Провести качественную оценку высолообразования маркерным фенолфталеиновым раствором.
6. Определить содержание ионов хлора в бетонных плитах.

2. Материалы и методы

Бетонные плиты (эталонные) представляют собой двухслойные изделия. Верхний гладкий лицевой слой – пигментированный мелкозернистый бетон с декоративными заполнителями, который был механически обработан путем ступенчатого абразивного шлифования. Нижний несущий слой – подосновный мелкозернистый бетон серого цвета без декоративных заполнителей и поверхностной обработки. На боковых гранях предусмотрены шовообразователи для удобства укладки смежных изделий. Плиты имеют прямоугольную конфигурацию длиной 600 мм, шириной 300 мм и толщиной 80 мм. Толщина лицевого слоя варьируется в интервале 5-10 мм. Плиты изготовлены методом вибропрессования, условия твердения – нормальные. Цвет лицевого слоя плит: черный, белый, серый.

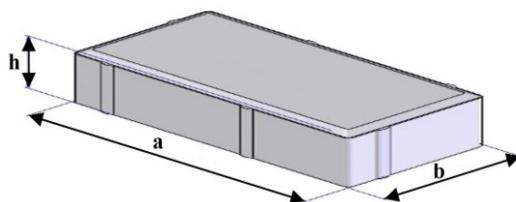


Рис. 1. Внешний вид бетонных плит (иллюстрация авторов)
Fig. 1. Appearance of concrete slabs (illustration by the authors)

Бетонные плиты (основные) по внешнему виду и геометрическим размерам соответствуют эталонным, однако визуально имеют внешние эстетические дефекты. Во-первых, белесые солевые образования, которые в хаотичном порядке проступили на лицевой поверхности изделий. Во-вторых, потеря первоначального заводского цвета верхнего лицевого слоя, который стал тусклым и невыразительным.

Для испытаний были предоставлены материалы с завода-изготовителя. В табл. 1 представлены расходы сырьевых материалов для нижнего несущего и верхнего лицевого слоев плит (белый).

Таблица 1

Составы мелкозернистых бетонных смесей верхнего и нижнего слоев плит

Тип компонента	Расход материала, кг/м ³	
	для нижнего несущего слоя	для верхнего лицевого слоя
Портландцемент серый (ПЦ)	360	-
Портландцемент белый (БЦ)	-	450
Песок кварцевый обогащенный (ПК)	1500	450
Щебень гранитный фр. 4-8 мм (ЩГ)	500	-
Отсев гранитный фр. 2-5 мм	-	35
Песок кварцевый мелкий ($M_k=0,8-1,1$)	-	620
Мрамор белый фр.3-5 мм	-	80
Мрамор серый фр.3-5 мм	-	300
Мрамор серый фр.5-10 мм	-	170
Пигмент белый	-	22,5
Добавка Муран 19	1,7	-
Добавка Муран 17	-	1,7
Вода затворения (В/Ц=34 %)	122	153

Согласно нормативно-технической документации завода-изготовителя, изделия имеют следующую область применения: устройство и мощение сборных покрытий тротуаров, пешеходных и садово-парковых дорожек, эксплуатируемых кровель зданий и сооружений, газонов, пешеходных площадей и посадочных площадок общественного транспорта, территорий для стоянки автотранспорта, велосипедных дорожек, улиц с малоинтенсивным движением и др.

Первоначально была выполнена сравнительная оценка изменения цвета бетонных плит за время их эксплуатации. Для этого был использован Колориметр CR20 (рис. 2), в устройстве которого применена геометрия измерения 45/0, которая максимально приближена к человеческому восприятию.



Рис. 2 – Схема установки Колориметра при измерении (иллюстрация авторов)

Fig. 2 – Scheme of installation of the Colorimeter during measurement (illustration by the authors)

Колориметр работает в системе CIELab, в которой каждый цвет описан тремя числами, обозначающими его положение в трёхмерном пространстве. Первое число или величина L указывает на уровень яркости цвета. Второе и третье число (a и b) определяют собственно оттенок. Светлота задана координатой L (изменяется от 0 до 100, то есть от самого темного до самого светлого), хроматическая составляющая – двумя декартовыми координатами a (цвета в диапазоне от зелено-голубого до красно-

малинового) и b (цвета в диапазоне от голубого до желтого). При этом разница в цветах между измеряемыми эталоном и образцом вычисляется по «формуле цветового различия», которая является математическим представлением, позволяющим численно выразить различие между двумя цветами в колориметрии.

Цветоразность вычисляется по формуле, используя координаты эталонного (L_1^*, a_1^*, b_1^*) и основного (L_2^*, a_2^*, b_2^*) образцов в цветовом пространстве $L^*a^*b^*$:

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(L_2^* - L_1^*)^2 + (a_2^* - a_1^*)^2 + (b_2^* - b_1^*)^2} \quad (1)$$

Если значение ΔE_{ab}^* , показываемое на интерфейсе прибора, превышает 2,3 [20], то цветоразница между измеряемыми участками эталонных и основных образцов высокая и различается невооруженным глазом.

На рис. 3 представлена схема точек расположения колориметра для оценки цветового различия эталонных и основных образцов. Измерения проводили попарно в семи разных точках для бетонных плит белого и черного цветов.

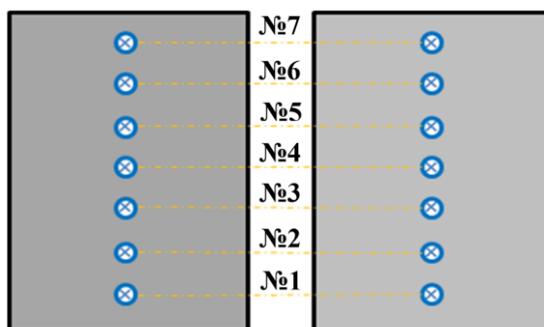


Рис. 3 – Схема расположения точек для замера цветового различия
слева – эталонный образец, справа – основной образец (иллюстрация авторов)

Fig. 3 – Scheme of points for measuring color differences
left – reference sample, right – basic sample (illustration by the authors)

Изучение состояния поверхности эталонных бетонных плит, предоставленных заводом-изготовителем и плит, отобранных с объекта, осуществляли по микрофотографиям, полученных с помощью микроскопа Dewang CSW02-1000X.

С помощью расчетно-экспериментального метода проанализированы два состава бетона, которые были переданы заводом-изготовителем (табл. 1). Расчет бетона нижнего несущего слоя выполнялся по следующей схеме. Для начала определяется объем цементного теста (л) в 1 м^3 бетона плит по формуле:

$$V_{\text{цт}} = \text{ПЦ} / \rho_{\text{ц}} + V, \quad (2)$$

где: ПЦ – расход серого цемента;

$\rho_{\text{ц}}$ – истинная плотность цемента, кг/л;

V – расход воды на 1 м^3 .

Содержание вовлеченного воздуха не учитывали, поскольку по ГОСТ 17608-2017 для изделий, изготавливаемых методом вибропрессования, оно не нормируется.

Далее выполнялся расчет пустотности (%) смеси обогащенного песка и щебня гранитного:

$$П = (1 - \rho_{\text{см}} / \rho) \cdot 100, \quad (3)$$

$$\rho = k_{\text{п}} \cdot \rho_{\text{п}} + k_{\text{щ}} \cdot \rho_{\text{щ}}, \quad (4)$$

где: $\rho_{\text{щ}}$ – истинная плотность гранитного щебня равная 2,7 кг/л;

$\rho_{\text{п}}$ – истинная плотность обогащенного песка равная 2,65 кг/л;

ρ – усредненная истинная плотность смеси песка и щебня, кг/л;

$k_{\text{п}}$, $k_{\text{щ}}$ – доли песка и щебня в их смеси.

$\rho_{\text{см}}$ – насыпная плотность смеси песка и щебня в уплотненно-вибрированном состоянии равная 1,89 кг/л.

Плотность $\rho_{\text{см}}$ определяется экспериментально по методике ГОСТ 8735-88 (п. 9.1) с тем отличием, что тщательно перемешанная смесь песка и щебня не насыпалась совком в

предварительно взвешенный мерный цилиндр с высоты 10 см, а виброуплотнялась в нём для максимального заполнения.

Расчет объема (л) смеси песка и щебня V в уплотненно-вибрированном состоянии выполнялся по формуле:

$$V = (\text{ПК} + \text{ЩГ}) / \rho_{\text{см}}, \quad (6)$$

где ПК – расход песка кварцевого обогащенного в 1 м^3 бетона плит (табл. 1),

ЩГ – расход щебня гранитного фр. 4-8 мм в 1 м^3 бетона плит (табл. 1).

Расчет объема пустот (л) смеси песка и щебня:

$$V_{\text{п}} = (V \cdot \Pi) / 100 \quad (7)$$

На основании сравнения физического заполнения объема пустот песка и щебня $V_{\text{п}}$ объемом цементного теста $V_{\text{цт}}$ делается вывод о величине пористости бетона плит для нижнего несущего слоя и верхнего лицевого слоя (белый).

Для установления причины высолообразования на поверхности бетонных плит были изучены кислотно-основные свойства водного раствора по водородному показателю pH. Для его оценки моделировали условия эксплуатации бетона плит. Для этого с помощью лабораторной виброплощадки и пригруза массой 5 кг были заформованы образцы-кубы размером $7 \times 7 \times 7$ см из мелкозернистого бетона по рецептуре и технологии, приближенной к технологии производства плит заводом-изготовителем. Изготовлены серии образцов бетона нижнего несущего слоя и верхнего лицевого слоя черного, белого и серого цветов. Образцы твердели в течение 14 суток в нормально-влажностных условиях в камере типа КНТ с автоматически поддерживаемой влажностью (не менее 98 %) и температурой внутренней среды (22 ± 2 °C). По истечении указанного срока образцы погрузили в питьевую воду на половину высоты на трое суток, тем самым создавая условия капиллярного водопоглощения. После выдерживания отбирали воду, в которой они хранились, и определяли её водородный показатель pH. Для его измерения использовали стационарный pH-метр «Hanna pH 213», имеющего диапазон измерения pH от -2,00 до 16,00 в интервале температур 9,9...120,0 °C.

Наиболее простым и показательным способом оценки состояния поверхности бетонных плит является их обработка маркерным 1-% фенолфталеиновым раствором, который обычно применяется для установления карбонизации бетона. Это процесс взаимодействия гидратной извести бетона с углекислым газом, в результате которого происходит образование карбоната кальция со снижением pH жидкой фазы бетона. Как известно, при остаточном содержании гидроксида кальция раствор фенолфталеина из прозрачного окрашивается в малиновый цвет.

Оценка содержания ионов хлора в пробах 10-% водных растворов, подготовленных из порошка бетона плит, основывается на прямом потенциометрическом методе измерения с помощью лабораторного иономера И-160МИ [21].

Перед оценкой содержания ионов хлора были приготовлены градуировочные растворы из исходного водного раствора концентрации $0,1 \text{ моль/дм}^3$ хлорида калия (х.ч.), который получали путем растворения навески массой 7,455 г этой соли в 1 дм^3 бидистиллированной воды. Градуировочные растворы готовили с концентрацией хлорида калия 10^{-2} , 10^{-3} и 10^{-4} моль/дм³. К растворам добавляли фоновый электролит для регулирования ионной силы (БРОИС), который готовили растворением 101,1 г KNO_3 в колбе емкостью 1 дм^3 . По результатам измерений строили градуировочный график, в котором по оси ординат откладывали содержание ионов хлора, а по оси абсцисс – значения потенциалов в милливольтках.

Содержание ионов хлора определяли путем измерения потенциала водных растворов с порошком бетона. Эти порошки готовили путем дробления мелкозернистого бетона лицевого слоя плит (черная, серая, белая) с последующим тонким растиранием пестиком измельченного бетона в полусферической фарфоровой ступке ($\varnothing 100$ мм). Из порошков готовили 10-% водные растворы, которые отстаивали не менее одного часа, отфильтровывали и проводили измерения с помощью иономера.

3. Результаты

Результаты определения цветового различия эталонных и основных образцов представлены в табл. 2 и табл. 3.

Таблица 2

Результаты цветоразности эталонных и основных бетонных плит белого цвета

№ измер.	Наименование образца	Координаты цветового пространства CIE Lab			Цветоразность, ΔE^*_{ab}
		Светлота, L	Положение цвета в диапазоне от зеленого до красного, a	Положение цвета в диапазоне от синего до желтого, b	
1	эталонный	74,1	0,1	6,1	9,9
	основной	65,2	1,1	10,4	
2	эталонный	74,3	0,4	6,8	10
	основной	65,1	1,2	10,4	
3	эталонный	72,9	0,7	7,1	7,5
	основной	65,5	0	5,7	
4	эталонный	73,3	0,3	7	9,1
	основной	64,9	1,4	10,3	
5	эталонный	74,5	0,2	6,3	9,3
	основной	65,8	0,9	9,6	
6	эталонный	65,7	0	4,3	6,6
	основной	62,1	1,1	9,8	
7	эталонный	74,9	0,2	6,6	10,4
	основной	65,2	1	10	
Среднее значение:					9,0

Таблица 3

Результаты цветоразности эталонных и основных бетонных плит черного цвета

№ измер.	Наименование образца	Координаты цветового пространства CIE Lab			Цветоразность, ΔE^*_{ab}
		Светлота, L	Положение цвета в диапазоне от зеленого до красного, a	Положение цвета в диапазоне от синего до желтого, b	
1	эталонный	74,1	0,1	6,1	9,9
	основной	65,2	1,1	10,4	
2	эталонный	74,3	0,4	6,8	10
	основной	65,1	1,2	10,4	
3	эталонный	72,9	0,7	7,1	7,5
	основной	65,5	0	5,7	
4	эталонный	73,3	0,3	7	9,1
	основной	64,9	1,4	10,3	
5	эталонный	74,5	0,2	6,3	9,3
	основной	65,8	0,9	9,6	
6	эталонный	65,7	0	4,3	6,6
	основной	62,1	1,1	9,8	
7	эталонный	74,9	0,2	6,6	10,4
	основной	65,2	1	10	
Среднее значение:					10,2

На рис. 4 представлены микроснимки поверхности бетона плит с лицевым слоем черного цвета.

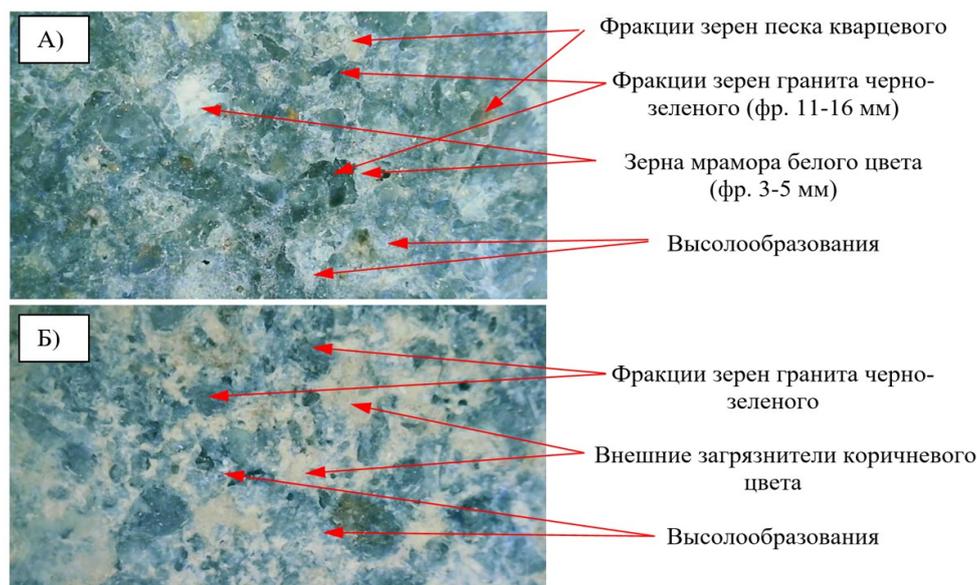


Рис. 4. Микроснимок лицевой поверхности бетона плит «черного» цвета (А – предоставленные заводом-изготовителем, Б – отобранные с объекта) (иллюстрация авторов)
 Fig. 4. Microphotograph of the front surface of concrete slabs of “black” color (A – provided by the manufacturer, B – selected from the site) (illustration by the authors)

Далее были проанализированы микроснимки плит белого цвета, часть из которых предоставлены заводом-изготовителем, а часть привезены Заказчиком с объекта.

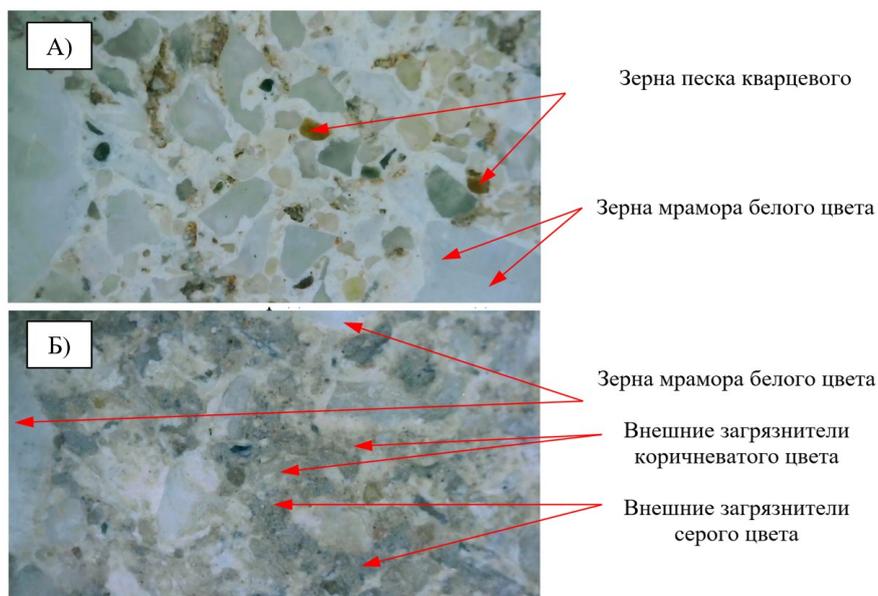


Рис. 5. Микроснимок лицевой поверхности бетона плит «белого» цвета, (А – предоставленные заводом-изготовителем, Б – отобранные с объекта) (иллюстрация авторов)
 Fig. 5. Micrograph of the front surface of concrete slabs of “white” color, (A – provided by the manufacturer, B – selected from the site) (illustration by the authors)

Результаты измерения водородного показателя рН бетонных образцов представлены в табл. 4.

Таблица 4

Кинетика рН воды, отобранной после выдерживания образцов бетона

Время выдержки в питьевой воде	Значение рН воды для				
	-	нижнего слоя	лицевого слоя с цветом		
			черный	белый	серый
3 суток	7,5±0,1	11,1±0,1	10,7±0,1	10,9±0,1	11,0±0,1

Ниже на рис. 6 представлены фотоснимки бетонных плит с маркерным раствором, отобранных на объекте.

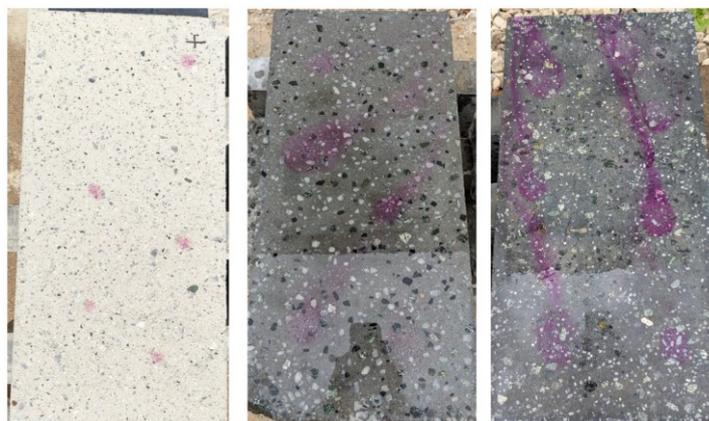


Рис. 6. Фотоснимки поверхностей бетонных плит, обработанных 1-% фенолфталеиновым раствором (слева – «черная» плита, в середине – «белая» плита, справа – «серая» плита) (иллюстрация авторов)

Fig. 6. Photographs of the surfaces of concrete slabs treated with 1% phenolphthalein solution (on the left is a “black” slab, in the middle is a “white” slab, on the right is a “gray” slab) (illustration by the authors)

Результаты определения среднего содержания ионов хлора из двух проб представлены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты измерений содержания ионов хлора

Содержание ионов хлора, %					
в калибровочных растворах с концентрацией хлорида калия, моль/дм ³			в 10-% водных растворах с порошком бетона для лицевого слоя		
10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	белый	серый	черный
0,005	0,05	0,5	0,000012	0,000011	0,000012

4. Обсуждение

Анализ современной нормативной документации по бетонным и железобетонным изделиям показывает, что такой эстетический дефект как выцветы (высолы) фигурирует лишь в одном государственном стандарте и двух региональных документах:

1. ГОСТ 17608-2017 «Плиты бетонные тротуарные. Технические условия»;
2. РМД 32-18-2016 Рекомендации по применению мощения при устройстве покрытий территорий жилой и общественно-деловой застройки, АПВИ, Правительство Санкт-Петербурга, 2016;
3. СТО 58357155-001-2016 «Камни и плиты мощения бетонные вибропрессованные».

Согласно этим документам, выцветы (высолы) на поверхности бетонных изделий не являются дефектом и не влияют на их физико-механические свойства (прочность, морозостойкость, истираемость) [22]. Практика показывает, что эти высолы исчезают самостоятельно под воздействием естественных атмосферных факторов в течение двух лет в результате карбонизации извести и смывания других видов высолов осадками (дождь, снег).

Обращает на себя внимание определение термина «выцветы (высолы)», которое дается в указанных документах. Они поясняют, что основным источником этих эстетических дефектов являются отложения кристаллов растворимых соединений на поверхности бетона, образование которых зависит лишь от его состава. При этом зависимость появления выцветов (высолов) от таких внешних факторов как воздействие

грунтовых вод, антигололедных реагентов, атмосферных осадков, веществ из «монтажных» материалов и др. в указанных документах не упоминается.

Как было показано выше, в действующей нормативной документации образование выцветов (высолов) ставится лишь в зависимость от состава мелкозернистого бетона, используемого для производства изделий, а интенсивность высолообразования определяется пористой структурой этого бетона.

Как видно из табл. 2 и табл. 3, цветоразность ΔE^*ab бетонных плит эталонных и основных образцов весьма высокая. Для белых и черных плит, соответственно, она равна 9,0 и 10,2, что существенно превышает допустимое значение 2,3, свыше которого различие внешнего вида образцов наблюдается невооруженным глазом.

Как видно на микроснимке (рис. 3, А), структура поверхности лицевого слоя бетона «черных» плит, предоставленных заводом-изготовителем, представлена зернами гранита черно-зеленого, мрамора белого и песка кварцевого коричневого цвета. Между зернами заполнителей видны тонкие белесые прослойки, что позволяет их отнести к высолообразованиям. Отличительной особенностью структуры поверхности бетонной плиты, отобранных с объекта (рис. 4, Б), является наличие значительной доли образований коричневого цвета. Они не относятся к компонентам бетона и, очевидно, появились в процессе эксплуатации изделий, что позволяет с уверенностью отнести эти образования к внешним загрязнителям (грунт, песок и пр.)

Структура поверхности бетона «белых» плит (рис. 5, А), предоставленных заводом-изготовителем, в основном представлена крупными и мелкими щебневидными зернами белого цвета – мрамором и частично коричневатыми овальными включениями с четко очерченными гранями, которые, очевидно, можно отнести к песку кварцевому. В то же время, плиты, которые эксплуатировались на объекте, заметно потеряли первоначальную яркость и выразительность (рис. 5 Б). В промежутках между белыми зернами мрамора обнаруживаются посторонние вещества сероватого цвета, которые отсутствуют на эталонных образцах. Также видны загрязнители коричневатого цвета, которые распределены в виде тонких прослоек на поверхности бетона. Предположительно, эти два загрязнителя представляют собой монтажный цементно-песчаный раствор, который попал на поверхность плит, например, при их укладке на объекте.

Из расчета сравнения физического заполнения объема пустот песка и щебня $V_{п}$ объемом цементного теста $V_{цт}$ следует, что для нижнего несущего слоя объем пустот смеси песка и щебня (314 л) физически не заполняется цементным тестом (238 л) на 76 л. Следовательно, бетон нижнего несущего слоя обладает повышенной структурной пористостью, которая составляет 7,6 % от 1 м³ бетона плит. Очевидно, что повышенная пористость является тем негативным фактором, который ускоряет процесс массопереноса влаги через «тело» бетона и закономерно приводит к высолообразованию на поверхности изделий. Бетон же верхнего лицевого слоя обладает относительно низкой структурной пористостью, которая составляет всего 0,7 % от 1 м³ бетона плит.

Как следует из данных табл. 4, за относительно короткий период времени показатель рН питьевой воды, в которой выдерживались бетонные образцы, существенно увеличился с 7,5 до ~11. Повышенный уровень рН свидетельствует о высокой концентрации в растворе гидроксид-ионов (ОН⁻) в сравнении с ионами водорода (Н⁺) и, соответственно, о том, что водный раствор стал щелочным. Очевидно, что причиной этого является миграция извести Са(ОН)₂, которая образуется при гидратации цементного вяжущего, из бетонных образцов с последующим её растворением в воде.

Поскольку при качественной оценке высолообразования маркерным фенолфталеиновым раствором бетонные плиты окрашиваются в яркий малиновый цвет (рис. 6), следовательно, на поверхности содержится значительная доля гидроксида кальция и процесс её карбонизации не завершен. Очевидно, этот процесс является одной из причин появления так называемых выцветов (высолов).

Как следует из результатов определения среднего содержания ионов хлора (табл. 5), пробы порошков бетона содержат незначительную долю ионов хлора, следовательно, повлиять на высолообразование они не могли.

5. Заключение

По результатам выполненного исследования следуют следующие выводы:

1. Согласно современной нормативной документации высолы (выцветы), несмотря на ухудшение внешнего вида тротуарных изделий, на их поверхности допускаются (п.4.6.4 ГОСТ 17608-2017). При этом они не влияют на эксплуатационные свойства (прочность, морозостойкость, истираемость) этих изделий. Тем не менее, внешний вид, цвет и рельеф лицевых поверхностей плит должны соответствовать эталонам предприятия-изготовителя;

2. Проанализированы литературные данные и описаны основные факторы, приводящие к высолообразованию: состав и свойства сырьевых материалов, характер и объем пористой структуры бетона, технология прессования изделий и организация складского хранения и воздействие внешних факторов.

3. Выявлено, что заводские эталонные плиты и плиты, отобранные с объекта, имеют повышенную цветоразницу. Микроскопическими исследованиями показано, что они имеют на поверхности внешние загрязнители и белесые отложения.

4. Судя по модельным испытаниям условий эксплуатации плит и качественной оценке маркерным фенолфталеиновым раствором, основной причиной т.н. высолообразования является выщелачивание гидратной извести, которая образуется при гидратации высокоактивного цемента и при действии влаги мигрирует к поверхности этих плит.

5. Расчетно-экспериментальный анализ топологической структуры бетона показывает, что он обладает пористостью, особенно в нижнем слое. Очевидно, что через неё при действии влаги происходит миграция активных веществ с закономерным высолообразованием на поверхности плит. В связи с этим рекомендуется оптимизировать гранулометрический состав заполнителей или использовать в составе бетона тонкодисперсные наполнители, например, кремнеземистые (микрокремнезём, зола-уноса, метакраин и др.), которые будут уплотнять структуру бетона и частично связывать гидратную известь в нерастворимые соединения.

6. Для предотвращения высолообразований на поверхности изделий рекомендуется в технологии их производства предусмотреть узел по нанесению гидрофобизирующих пропиток на кремнийорганической или бутадиев-стирольной основе, которые создают барьер для миграции активных веществ через «тело» бетона.

Список литературы / References

1. Костиков Ю.Б. Высолы на поверхности бетонных вибропрессованных изделий. Ассоциация производителей вибропрессованных изделий для строительства, мощения и благоустройства (АПВИ). Санкт-Петербург. – 2018. – 18 с.
[Kostikov Yu.B. Efflorescence on the surface of concrete vibro-pressed products. Association of Manufacturers of Vibropressed Products for Construction, Paving and Landscaping (APVI). Saint Petersburg. – 2018. – 18 p.]
2. Сулейманова Л. А., Малукова М. В. Высолы (выцветы) на поверхности бетонных изделий // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2012. – № 3. – С. 28–31.
[Suleymanova L. A., Malyukova M. V. Efflorescence (fade) on the surface of concrete products // Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. – 2012. – № 3. – P. 28–31.]
3. Efflorescence processes in exterior wall surface of buildings / V. Vinichenko, V. A. Ryazanova, A. I. Gabitov [et al.] // Materials Science Forum. – 2019. – Vol. 968. – P. 115-121. – DOI 10.4028/www.scientific.net/MSF.968.115. – EDN UPJOLU.
4. Анощенко, Н. П. Причины возникновения высолов на стенах и методы их устранения / Н. П. Анощенко, Е. А. Анощенко, С. В. Шарина // Достижения и перспективы научно-инновационного развития АПК : сборник статей по материалам II Всероссийской (национальной) научно-практической конференции с международным участием, Курган, 18 февраля 2021 года. – Курган: Курганская государственная сельскохозяйственная академия им. Т.С. Мальцева, 2021. – С. 485-490. – EDN SJYWBJ.
[Anoshchenko, N. P. Causes of efflorescence on walls and methods for their elimination / N. P. Anoshchenko, E. A. Anoshchenko, S. V. Sharina // Achievements and prospects for

- scientific and innovative development of the agro-industrial complex: collection of articles based on materials II All-Russian (national) scientific and practical conference with international participation, Kurgan, February 18, 2021. – Kurgan: Kurgan State Academy of Agriculture named after TS Maltsev, 2021. – P. 485-490. – EDN SJYWBJ.]
5. Захаров, А. В. Карбонатно-сульфатные образования в подвале нового здания Института геологии и геохимии УРО РАН / А. В. Захаров, Ю. В. Ерохин, О. Л. Галахова // Минералогия техногенеза. – 2017. – № 18. – С. 82-87. – EDN ZVLKNT.
[Zakharov, A.V. Carbonate-sulfate formations in the basement of the new building of the Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences / A.V. Zakharov, Yu.V. Erokhin, O.L. Galakhova // Mineralogy of technogenesis. – 2017. – No. 18. – P. 82-87. – EDN ZVLKNT.]
 6. Метод оптимизации зернового состава дорожного цементобетона / Э. Н. Азаревич, А. С. Лобанова, Д. Р. Гарипова, Д. С. Смирнов // Техника и технология транспорта. – 2019. – № S(11). – С. 21. – EDN VYZSMX.
[Method for optimizing the grain composition of road cement concrete / E. N. Azarevich, A. S. Lobanova, D. R. Garipova, D. S. Smirnov // Transport technology. – 2019. – № S(11). – P. 21. – EDN VYZSMX.]
 7. Морозова, Н. Н. Мелкозернистые бетоны на песках различной природы / Н. Н. Морозова, Р. Р. Назипов, А. А. Лаврентьева // Теория и практика повышения эффективности строительных материалов : Сборник материалов XVI Международной научно-технической конференции молодых учёных, посвященной 80-летию со дня рождения профессора В.И. Калашникова, Пенза, 20–22 октября 2021 года / Пензенский государственный университет архитектуры и строительства. – Пенза: Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 2021. – С. 133-138. – EDN QNIQLW.
[Morozova, N. N. Fine-grained concrete on sands of various natures / N. N. Morozova, R. R. Nazipov, A. A. Lavrentieva // Theory and practice of increasing the efficiency of building materials: Collection of materials of the XVI International Scientific and Technical Conference young scientists, dedicated to the 80th anniversary of the birth of Professor V.I. Kalashnikov, Penza, October 20–22, 2021 / Penza State University of Architecture and Construction. – Penza: Penza State University of Architecture and Construction, 2021. – P. 133-138. – EDN QNIQLW.]
 8. Гиззатуллин, А. Р. Функционализированные наполнители для применения в цементных бетонах / А. Р. Гиззатуллин, Н. Н. Морозова, К. О. Нестерова // Полимеры в строительстве: научный интернет-журнал. – 2023. – № 1(11). – С. 47-57. – EDN CBGPNV.
[Gizatullin, A. R. Functionalized fillers for use in cement concrete / A. R. Gizatullin, N. N. Morozova, K. O. Nesterova // Polymers in construction: scientific Internet journal. – 2023. – № 1(11). – P. 47-57. – EDN CBGPNV.]
 9. Печёнкин, Д. И. Улучшение свойств бетона, используемого в строительстве // E-Scio. 2023. №4 (79). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/uluchshenie-svoystv-betona-ispolzuemogo-v-stroitelstve> (дата обращения: 19.09.2023).
[Pechenkin, D. I. Improving the properties of concrete used in construction // E-Scio. 2023. №. 4 (79). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/uluchshenie-svoystv-betona-ispolzuemogo-v-stroitelstve> (date of access: 09/19/2023).]
 10. Засько, В. В. Анализ причин образования высолов на вибропрессованной тротуарной плитке / В. В. Засько // Вестник Луганского национального университета имени Владимира Даля. – 2019. – № 10(28). – С. 47-51. – EDN ZVDFJA.
[Zasko, V.V. Analysis of the reasons for the formation of efflorescence on vibropressed paving slabs / V.V. Zasko // Bulletin of the Lugansk Vladimir Dahl State University. – 2019. – №. 10(28). – P. 47-51. – EDN ZVDFJA.]
 11. Hyeok-Jung, K. Effect of Red Mud Content on Strength and Efflorescence in Pavement using Alkali-Activated Slag Cement / K. Hyeok-Jung, S. P. Kang, G. Ch. Choe // International Journal of Concrete Structures and Materials. – 2018. – Vol. 12, No. 1. – P. 1-9. – DOI 10.1186/s40069-018-0258-3. – EDN HAIUBU.

12. Хозин, В. Г. Карбонатные цементы низкой водопотребности - перспективные вяжущие для бетонов / В. Г. Хозин, О. В. Хохряков, Р. К. Низамов // Бетон и железобетон. – 2020. – № 1(601). – С. 15-28. – EDN VIDDBF.
[Khozin, V. G. Carbonate cements of low water demand - promising binders for concrete / V. G. Khozin, O. V. Khokhryakov, R. K. Nizamov // Concrete and reinforced concrete. – 2020. – № 1(601). – pp. 15-28. – EDN VIDDBF.]
13. Бабков В. В., Габитов А. И., Чуйкин А. Е., Мохов А. В. Процессы высолообразования щелочной природы на фасадах зданий из вибропрессованных бетонных блоков // Башкирский химический журнал. 2010. Том 17. № 2. С. 59-62.
[Babkov V.V., Gabitov A.I., Chuikin A.E., Mokhov A.V. Processes of efflorescence of alkaline nature on the facades of buildings made of vibropressed concrete blocks // Bashkir Chemical Journal. – 2010. – Volume 17. №. 2. – P. 59-62.]
14. Regulation of fine grained concrete efflorescence process / V. V. Strokova, I. V. Zhernovsky, Y. V. Fomenko, N. V. Makarova // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vol. 357-360. – P. 1300-1303. – DOI 10.4028/www.scientific.net/AMM.357-360.1300. – EDN RFPRUF.
15. Гридунов, А. В. Применение гидрофобизаторов в строительной сфере / А. В. Гридунов, К. С. Давыдьян, М. А. Тлехусеж // Наукосфера. – 2023. – № 5-2. – С. 250-254. – DOI 10.5281/zenodo.7997014. – EDN KWUOWI.
[Gridunov, A. V. Application of water repellents in the construction sector / A. V. Gridunov, K. S. Davydyan, M. A. Tlekhusezh // Scienceosphere. – 2023. – No. 5-2. – P. 250-254. – DOI 10.5281/zenodo.7997014. – EDN KWUOWI.]
16. Rudnov, V. S. Effective ways to reduce leaching and formation of efflorescence on structures / V. S. Rudnov, V. A. Belyakov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety - 2. Building Materials and Products, Chelyabinsk, 25–27 сентября 2019 года. Vol. 687, 2. – Chelyabinsk: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 022025. – DOI 10.1088/1757-899X/687/2/022025. – EDN OBOLIP.
17. Jung-Nan Chang, A study of the mechanical properties and appearance of efflorescence in paving bricks under different curing environments / Jung-Nan Chang, Wei-Chien Wang, Her-Yung Wang, Cong-Yuan Hu // Construction and Building Materials. – 2020. – Volume 265. – 15 p. – ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120148>.
18. Погорелова, Ю. В. Повышение стойкости бетонов к коррозионному воздействию различного рода / Ю. В. Погорелова // Современная наука: актуальные проблемы и пути их решения. – 2016. – № 5(27). – С. 15-18. – EDN WCKRAN.
[Pogorelova, Y. V. Increasing the resistance of concrete to various types of corrosion / Yu. V. Pogorelova // Modern science: current problems and ways to solve them. – 2016. – №. 5(27). – P. 15-18. – EDN WCKRAN.]
19. Лунев, Р. С. Современные способы борьбы с высоломи на вибропрессованных изделиях / Р. С. Лунев, Л. Н. Боцман, Е. В. Лунева // Наукоемкие технологии и инновации : Сборник докладов Международной научно-практической конференции, Белгород, 06 октября 2017 года – 07 2016 года. Том Часть 3. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2016. – С. 248-251. – EDN YLLWLF.
[Lunev, R. S. Modern methods of combating efflorescence on vibro-pressed products / R. S. Lunev, L. N. Botsman, E. V. Luneva // Science-intensive technologies and innovations: Collection of reports of the International Scientific and Practical Conference, Belgorod , 06 October 2017 – 07 2016. Part 3. – Belgorod: Belgorod State Technological University. V.G. Shukhova, 2016. – P. 248-251. – EDN YLLWLF.]
20. Gaurav Sharma. 1.7.2 // Digital Color Imaging Handbook. — CRC Press, 2003. — ISBN 084930900X.
21. Методика определения содержания хлоридов в железобетонных конструкциях мостовых сооружений. – М.: Росавтодор, 2002, 20 с.
[Methodology for determining the content of chlorides in reinforced concrete bridge structures. – М.: Rosavtodor, 2002, 20 p.]

22. Корнеев В. И. Высолы на бетонных изделиях // Популярное бетоноведение. – 2006. – № 6 (14) // Евроблок: [сайт]. – URL: <http://euroblock.info/servis/vysoly-na-betonnyh-izdeliyah/>?/ (дата обращения: 05.09.2023).
[Korneev V.I. Efflorescence on concrete products // Popular concrete science. – 2006. – No. 6 (14) // Eurobloc: [website]. – URL: <http://euroblock.info/servis/vysoly-na-betonnyh-izdeliyah/>?/ (reference date: 09/05/2023).]

Информация об авторах

Хохряков Олег Викторович, доктор технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация.

Email: olvik@list.ru

Гуляков Евгений Геннадьевич, аспирант, инженер, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация.

Email: steepsam17@gmail.com

Хозин Вадим Григорьевич, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация.

Email: khozin.vadim@yandex.ru

Беляков Андрей Юрьевич, аспирант, заведующий лабораторией, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация.

Email: belyakoffandrrey@mail.ru

Information about the authors

Oleg V. Khokhryakov, doctor of technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.

Email: ninamor@mail.ru

Evgeny G. Gulyakov, post-graduate student, engineer, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.

Email: steepsam17@gmail.com

Vadim G. Khozin, doctor of technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.

Email: khozin.vadim@yandex.ru

Andrey Yu. Belyakov, post-graduate student, head of laboratory, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.

Email: belyakoffandrrey@mail.ru



УДК: 691.328.4

DOI: 10.52409/20731523_2023_3_101

EDN: HJVCIL



Деформативность изгибаемых бетонных элементов, армированных полимерной композитной арматурой

И. А. Антаков¹, А.М. Сулейманов¹

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. *Постановка задачи.* Работа изгибаемых элементов с полимерной композитной арматурой под нагрузкой имеет ряд принципиально отличающихся от железобетона особенностей, что является следствием различий в физико-механических свойствах композитной и стальной арматур. При этом разработка действующих методик расчета конструкций с композитами производилась путем адаптации существующих методик расчета железобетонных конструкций, за счет введения и корректировки различных эмпирических коэффициентов. Целью данного исследования является совершенствование методики расчета прогибов изгибаемых бетонных элементов, армированных полимерной композитной арматурой. Задачи исследования: анализ существующих исследований в данной области и действующих методик расчета изгибаемых элементов и конструкций с композитной арматурой, выявление их особенностей и различий; экспериментальные исследования деформативности балок с композитной арматурой, сравнение экспериментальных данных по прогибам и теоретических, определенных по рассматриваемым методикам расчета; корректировка выражения для вычисления величин прогибов изгибаемых бетонных элементов-балок, армированных стеклокомпозитной арматурой со спиральной навивкой-ребрами.

Результаты. Выполнен анализ проведенных экспериментальных исследований опытных образцов бетонных балок сечением 120 × 220 мм и длиной 1810 мм, армированных в растянутой зоне двумя стержнями стеклокомпозитной арматуры. Испытания проводились при кратковременном приложении нагрузок. Выполнено сравнение теоретических, определенных по нормативным методикам России – свод правил 295.1325800.2017 и Соединенных Штатов Америки – American Concrete Institute 440.1R-06, и экспериментальных зависимостей между величинами изгибающего момента и прогибами. Выявлено, что с увеличением нагрузки достоверность, точность результатов расчета прогибов по рассматриваемым методикам снижается. На основании проведенного исследования расчет прогибов изгибаемых элементов с полимерной композитной арматурой предлагается выполнять по существующей методике свода правил 295.1325800.2017, с учетом разработанного корректирующего коэффициента.

Выводы. Использование разработанного коэффициента позволило повысить точность оценки деформативности изгибаемых элементов с композитной арматурой.

Ключевые слова: стеклокомпозитная арматура, арматура композитная полимерная, неметаллическая арматура, изгибаемые элементы, бетонные конструкции, прогиб

Для цитирования: Антаков И.А., Сулейманов А.М. Деформативность изгибаемых бетонных элементов, армированных полимерной композитной арматурой // Известия КГАСУ, 2023, № 3(65), с.101-109, DOI: 10.52409/20731523_2023_3_101, EDN: HJVCIL

Deformability of flexural concrete members reinforced with fiber-reinforced polymer bars

I. A. Antakov¹, A.M. Suleymanov¹

¹Kazan State University of Architecture and Engineering
Kazan, Russian Federation

Abstract. *Problem statement.* The behavior of flexural members with fiber-reinforced polymer reinforcement under load has a number of features fundamentally different from reinforced concrete, which is a consequence of differences in the physical and mechanical properties of composite and steel reinforcement. At the same time, the development of existing methods for calculating structures with fiber-reinforced polymer reinforcement was carried out by adapting existing methods for calculating reinforced concrete structures, by introducing and adjusting various empirical coefficients. In this regard, the purpose of this study is to improve the methodology for calculating the deflections of flexural concrete members reinforced with fiber-reinforced polymer reinforcement. The research objectives include the analysis of existing study in this area and existing methods for calculating flexural members and structures with fiber-reinforced polymer reinforcement, identification of their features and differences; experimental studies of the deformability of beams with fiber-reinforced polymer reinforcement, comparison of experimental data on deflections and theoretical data determined by the considered calculation methods; conducting theoretical studies aimed at developing recommendations for calculating the deflections of these structures.

Results. The analysis of the conducted experimental studies of concrete beam specimens with the cross section of 120 × 220 mm and the length of 1810 mm, reinforced in the tension side with two bars of glass fiber-reinforced polymer reinforcement was carried out. The tests were carried out with a short-term application of loads. A comparison was made of the theoretical dependencies, determined according to the guidelines of Russia – Set of Rules 295.1325800.2017 and the United States of America – American Concrete Institute 440.1R-06, and experimental dependencies between the values of the bending moment and deflections. It was found out that with increasing load, the reliability of the calculation of deflections by the methods under consideration decreases. It was proposed to calculate the deflections of flexural members with fiber-reinforced polymer reinforcement according to the method of Set of Rules 295.1325800.2017, taking into account the developed correction factor k .

Conclusions. The use of the developed coefficient k made it possible to improve the accuracy of assessing the deformability of flexural members with fiber-reinforced polymer reinforcement.

Keywords: glass fiber-reinforced polymer reinforcement, fiber-reinforced polymer reinforcement, non-metallic reinforcement, flexural members, concrete structures, deflection

For citation: Antakov I.A., Suleymanov A.M. Deformability of flexural concrete members reinforced with fiber-reinforced polymer bars // News KSUAE, 2023, № 3(65), p.101-109, DOI: 10.52409/20731523_2023_3_101, EDN: HJVCIL

1. Введение

Физико-механические свойства арматуры композитной полимерной (далее АКП) отличаются от «традиционной» стальной арматуры. АКП обладает более высокой прочностью на растяжение, относительно низким модулем упругости, при кратковременном нагружении диаграмма «напряжения – деформации» практически прямолинейна вплоть до разрушения, иной механизм сцепления с бетоном [1]. В результате чего работа изгибаемых элементов с композитной арматурой под нагрузкой имеет ряд принципиально отличающихся от железобетона особенностей:

- из-за того, что АКП имеет прямолинейную диаграмму деформирования, диаграммы для балок «изгибающий момент – прогиб» имеют билинейную форму, с двумя фазами работы: без трещин и с трещинами [2-4];

- из-за низкого модуля упругости композитов прогибы балок с АКП в 3-4 раза выше, чем у железобетонных аналогов, больше ширина раскрытия трещин [5-7], меньше высота сжатой зоны в нормальном сечении [8], в процессе нагружения происходит «разветвление» трещин у растянутой грани элемента [9];

- из-за относительно высокой подверженности композитов ползучести увеличение прогибов балок при длительном действии нагрузки составляет 15-90 % относительно начальной упругой деформации, величина приращения прогиба зависимости от вида арматуры и величины нагрузки [10, 22];

- из-за отсутствия у диаграммы деформирования композитов площадки текучести разрушения нормального сечения от разрыва растянутой арматуры и от дробления бетона в сжатой зоне имеют хрупкий характер [11-13]. Возможно одновременное разрушение по бетону и арматуре [14, 15].

Учитывая более высокую деформативность изгибаемых элементов с АКП требования по второй группе предельных состояний могут быть основными при проектировании таких конструкций [16, 17].

Разработка действующих методик расчета конструкций с АКП производилась путем адаптации существующих методик расчета железобетонных конструкций, за счет введения и корректировки различных эмпирических коэффициентов [15, 18]. В методике СП 295.1325800.2017 введены ряд изменений:

- сжатая арматура в расчетах не учитывается;

- предельные величины ширины раскрытия трещин увеличены до 0,7 мм и 0,5 мм;

- увеличены значения коэффициента φ_2 , учитывающего профиль продольной АКП, до 0,7 для арматуры периодического профиля. В ранее действующем Приложении Л к СП 63.13330.2012 также было указано значение данного коэффициента для гладкой арматуры, равное 1,2. В исследовании [1] отмечалось, что стержни АКП с песчаным покрытием и с «вдавленной» спиральной навивкой обладают большими величинами сцепления с бетоном, по сравнению со стержнями с «наклеенной» на основной стержень навивкой.

Расчет изгибаемых элементов с АКП по прогибам, методики СП 295.1325800.2017, выполняется аналогично методике для железобетонных конструкций СП 63.13330.2018.

Представленная в АСІ 440.1R-06 методика расчета прогибов изгибаемых элементов с АКП также базируется на методике для железобетонных конструкций, в которой скорректировали формулы по определению приведенного момента инерции сечения I_e (формула 1) и коэффициента λ (формула 3), учитывающего длительность действия нагрузки.

$$I_e = \beta_d \cdot I_g \cdot \left(\frac{M_{cr}}{M_{max}} \right)^3 + I_{cr} \cdot \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_{max}} \right)^3 \right] \leq I_g, \quad (1)$$

где введен коэффициент β_d

$$\beta_d = \frac{1}{5} \left(\frac{\rho_f}{\rho_{fb}} \right). \quad (2)$$

Прогибы от действия длительных нагрузок вычисляются путем умножения значения кратковременного прогиба на коэффициент λ

$$\lambda = 0,6 \cdot \xi, \quad (3)$$

где $\xi = 2$ – при продолжительности действия нагрузки более 5 лет, $\xi = 1,25$ – до 6 месяцев.

Результаты многих исследований [19-21] показывают несовершенство действующих методик расчета, отмечались неточности в определении расчетных значений ширины раскрытия трещин и прогибов изгибаемых элементов с АКП относительно опытных данных.

Целью настоящего исследования является совершенствование методики расчета прогибов изгибаемых бетонных элементов, армированных полимерной композитной арматурой.

Задачи исследования: анализ существующих исследований в данной области и действующих методик расчета изгибаемых элементов и конструкций с АКП, выявление их особенностей и различий; экспериментальные исследования деформативности балок с композитной арматурой, сравнение экспериментальных данных по прогибам и

теоретических, определенных по рассматриваемым методикам расчета; корректировка выражения для вычисления величин прогибов изгибаемых бетонных элементов-балок, армированных стеклокомпозитной арматурой со спиральной навивкой-ребрами.

2. Материалы и методы

Для получения экспериментальных данных о работе изгибаемых элементов с композитной арматурой под нагрузкой были изготовлены и испытаны образцы бетонных балок с стеклокомпозитной (АСК) и базальтокомпозитной арматурой (АБК). Описание всех серий опытных образцов балок программы экспериментальных исследований представлено в статье [15]. В данной работе рассмотрены балки серии № 2, армированные АСК.

Опытными образцами являлись бетонные балки сечением 120×220 мм и длиной 1810 мм, армированные двумя стержнями в растянутой зоне, с защитным слоем бетона 20 мм. Балки с шарнирным опиранием по двум сторонам, загруженные в третях пролета (рис. 1). Испытания проводились в соответствии с положениями ГОСТ 8829-2018, при кратковременном приложении нагрузок. Результаты исследования работы балок на стадии разрушения и при длительном приложении нагрузок представлены в ранее опубликованных статьях [15, 22].

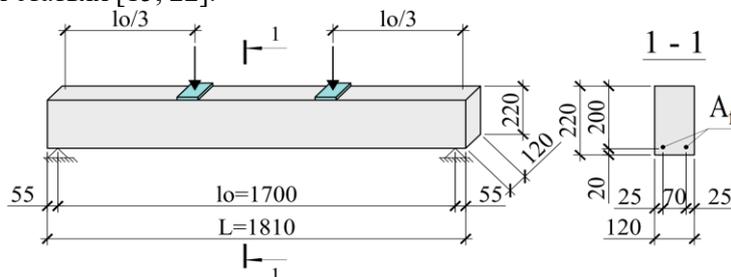


Рис. 1. Схема опирания и нагружения исследуемых балок (иллюстрация автора)

Fig. 1. Beam support and loading pattern (illustration by the author)

В таблице 1 представлены характеристики опытных образцов балок. Армирование балок серии № 2 выполнено стержнями АСК периодического профиля по ТУ 5769-248-35354501-2007, со спиральной навивкой-ребрами базальтового волокна (рис. 2).

Таблица 1

Характеристики опытных образцов балок

№ серии	Класс бетона	Продольное армирование				
		Количество и диаметр стержней, класс	Расчетный диаметр, мм	Процент армирования μ , %	Модуль упругости E_f , МПа	Сопротивление растяжению R_f , МПа
2	В40	2 Ø10 АСК	8,6	0,484	51500	1200
		2 Ø8 АСК	7	0,321	51500	1200
		2 Ø6 АСК	5	0,164	51770	1250



Рис. 2. Стержень стеклокомпозитной арматуры (иллюстрация автора)

Fig. 2. Glass fiber-reinforced polymer bar (illustration by the author)

3. Результаты и обсуждение

В ранее опубликованной работе [9] представлены результаты исследования деформативности и трещиностойкости изгибаемых элементов с композитной арматурой. Рассмотрены методики расчета прогибов нормативных документов России – СП 295.1325800.2017 и США – АСІ 440.1R-06. В результате выполненного исследования зафиксированы отклонения теоретических данных по прогибам балок от экспериментальных значений. Установлено, что недостоверное определение момента трещинообразования снижает точность расчета прогибов. Использование экспериментальных значений момента трещинообразования M_{crc} вместо расчетных, при расчете балок по рассматриваемым методикам, уменьшает отклонение теоретических значений прогибов от экспериментальных данных. В исследованиях [19, 23] сравнены теоретические, определенные по методикам АСІ и Eurocode, и экспериментальные

данные по прогибам балок с АКП, где также отмечалось, что достоверность прогноза прогибов балок во многом зависит от точности расчета момента трещинообразования. В связи с этим в работе [9] были предложены корректирующие коэффициенты для определения момента трещинообразования, что позволило повысить точность расчета прогибов.

Результаты исследования, представленные в [9], показали, что величины кратковременного прогиба, определенные по методике АСІ, являются заниженными. Предельное отклонение теоретических значений максимального прогиба от опытных данных составляет 38,7 %. В исследованиях [11, 19, 20] также было установлено увеличение отклонения теоретических величин прогибов, определенных по методике АСІ, от экспериментальных данных по мере увеличения нагрузки, в сторону занижения прогибов. При этом выявлена корреляция между точностью расчета прогибов и процентом армирования. У балок с меньшим процентом армирования отклонения от экспериментальных данных выше.

На основании анализа опытных данных расчет прогибов изгибаемых элементов с АКП предлагается выполнять по методике СП 295.1325800.2017 с учетом разработанного корректирующего коэффициента k (формула 4). Он нивелирует нарастающее, по мере увеличения нагрузки, отклонение теоретических величин прогибов от фактических, опытных данных. А также учитывается влияние процента армирования через отношение величин относительной высоты сжатой зоны бетона ξ и граничной относительной высоты сжатой зоны ξ_R .

$$f = kSl^2 \left(\frac{1}{r}\right)_{max}, \tag{4}$$

$$k = 1,6 - 0,6 \left(\frac{M_{crс}}{M}\right) \left(\frac{\xi}{\xi_R}\right).$$

Аналогичные результаты расчета прогибов, после образования трещин, можно получить по методике, представленной на рис. 3. На первом этапе определяется напряжение в арматуре σ_f и относительная деформация растянутой арматуры ε_f . Затем, исходя из гипотезы плоских сечений, определяется относительная деформация крайнего волокна сжатой зоны бетона ε_b . С учетом коэффициентов ψ_f и ψ_b вычисляются средние относительные деформации растянутой арматуры $\bar{\varepsilon}_f$ и бетона сжатой зоны $\bar{\varepsilon}_b$. Коэффициент ψ_b , учитывающий неравномерность краевых деформаций бетона сжатой зоны, предложен автором. По выражению Мурашова В.И. определяется средняя кривизна оси изгибаемого элемента $1/r$. Прогиб f рассчитывается по формуле СП с учетом корректирующего коэффициента k .

На рис. 4-6 приведено сравнение экспериментальных и теоретических зависимостей между величинами изгибающего момента и прогибами (M-f). Для каждого вида балок представлены экспериментальные данные по двум идентичным образцам. Теоретические данные по рассматриваемым методикам определены с учетом экспериментальных значений момента трещинообразования. В методике СП использовался коэффициент $\psi_f = 1 - 0,8 \cdot \frac{M_{crс}}{M}$. В методике АСІ кратковременный прогиб умножался на коэффициент $\lambda = 0,6 \cdot \xi = 0,6 \cdot 2 = 1,2$, где $\xi=2$ соответствует продолжительности действия нагрузки более 5 лет. В модифицированной методике СП (ММ СП) значения прогибов определялись с учетом коэффициента k .

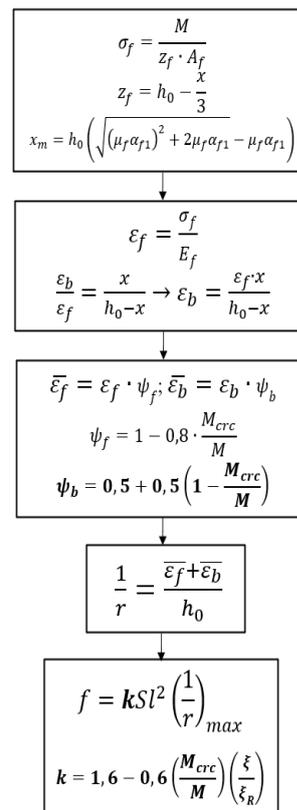


Рис. 3. Блок-схема методики расчета прогибов изгибаемых элементов с АКП (иллюстрация автора)

Fig. 3. Flowchart method for calculating deflections flexural members with FRP bars (illustration by the author)

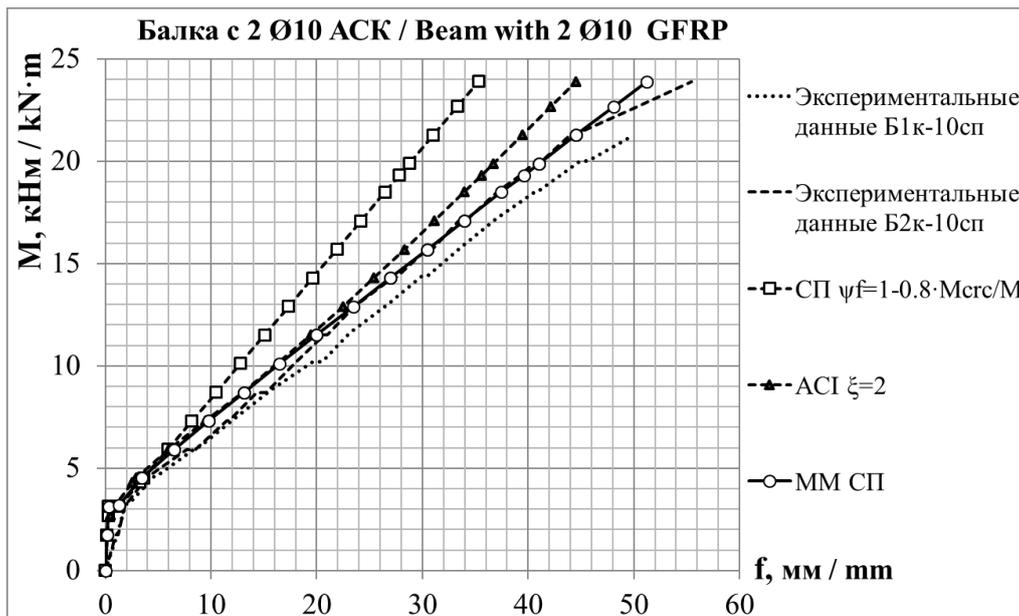


Рис. 4. Сравнение теоретических и экспериментальных зависимостей между величинами изгибающего момента и прогибами для балок с двумя стержнями Ø10 АСК (иллюстрация автора)

Fig. 4. Comparison of theoretical and experimental moment-deflection curves for beams reinforced with two bars Ø10 GFRP (illustration by the author)

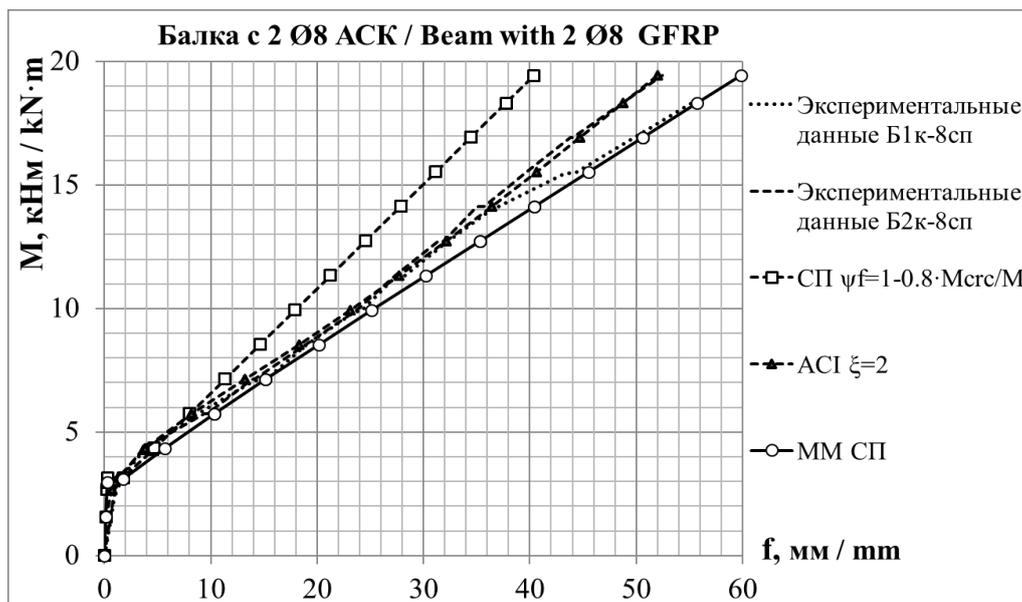


Рис. 5. Сравнение теоретических и экспериментальных зависимостей между величинами изгибающего момента и прогибами для балок с двумя стержнями Ø8 АСК (иллюстрация автора)

Fig. 5. Comparison of theoretical and experimental moment-deflection curves for beams reinforced with two bars Ø8 GFRP (illustration by the author)

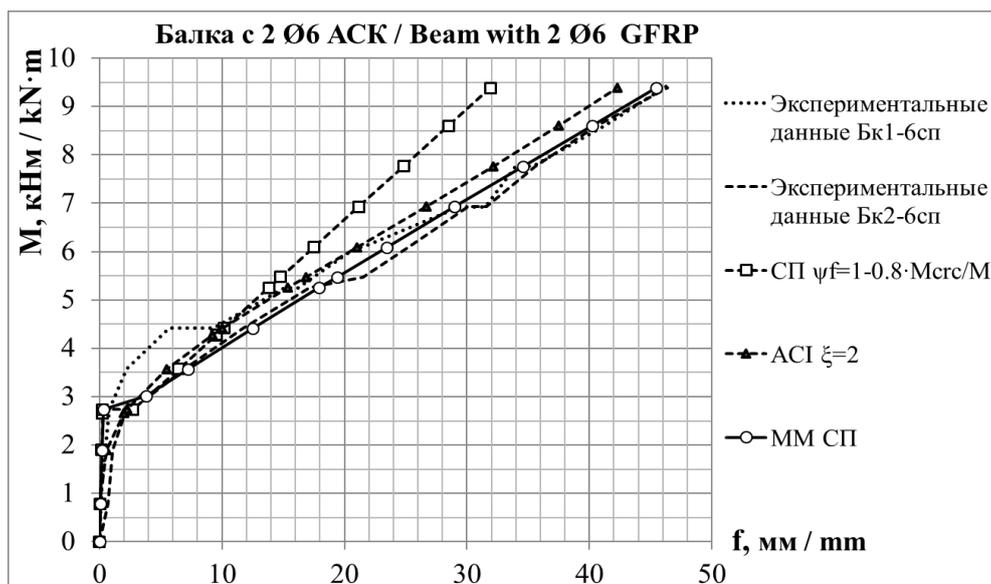


Рис. 6. Сравнение теоретических и экспериментальных зависимостей между величинами изгибающего момента и прогибами для балок с двумя стержнями Ø6 АСК (иллюстрация автора)

Fig. 6. Comparison of theoretical and experimental moment-deflection curves for beams reinforced with two bars Ø6 GFRP (illustration by the author)

Зависимость между величинами изгибающего момента и прогибами балок с АКП после образования трещин, вплоть до разрушения, преимущественно линейная. Расчетные диаграммы рассматриваемых методик после предполагаемого образования трещин также прямолинейны. В методике СП, при расчете прогибов изгибаемых элементов, величина жесткости поперечного сечения определяется с учетом двух расчетных случаев – отсутствие и наличие трещин. В момент предполагаемого образования трещин у диаграмм методики СП 295.1325800.2017 имеется горизонтальный участок. Отклонение теоретических значений максимального прогиба по методике СП от экспериментальных данных достигает 53,6 %, у методики АСІ – 19,8 %.

4. Заключение

В отличие от методики АСІ 440.1R-06 в методике СП 295.1325800.2017 расчет прогибов изгибаемых элементов с АКП выполняется аналогично действующей методике для железобетонных конструкций, без введения дополнительных коэффициентов или корректировки существующих.

Сравнение экспериментальных и теоретических данных по деформативности исследуемых балок с АКП показало необходимость совершенствования методик СП 295.1325800.2017 и АСІ 440.1R-06 в части расчета прогибов, что также отмечалось и в других исследованиях. На первом этапе данной работы удалось повысить точность расчета прогибов за счет приближения теоретических значений момента трещинообразования к опытным данным, путем введения корректирующих коэффициентов.

В результате проведенного исследования выполнено совершенствование методики расчета прогибов изгибаемых бетонных элементов-балок, армированных стеклокомпозитной арматурой со спиральной навивкой-ребрами. На основании анализа опытных данных разработан корректирующий коэффициент для выражения по определению прогибов методики СП 295.1325800.2017. При использовании данного коэффициента расхождение между теоретическими и опытными величинами максимального прогиба колеблется в пределах 10 %. Требуются дополнительные исследования применения предложенного корректирующего коэффициента для иных схем опирания и нагружения балок, видов композитной полимерной арматуры.

Список литературы / References

1. Хозин В.Г., Гиздатуллин А.Р. Совместимость полимеркомпозитной арматуры с цементным бетоном в конструкциях // Строительные материалы. 2017. № 11. С. 30-38 [Khozin V.G., Gizdatullin A.R. Compatibility of polymer-composite reinforcement with cement concrete in structures. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. Iss. 11, P. 30–38.]
2. Attia K., El Refai A., Alnahhal W. Flexural behavior of basalt fiber-reinforced concrete slab strips with BFRP bars: experimental testing and numerical simulation // *Journal of composites for construction*. 2020. Vol. 24. Iss. 2. P. 04020007 DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001002
3. Salih R., Zhou F. Numerical investigation of the behavior of reinforced concrete beam reinforced with FRP bars // *Civil Engineering Journal*. 2019. Vol. 5. Iss. 11. P. 2296-2308. DOI: 10.28991/cej-2019-03091412
4. El-Nemr A., Ahmed E.A., El-Safty A., Benmokrane B. Evaluation of the flexural strength and serviceability of concrete beams reinforced with different types of GFRP bars // *Engineering Structures*. 2018. Vol. 173. P. 606-619. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.06.089
5. Barris C., Torres L., Vilanova I., Miàs C., Llorens M. Experimental study on crack width and crack spacing for Glass-FRP reinforced concrete beams // *Engineering Structures*. 2017. Vol. 131. P. 231-242. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.11.007
6. Kim S., Kim S. Flexural behavior of concrete beams with steel bar and FRP reinforcement // *Journal of asian architecture and building engineering*. 2019. Vol. 18. Iss. 2. P. 94-100. DOI: 10.1080/13467581.2019.1596814
7. Pan M.X., Xu X.S. Study on crack development of concrete beams in bending reinforced with FRP bars // 3rd international conference on energy materials and environment engineering (ICEMEE). Bangkok, Thailand, 2017. DOI: 10.1088/1755-1315/61/1/01203
8. Barris C., Torres L., Turon A., Baena M., Mias C. Experimental study of flexural behaviour of GFRP reinforced // Fourth International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE2008). Zurich, Switzerland, 2008.
9. Mirsayapov I., Antakov I., Antakov A. Experimental and theoretical analysis of crack resistance and deformability of concrete beams reinforced with fiber-reinforced polymer bars // *Proceedings of STCCE 2022, Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022. Vol. 291. P. 381-404. DOI: 10.1007/978-3-031-14623-7_34
10. Gross S., Yost J., Kevgas G. Time-dependent behavior of normal and high strength concrete beams reinforced with GFRP bars under sustained loads // *International Conference on High Performance Materials in Bridges*, American Society of Civil Engineers, 2003. P. 451-462. DOI: 10.1061/40691(2003)40
11. Adam M.A., Said M., Mahmoud A.A., Shanour A.S. Analytical and experimental flexural behavior of concrete beams reinforced with glass fiber reinforced polymers bars // *Construction and building materials*. 2015. Vol. 84. P. 354-366. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.03.057
12. Ruan XJ., Lu CH., Xu K., Xuan GY., Ni MZ. Flexural behavior and serviceability of concrete beams hybrid-reinforced with GFRP bars and steel bars // *Composite structures*. 2020. Vol. 235. P. 111772 DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111772
13. Fei Peng, Weichen Xue. Design approach for flexural capacity of concrete T-beams with bonded prestressed and nonprestressed FRP reinforcements // *Composite Structures*. 2018. Vol. 204. P. 333-341. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.07.091
14. Sun Y., Liu Y., Wu T., Liu X., Lu H. Numerical analysis on flexural behavior of steel fiber-reinforced LWAC beams reinforced with GFRP bars // *APPLIED SCIENCES-BASEL*/ 2019. Vol. 23. Iss. 9. P. 5128 DOI: 10.3390/app9235128
15. Mirsayapov Il., Antakov I., Antakov A. Improving methods of strength design of normal sections of flexural concrete members reinforced with fiber-reinforced polymer bars // *Socio-Technical Construction and Civil Engineering (STCCE-2020)*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 890. P. 012057. DOI: 10.1088/1757-899X/890/1/012057

16. Baša N., Vuković N. K., Ulićević M., Muhadinović M. Effects of internal force redistribution on the limit states of continuous beams with GFRP reinforcement // Applied Sciences (Switzerland). 2020. P. 3973. DOI:10.3390/app10113973
17. Ju M., Park, Y., Park C. Cracking control comparison in the specifications of serviceability in cracking for FRP reinforced concrete beams // Composite Structures. 2017. Vol. 182. P. 74-685. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.09.016
18. Ветрова О.А. Экспериментальные исследования деформативности бетонных балок, армированных композитной арматурой // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020. Т. 24. № 1. С. 103-114. DOI: 10.21869/2223-1560-2020-24-1-103-114 [Vetrova O. A. Pilot Studies of Concrete Beams Deformability Reinforced with Composite Reinforcement. Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University. 2020. Vol. 24. Iss. 1. P. 103-114. DOI: 10.21869/2223-1560-2020-24-1-103-114]
19. Al-Sunna R., Pilakoutas K., Hajirasouliha I., Guadagnini M. Deflection behavior of FRP reinforced concrete beams and slabs: An experimental investigation // Composites Part B: Engineering. 2012. Vol. 43. Iss. 5. P. 2125-2134. DOI: 10.1016/j.compositesb.2012.03.007
20. Ng P.L., Barros J.A.O., Kaklauskas G., Lam J.Y.K. Deformation analysis of fibre-reinforced polymer reinforced concrete beams by tension-stiffening approach // Composite Structures. 2020. Vol. 234. P. 111664. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.111664
21. Elgabbas F., Ahmed E. A., & Benmokrane B. Flexural Behavior of Concrete Beams Reinforced with Ribbed Basalt-FRP Bars under Static Loads // Journal of Composites for Construction. 2017. Vol. 21. Iss. 3. P. 04016098. DOI: 10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000752
22. Антаков А.Б., Антаков И.А. Экспериментальные исследования изгибаемых элементов с полимеркомпозитной арматурой при длительном приложении нагрузки // Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконструкции: материалы III Международной (IX Всероссийской) конференции НАСКР–2016. Изд-во Чуваш. ун-та, Чебоксары, 2016. – С. 67-72. [Antakov A.B., Antakov I.A. Experimental studies of flexural members with fiber-reinforced polymer reinforcement under sustained load application // International conference on new architecture, design construction and renovation NASKR 2016. Cheboksary, 2016. P. 67-72]
23. Pecce M., Manfredi G., Cosenza E. A Probabilistic assessment of deflections in FRP RC beams // Proceedings of 5th International Conference on Non-metallic Reinforcement for Concrete Structures - FRPRCS-5, Cambridge, 16-18 July, Thomas Telford Publishing. 2001. Vol. 2. P. 887-896.

Информация об авторах

Антаков Игорь Андреевич, старший преподаватель кафедры железобетонных и каменных конструкций, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: igor788@bk.ru

Сулейманов Альфред Мидхатович, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: sulejmanov@kgasu.ru

Information about the authors

Igor A. Antakov, senior lector of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: igor788@bk.ru

Alfred M. Suleymanov, doctor of technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: sulejmanov@kgasu.ru

УДК: 694.14
DOI: 10.52409/20731523_2023_3_110
EDN: NYXRBW



Анализ работы цилиндрических полимеркомпозитных нагелей в деревянных составных изгибаемых элементах

Т.А. Зиннуров¹, Е.В. Новицкий¹, С.В. Пермяков¹, А.М. Сулейманов¹

¹ Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация.

Аннотация: *Постановка задачи.* В современном мире остро стоит вопрос доступного строительства зданий и сооружений в отдаленных населенных пунктах, особенно в северных районах. Решением данной проблемы может являться широкое внедрение быстровозводимых конструкций, например, из древесины. Рассматриваемая в данной статье конструкция составной деревянной балки с полимеркомпозитными нагелями (из стеклоровинга) потенциально обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными решениями из дерева, а также по сравнению с такими материалами как сталь и железобетон. Целью исследования является анализ поведения нагелей при работе на срез в деревянной изгибаемой конструкции. Задачами исследования являются: собрать экспериментальную деревянную двухъярусную составную балку из брусьев, объединенных полимеркомпозитными нагелями; провести ряд испытаний образцов и определить значения вертикальных деформаций составной балки и взаимное смещение торцов брусьев при различном количестве нагелей и сравнить полученные экспериментальные данные с аналитическими расчетами.

Результаты: На основе экспериментальной модели образца составной деревянной балки было продемонстрировано успешное включение нагельной системы в общую работу составной конструкции. Получены аналитические зависимости влияния количества нагелей на общий прогиб исследуемого деревянного составного элемента.

Выводы: Для рассматриваемой деревянной составной балки можно утверждать о линейной зависимости вертикальных деформации от количества нагелей, при нагрузках, не превышающих 50% от несущей способности. Полимеркомпозитные нагели не равномерно включаются в работу на сдвиг, о чем свидетельствуют полученные деформации и формы разрушения деревянных составных балок. Можно отметить, что наиболее эффективным количеством нагелей является 6 штук с расположением по краям изгибаемого элемента.

Ключевые слова: деревянная составная балка, усиление, несущая способность, нагельное соединение, прогиб, полимеркомпозитная арматура, срез.

Для цитирования: Зиннуров Т.А., Новицкий Е.В., Пермяков С.В., Сулейманов А.М. Анализ работы цилиндрических полимеркомпозитных нагелей в деревянных составных изгибаемых элементах // Известия КГАСУ, 2023, № 3(65), с.110-121, DOI: 10.52409/20731523_2023_3_110, EDN: NYXRBW

Analysis of the operation of cylindrical polymer composite dowels in wooden composite bending elements

T.A. Zinnurov¹, E.V. Novitsky¹, S.V. Permyakov¹, A.M. Sulejmanov¹

¹Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Abstract: *Problem statement.* In the modern world the issue of affordable construction of buildings and structures in remote settlements, especially in the northern regions, is acute. The solution to this problem can be the widespread introduction of prefabricated structures, for example, from wood. The design of a composite wooden beam with polymer composite dowels considered in this article potentially has a number of advantages compared to traditional wood solutions, as well as compared to materials such as steel, reinforced concrete. The purpose of the work is to analyze the shear behavior of pins in a wooden bending structure. The objectives of the study are to create a wooden two-tier composite beam from beams combined with polymer composite dowels and to conduct a series of sample tests, determine the values of vertical deformations of the composite beam and the mutual displacement of the ends of the beams with a different number of dowels, in addition, to compare the experimental data obtained with analytical calculations.

Results: Based on the experimental model of a composite wooden beam, successful integration of a dowel system into the overall performance of the composite structure was demonstrated. Analytical dependencies were derived to examine the influence of the number of dowels on the overall flexure of the investigated wooden composite element.

Conclusions: For the considered wooden composite beam, a linear relationship between vertical deformations and the number of dowels can be affirmed under loads not exceeding 50% of the load-bearing capacity. Polymer composite dowels are not uniformly engaged in shear, as evidenced by the obtained deformations and failure modes of the wooden composite beams. It can be noted that the most effective number of dowels is six, positioned at the edges of the bending element.

Keywords: wooden composite beam, reinforcement, load-bearing capacity, dowel connection, flexure, polymer composite reinforcement, shear.

For citation: Zinnurov T.A., Novitsky E.V., Permyakov S.V., Sulejmanov A.M. Analysis of the operation of cylindrical polymer composite dowels in wooden composite bending elements // News KSUAE, 2023, № 3(65), p.110-121, DOI: 10.52409/20731523_2023_3_110, EDN: NYXRWB

1. Введение

Вопрос о целевом внедрении деревянных конструкций, особенно мостов, на территории Российской Федерации имеет особую актуальность, несмотря на то, что в открытых источниках есть много информации о использовании древесины в строительных конструкциях [1-3]. Главным преимуществом древесины перед другими строительными материалами является ее доступность практически во всех регионах РФ и относительная низкая стоимость. Однако, ограничения в габаритах, предлагаемых на рынке деревоматериалов из пиленной и цельной древесины, требуют дополнительной модификации применяемых конструктивных решений [4-6]. Можно обратиться к традиционным методам объединения или усиления конструкций из дерева, таким как соединения на стальных нагелях и шпонках, клеевые стыки и т.д., но с появлением на рынке современных полимеркомпозитных материалов, которые во многом превосходят аналоги, внедрение их в конструктивные решения становится достаточно перспективной задачей [7-9]. Древесина является возобновляемым материалом, и при правильном подходе к управлению лесными ресурсами, потребности строительства могут быть обеспечены на долгие годы. Такой подход делает «зеленое» строительство важной темой, которой уделяется много внимания за рубежом [10-12]. В России также признают важность использования возобновляемых ресурсов, но помимо этого существует актуальная проблема обеспечения требуемых эксплуатационных параметров деревянных

конструкций в сложных условиях эксплуатации, что особенно отмечается для мостовых и быстровозводимых сооружениях [13,14]. Исходя из современных технических требований, необходимы новые подходы к созданию и модификации конструкции пролетных балок мостов, которые должны удовлетворять требованиям прочности и долговечности. Поэтому целью исследования является анализ работы перспективной конструкции составной деревянной балки, потенциально применимой во многих областях строительства. Задачи исследования: проведение эксперимента составной деревянной балки с полимеркомпозитными нагелями и сравнение полученных данных с аналитическими расчетами для доказательства включения в работу стеклопластиковых стержней.

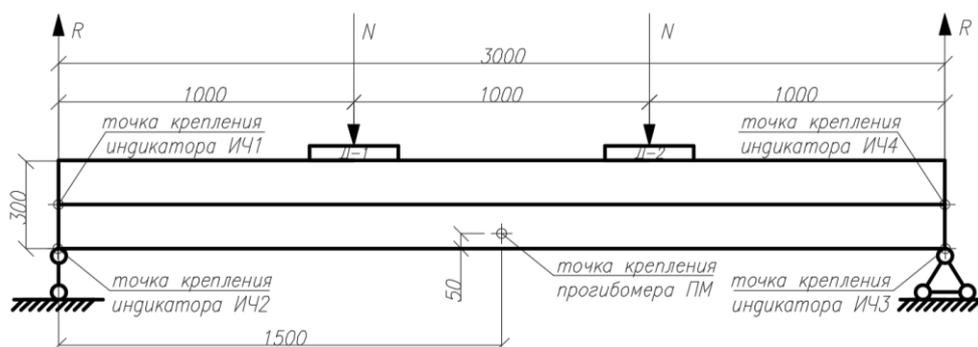
2. Материалы и методы

Авторами статьи предлагается следующее новое конструктивное решение: составная деревянная балка из брусьев, объединенные в общую работу полимеркомпозитными (из стеклоровинга) цилиндрическими нагелями, что является модификацией конструктивного решения балки В.С. Деревягина с пластинчатыми стальными нагелями [15]. Полимеркомпозитные нагели позволяют не только уменьшать деформации прогибов конструкции, путем объединения перемещений брусьев нескольких ярусов, но и повысить долговечность самой конструкции. Совместные деформации брусьев достигается работой полимеркомпозитных нагелей на срез в зоне контакта.

В качестве экспериментального образца была принята следующая конструкция: деревянная балка длиной 3000 мм, состоящая из двух брусьев сечением 150x150 мм и установленных друг на друга в два яруса. В брусья поэтапно вбиваются полимеркомпозитные опесчаненные стержни диаметром 10 мм в один ряд с шагом 120 мм. В дальнейшем деревянная составная балка подвергалась физическим испытаниям по средством нагружения по схеме четырехточечного изгиба (рис. 1 а, б). Программа испытаний включает в себя серию экспериментальных образцов с разным количеством нагелей (2, 4, 6 и 8 шт), а также для сравнения и доказательства включения нагелей в работу, отдельно испытывался образец из двух брусьев с аналогичными габаритами, но не имеющий объединения между собой. Установка нагелей велась от торцов балки к середине. Все испытываемые образцы поэтапно загружались локальной нагрузкой до разрушения с шагом 2,5 кН при помощи гидравлической системы (гидравлический насос WDK-86310 и гидроцилиндры WDK-80210) до полного разрушения. В ходе эксперимента контролировались показания нагрузки с динамометров электронных ДЭП/6-2Д-100С-1 и деформации прогибов с прогибомера типа ПМ и четырех индикаторов типа ИЧ. Индикаторы часового типа были установлены на опорных частях для оценки относительного прогиба, а два остальных на торцах конструкции, которые фиксировали смещение брусьев относительно друг друга (Рис.1. а).



а)



б)

Рис. 1. а) Общий вид испытываемого усиленного деревянного изгибаемого элемента, б) расчетная схема испытываемого усиленного деревянного изгибаемого элемента (иллюстрации авторов)

Fig. 1. a) General view of the tested reinforced wooden bending element, b) design scheme of the tested reinforced wooden bending element (illustrations by the authors)

3. Результаты и обсуждение

По результатам проведенных испытаний экспериментальных образцов полученные значения занесены в таблицы 1 и 2 и отражены на графиках (рис. 2). В таблице 1 и графике (рис. 2.а) представлена зависимость «нагрузка (N, кН) – вертикальные деформаций (прогиб) балки (f, мм)». В таблице 2 и графике рисунок 2.б представлена зависимость «нагрузка (N, кН) – горизонтальные смещения торцов брусьев (Δ , мм)».

Таблица 1

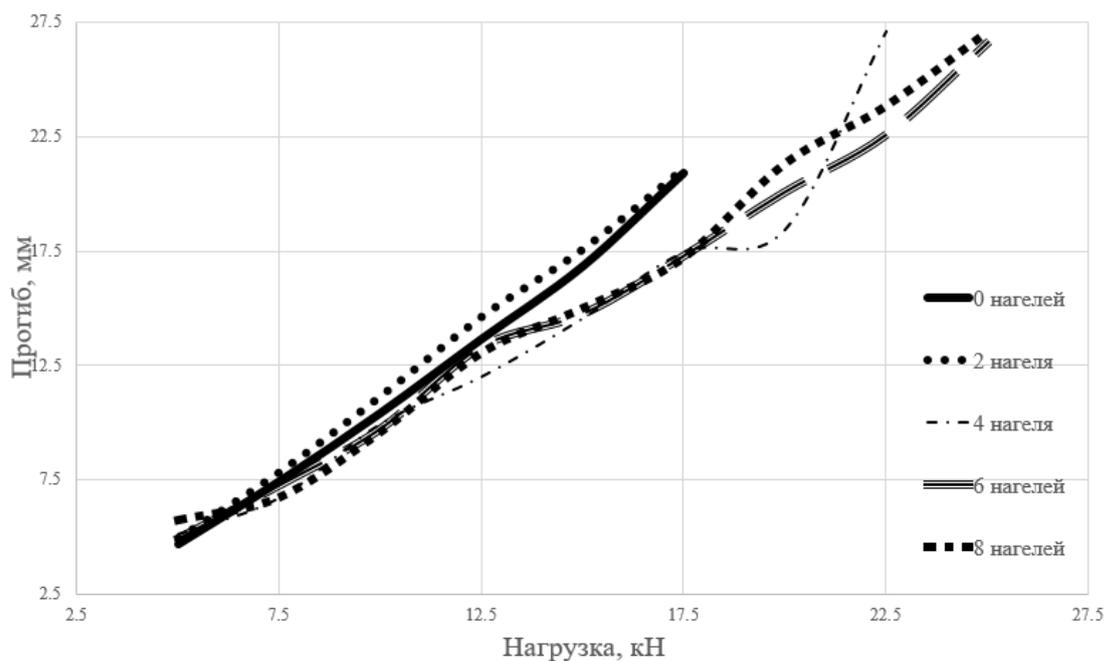
Значения «нагрузка (N, кН) – вертикальные деформаций (прогиб) балки (f, мм)» образцов с разным количеством нагелей

N, кН	f, мм				
	0 нагелей	2 нагеля	4 нагеля	6 нагелей	8 нагелей
5,0	4,67	4,95	5,11	4,94	5,76
7,5	7,42	7,84	6,70	7,27	6,75
10,0	10,41	11,16	9,94	9,73	9,60
12,5	13,65	14,63	12,00	13,32	13,06
15,0	16,83	17,58	14,55	14,75	15,00
17,5	20,92	21,11	17,45	17,28	17,20
20,0	-	-	18,43	20,07	21,30
22,5	-	-	27,10	22,56	23,81
25,0	-	-	-	26,55	27,03

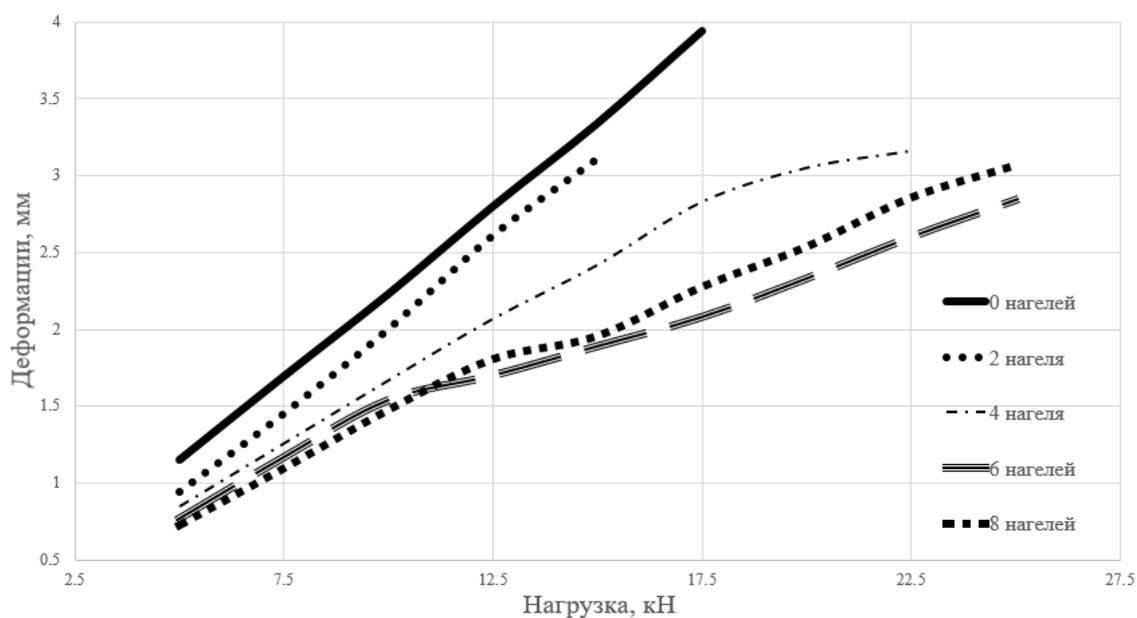
Таблица 2

Значения «нагрузка (N, кН) – горизонтальные смещения торцов брусьев (Δ , мм)» образцов с разным количеством нагелей

N, кН	Δ , мм				
	0 нагелей	2 нагеля	4 нагеля	6 нагелей	8 нагелей
5,0	1,15	0,94	0,85	0,77	0,73
7,5	1,70	1,45	1,26	1,17	1,10
10,0	2,23	2,00	1,67	1,54	1,48
12,5	2,80	2,61	2,07	1,70	1,81
15,0	3,34	3,11	2,42	1,89	1,96
17,5	3,94	3,64	2,83	2,08	2,28
20,0	-	-	3,05	2,33	2,54
22,5	-	-	3,16	2,60	2,86
25,0	-	-	-	2,84	3,07



а)



б)

Рис. 2. а) График зависимости «прогиб – нагрузка» для экспериментальных образцов с разным количеством нагелей, б) график зависимости «продольных деформаций – нагрузка» для экспериментальных образцов с разным количеством нагелей (иллюстрации авторов)
 Fig.2. a) The dependence graph of "flexure-load" for experimental specimens with different numbers of dowels, (b) the dependence graph of "longitudinal deformations-load" for experimental specimens with different numbers of dowels (illustrations by the authors).

Графики «деформации – нагрузка» для всех экспериментальных образцов составной балки (рис. 2 а и б) демонстрируют линейную форму зависимости, но достигая нагрузки в 10 кН, появляется криволинейный участок, который фактически демонстрирует включение нагелей в работу. Позднее включение нагелей в работу

косвенно свидетельствует о значительной роли силы трения в зоне контакта по поверхности брусьев. После преодоления силы трения нагельная система включается в работу, что приводит к уменьшению общих деформаций прогибов конструкции.



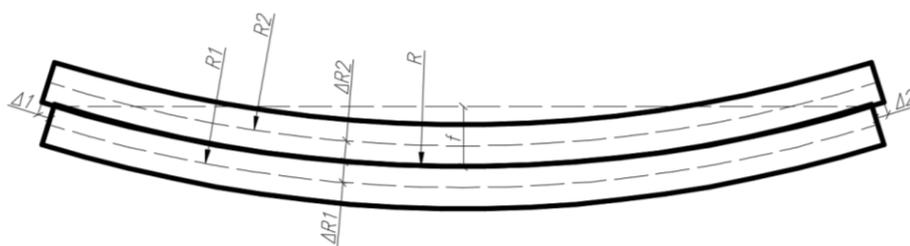
Рис. 3. Пример разрушения экспериментального образца (иллюстрация авторов)
Fig. 3. Example of the destruction of an experimental sample (illustration by the authors)

Разрушение образцов в большинстве случаев происходит после образования протяженной продольной трещины в нижнем бруске с последующим резким разрывом растянутых волокон, больше напоминающий скалывание древесины (рис. 3). Также в одном из образцов наблюдалось привычное разрушение по нормальному сечению.

Для подтверждения полученных результатов о включении полимеркомпозитных нагелей в составе деревянной балки в работу было проведено сравнение экспериментальных данных с аналитической моделью.

К аналитическим методам отнесем расчет продольных деформаций в зависимости от прогибов, предполагая, что брус под нагрузкой деформируется в виде дуги (рис. 4 а.). С помощью геометрических преобразований и, в частности, расчета радиуса кривизны была выведена формула горизонтальных перемещений изгибаемого элемента следующим образом.

Строится по точкам АВС треугольник (рис. 4 б), вписанный в круговой сектор, ограниченный точками СЕВ, где точка Е является центром сформированной окружности для кривой САВ.



а)

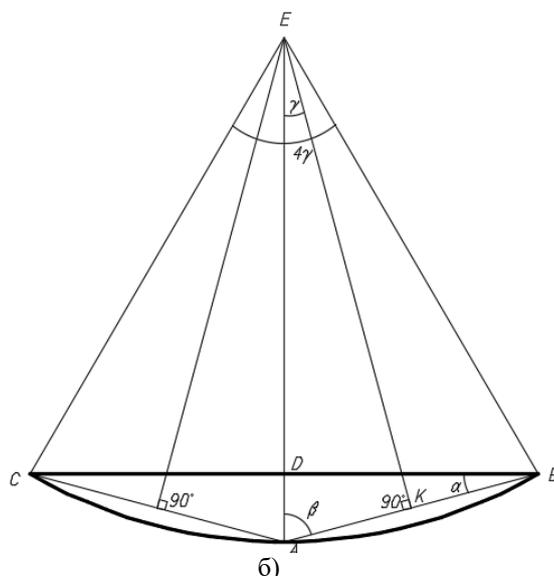


Рис. 4. а) Схема изгибаемого элемента, б) геометрическая схема изгибаемого элемента (иллюстрация авторов)

Fig. 4. a) Diagram of a bending element, b) Geometric diagram of a bending element (illustration by the authors)

В данной модели отрезок BC – длина изгибаемого элемента в начальном положении до приложения нагрузки (L), дуга CAB – форма деформации изгибаемого элемента под нагрузкой, соответственно отрезок DA – величина прогиба.

Для определения горизонтальных перемещений необходимо найти длину дуги l (CAB) – средняя линия составного бруса. Длина дуги l определяется по следующей формуле:

$$l = R4\gamma \quad (1)$$

где R - радиус кривизны средней линии составного бруса; 4γ – центральный угол.

Для нахождения радиуса кривизны AE построим перпендикуляр из середины отрезка CB к центру окружности, частью которой является дуга CAB. Далее построим отрезок BA, и из его середины построим перпендикуляр к центру окружности. Точка пересечения двух перпендикуляров является центром окружности, а угол между ними есть четверть искомого центрального угла (из свойств подобия треугольников).

Треугольники DAB и KAE являются подобными, поскольку имеют угол β , и у каждого из них имеется прямой угол, следовательно, угол γ равен углу α . Можно перейти к рассмотрению угла α , через его тангенс, который вычисляется как отношение DA к DB:

$$\tan \alpha = \frac{DA}{DB} \quad (2)$$

$$\alpha = \operatorname{atan}\left(\frac{DA}{DB}\right) \quad (3)$$

Длина гипотенузы AE в треугольнике KAE определяется как отношение катета AK к синусу вычисленного ранее угла α :

$$EA = \frac{AK}{\sin \alpha} = \frac{\frac{\sqrt{DA^2 + DB^2}}{2}}{\sin \alpha} \quad (4)$$

Центральный угол равен 4γ ввиду подобия треугольников, поэтому длина дуги равна:

$$CAB = \frac{\frac{\sqrt{DA^2 + DB^2}}{2}}{\sin \alpha} 4 \operatorname{atan}\left(\frac{DA}{DB}\right) \quad (5)$$

Как упоминалось выше, DA – прогиб (f), DB – половина длины изгибаемого элемента ($0.5L$), САВ обозначим l_0 , тогда формула примет следующий вид:

$$l_0 = \frac{\sqrt{f^2 + (0.5L)^2}}{2 \sin\left(\operatorname{atan}\left(\frac{f}{0.5L}\right)\right)} 4 \operatorname{atan}\left(\frac{f}{0.5L}\right) \quad (6)$$

Важно учитывать, что изгибаемый элемент является составным, поэтому необходимо отдельно найти радиусы кривизны нижнего бруса R_1 и верхнего R_2 , поэтому для верхней балки формула:

$$R_2 = \frac{\sqrt{f^2 + (0,5 \cdot L)^2}}{2 \sin\left(\operatorname{atan}\left(\frac{f}{0,5L}\right)\right)} - \Delta R_2 \quad (7)$$

А для нижней:

$$R_1 = \Delta R_1 + \frac{\sqrt{f^2 + (0,5 \cdot L)^2}}{2 \sin\left(\operatorname{atan}\left(\frac{f}{0,5L}\right)\right)} \quad (8)$$

где ΔR_i – разница i -го радиуса кривизны и радиуса кривизны средней линии составного бруса, равная половине высоты i -го бруса.

Длины дуг нижнего l_1 и верхнего l_2 можно определить по формуле:

$$l_i = R_i \cdot 4 \operatorname{atan}\left(\frac{f}{0,5L}\right) \quad (9)$$

Идеализируя модель, что длина дуги в пределах бруса остается постоянной, можно принять длину дуги нижнего волокна верхнего бруса равной l_2 , а верхнего волокна нижнего бруса равной l_1 . В таком случае для определения величины взаимного смещения брусьев вычтем одно значение из другого и возьмем среднее арифметическое по ним, поэтому получим конечную формулу:

$$\Delta_1 = \Delta_2 = \frac{1}{2} \cdot l_2 - l_1 \quad (10)$$

Важно отметить, что полученные результаты по формуле можно сравнивать исключительно для необъединенных деревянных брусьев, поэтому качественным показателем совместной работы двух брусьев будет являться отношение значений графиков друг другу. Если отношение будет увеличиваться и показания составной балки будут смещаться ближе к оси абсцисс, то можно будет сделать вывод о том, что полимеркомпозитные нагели действительно влияют на продольные деформации деревянного изгибаемого элемента в сторону лучшей совместной работы.

Далее, в соответствии с вышеуказанными формулами, были вычислены значения продольных деформаций необъединенной составной балки. В качестве прогибов были взяты значения, полученные по результатам проведенного эксперимента, выведенные данные были сведены в таблицу 3.

Таблица 3

Значения показателей перемещений и прогибов, найденные разными методами

Нагрузка P, кН	Прогиб балки f, мм	Продольные перемещения между брусьями Δ , мм	
		Аналитический расчет	Экспериментальные данные
5	4,67	0,934	1,15
7,5	7,42	1,484	1,70
10	10,41	2,082	2,23

Окончание таблицы 3

12,5	13,65	2,73	2,80
15	16,83	3,366	3,34
17,5	20,92	4,184	3,94

Рассматривая таблицу 3, можно сделать вывод о том, что полученная формула 9 достаточно точно описывает реальный эксперимент, а коэффициент детерминации составляет 0,9934. Эффект влияния нагелей на совместную работу брусьев замечен при введении коэффициента K , представляющего собой отношение рассчитанных по формуле 10 значений продольных деформации к результатам натурального эксперимента для каждого количества нагелей, который в дальнейшем представлен в таблице 4.

Таблица 4

Значения отношений функций аналитических и реальных перемещений

Количество нагелей	Нет объединения	2 нагеля	4 нагеля	6 нагелей	8 нагелей
Коэффициент K	1,003	1,14	1,21	1,57	1,64
Прирост на один нагель	-	0,070	0,053	0,095	0,080

По показателю K из таблицы 4 заметим, что 6 нагелей, расположенных в крайних зонах ограниченные 1/4 пролета составной балки, является наиболее эффективным количеством. Это можно объяснить тем, что теоретически в зоне 1/4 пролета на краях балки сосредоточены экстремумы срезающих напряжений исследуемой конструкции.

Таким образом, в статье приведены два метода, которые количественно доказывают увеличение несущей способности деревянной балки со стеклопластиковыми нагелями, а корректное размещение нагелей позволяет снизить прогибы и продольные деформации составной балки.

Также похожий эффект включения нагелей в работу составной деревянной балки был описан в работе Стоянова В.В. [16]. В данной статье влияние нагелей было более заметно, что обусловлено наклонным расположением нагелей, большим диаметром использованных стержней и исключением трения между контактирующими поверхностями брусьев.

4. Заключение

1. Проведенные натурные эксперименты и аналитические расчеты свидетельствуют о включении цилиндрических полимеркомпозитных (из стеклоровинга) нагелей в работу конструкции составной балки, что приводит к увеличению изгибной жесткости за счет уменьшения вертикальных и горизонтальных деформаций элементов.

2. В итоге было получено, что наиболее эффективным конструктивным решением для составной деревянной балки является расположение нагелей по краям изгибаемого элемента в зоне 1/4 пролета, где эпюра срезающих напряжений исследуемой конструкции имеет свой максимум.

3. Значения продольных перемещений брусьев в составной деревянной балке, полученные по формуле 10, могут быть использованы на этапе проектирования для предварительной оценки деформативности конструкции и несущей способности при размещении нагельных соединений.

4. По результатам исследования работы цилиндрических полимеркомпозитных нагелей в составе деревянной балки дальнейшей перспективной областью исследований является оптимизация схемы установки нагелей. Будущие натурные эксперименты нацелены на исследование работы нагелей под углом к оси элемента и улучшение условий контакта нагелей с древесиной при помощи клеевых составов.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке ООО «Производственное Объединение ГСКА».

Список литературы / References

1. Сафронов В.С. Вероятностный анализ надежности разрезного деревянного автомобильного моста // Строительная механика и конструкции. – 2021. – С. 49-60. [Safronov V.S. Probabilistic Analysis of the Reliability Sliding Wooden Road Bridge // Structural mechanics and constructions. – 2021. – P. 49-60.].
2. Уткин В.А., Матвеев С.А. Особенности проектирования деревянных мостов автомобильных лесовозных дорог // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 1. С. 126–152. <https://doi.org/10/37482/0536-1036-2023-1-126-152>. [Utkin V.A., Matveev S.A. Features of Designing Wooden Bridges of the Forest Complex // News of universities. Lesnoy Zhurnal, 2023. No. 1. P. 126–152. <https://doi.org/10/37482/0536-1036-2023-1-126-152>.].
3. Медведев. И.Н. Перспективы применения конструкционного материала на основе малоценной древесины мягких лиственных пород для мостов на лесовозных автомобильных дорогах // Современные машины, оборудование и IT-решения лесопромышленного комплекса: теория и практика. – 2021. – с. 240-244. DOI: 10.34220/ММЕИТСИС2021_240-244. [Medvedev. I.N., Vorotnikov D.A. Prospects for the Use of Structural Material Based on Low-Value Soft Hardwood Wood for Bridges on Harvesting Roads // Modern Machines, Equipment and IT Solutions for the Timber Industry: Theory and Practice. – 2021. – P. 240-244. DOI: 10.34220/ММЕИТСИС2021_240-244.].
4. Jiale Zhou, Chuanxi Li. Experimental Study on Loading Capacity of Glued-Laminated Timber Arches Subjected to Vertical Concentrated Loads. Hindawi. Advances in Civil Engineering Volume 2020, Article ID 7987414, 9 p. <https://doi.org/10.1155/2020/7987414>
5. Зиннуров. Т. А., Нурмухаметов К.А. Исследование совместной работы деревянных составных балок // Современное строительство и архитектура. – 2017. – № 4(08). – С. 20-23. – DOI 10.18454/mca.2017.08.4. [Zinnurov T.A., Nurmuhametov K.A. Study of Joint Operation of Clarke Beams // Modern Construction and Architecture. - 2017. - No. 4 (08). - P. 20-23. – DOI 10.18454/mca.2017.08.4.].
6. M. Rashidi, A.N. Hoshyar, L. Smith, Bijan samali, R. Siddique. Acomprehensive taxonomy for structure and material deficiencies, preventions and remedies of timberbridges, Journal of Building Engineering (2020), doi: <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101624>
7. В. С. Сапаев. Совершенствование конструкции деревянных пролетных строений с составными прогонами из бревен (брусьев) // Фундаментальные и прикладные исследования молодых ученых. – 2022. – С. 221-225. [V. S. Sapaev. Improving the Design of Wooden Superstructures With Composite Girders Made of Logs (Beams) // Fundamental and Applied Research of Young Scientists. – 2022. – P. 221-225.].
8. Aruova L.B., Ospanova Z.N., Alibekova B.B. Cyclic Tests of Joints of Glued Wooden Structures // IOP Conferences Series Materials and Engineering 829 (2020).
9. Зиннуров Т.А., Новицкий Е.В. Определение прогиба составных деревянных изгибаемых элементов, армированных цилиндрическими полимеркомпозитными нагелями // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 5. С. 697–708. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.5.697-708. [Zinnurov T.A., Novitsky E.V. Deflection determination of composite wood bending elements reinforced with cylindrical polymer composite dowels. Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(5):697-708. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.5.697-708 (rus.).].
10. Benjamin Kromoser. Design Concept for Green Timber Truss Bridge in City Area. Sustainability (2020), 12, 3218.
11. Ita Minarmi. Innovation of Substitute Material to Conservation Effort of Eusideroxulon Zwageri on Wooden Bridge Maintence Project. Technium Vol.3, Issue 8. P. 103-109 (2021).

12. Jozef Švajlenka, Mária Kozlovská. Construction of Buildings on Solid Wooden Elements. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 1203 (2021) 022073/IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/1203/2/022073
13. Абрамян С.Г., Илиев А.Б. Основные требования к быстровозводимым строительным системам // Инженерный вестник Дона, №4 (2017). [Abramyan S.G., Piev A.B. Basic requirements for prefabricated building systems // Engineering Bulletin of the Don, No. 4 (2017).].
14. Авуцевиц А.Х., Егорова А.А., Скоробогатая А.С. Быстровозводимые сборно-разборные мосты многократного применения для ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций // Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. 2015. №1-1(4). С. 25-28. [Avgutsevichs A.Kh., Egorova A.A., Skorobogataya A.S. Prefabricated collapsible bridges of multiple use for liquidation of consequences of emergency situations // Problems of ensuring safety in the liquidation of consequences of emergency situations. 2015. No. 1-1(4). P. 25-28.].
15. Способ изготовления составных балок: пат. 68974 СССР №41721 (305261); заявл. 13.03.1941 г; опубл. 31.07.1947. [Method for the manufacture of composite beams: Pat. 68974 USSR No. 41721 (305261); dec. 03/13/1941; publ. 07/31/1947.].
16. Стоянов, В. В. Повышение несущей способности деревянных изгибаемых элементов / В. В. Стоянов, Ш. Жгалли // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2016. – № 1(349). – С. 115-121. – DOI 10.17238/issn0536-1036.2016.1.115. – EDN VJJZOB. [Stoyanov, V.V. Increasing the load-bearing capacity of wooden bending elements / V.V. Stoyanov, Sh. Zhgalli // News of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal. – 2016. – No. 1(349). – P. 115-121. – DOI 10.17238/issn0536-1036.2016.1.115. – EDN VJJZOB.]
17. Арипов Д.Н., Кузнецов И.Л., Салахутдинов М.А. Несущая способность листовых фасонки из пултрузионного стеклопластика в решетчатых конструкциях // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 8. С. 1115–1125. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.8.1115-1125. [Aripov D.N., Kuznetsov I.L., Salakhutdinov M.A. Bearing capacity of pultrusion fiberglass gusset sheets in frame structures. Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(8):1115-1125. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.8.1115-1125 (rus.).].
18. В.Н.Паймушин, Р.А.Каюмов, С.А.Холмогоров, В.М.Шишкин, Определяющие соотношения в механике перекрестно армированных волокнистых композитов при кратковременном и длительном одноосном нагружении / Известия вузов. Математика.- 2018, №6, с. 85–91, издательство: КФУ, Казань, Россия, Известия высших учебных заведений. Математика, номер: 6, 2018, 85–91 с., 0 п.л. [V.N.Paimushin, R.A.Kayumov, S.A.Kholmogorov, V.M.Shishkin, Constitutive relations in the mechanics of cross-reinforced fibrous composites under short-term and long-term uniaxial loading / Izvestiya vuzov. Mathematics. - 2018, No. 6, P. 85–91.].

Информация об авторах

Зиннуров Тагир Альмирович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры автомобильных дорог, мостов и тоннелей, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: leongar@mail.ru

Новицкий Егор Владиславович, лаборант кафедры автомобильных дорог, мостов и тоннелей, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: egorka.no@gmail.com

Пермяков Станислав Викторович, лаборант кафедры автомобильных дорог, мостов и тоннелей, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация,

Email: theunknown1233210@gmail.com

Сулейманов Альфред Мидхатович, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: sulejmanov@kgasu.ru

Information about the authors

Tagir A. Zinnurov, Candidate of Technical Sciences, senior researcher of the Department of Highways, Bridges and Tunnels, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: leongar@mail.ru

Egor V. Novitsky, Laboratory assistant of the Department of Highways, Bridges and Tunnels, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: egorka.no@gmail.com

Stanislav V. Permyakov, Laboratory assistant of the Department of Highways, Bridges and Tunnels, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: theunknown1233210@gmail.com

Alfred M. Suleymanov, doctor of technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: sulejmanov@kgasu.ru

УДК: 624.012
DOI: 10.52409/20731523_2023_3_122
EDN: JKTSTG



Численное исследование напряженно-деформированного состояния в зоне контакта бетона и арматуры при статическом нагружении

Илшат Т. Мирсаяпов¹, Р.И. Минзянов¹, А.М. Зайнутдинов²

¹ Казанский государственный архитектурно-строительный университет
г. Казань, Российская Федерация

² ПИ Союзхимпромпроект, г. Казань, Российская Федерация

Аннотация: Метод конечных элементов используется для имитации поведения зоны контакта «бетон-арматура» при испытании на отрыв одиночного стержня, заделанного в бетонный блок. В предлагаемой модели в зону контакта вводятся элементы, моделирующие деформации арматуры и окружающего бетона и имитирующие перенос нагрузки. Такой подход позволяет точно моделировать нелинейный отклик при высоких ограничивающих давлениях. Цель исследования: при заданных геометрических, физико-механических характеристиках выбрать наиболее подходящие теории прочности материалов для использования созданной модели при решении научных, технических и инженерных задач. Для достижения поставленной цели необходимо выполнить ряд задач: создать компьютерную модель, задать ей необходимые характеристики материалов для корректной работы; выполнить верификационный расчет, сравнить его с существующими экспериментальными и теоретическими исследованиям; сделать вывод о работоспособности модели и областях ее применения.

Результаты. Предложена модель в программном комплексе Ansys, основанная на методе конечных элементов. При разработке модели учитывался опыт отечественных и зарубежных ученых и исследователей в части выбора конечных элементов. Модель учитывает реальные геометрические, механические, физические параметры объектов. Модель позволяет задать различную геометрию и физико-механические характеристики материалов. Получены результаты испытания 9 образцов. Приводится сравнение конечно-элементной модели с натурными экспериментами.

Выводы. В результате сравнения установлено, расчет по предложенной численной модели хорошо согласуется с результатами экспериментальных исследований других авторов. Данную модель рекомендуется использовать для определения напряжений и перемещений в контактной зоне «бетон-арматура» для решения научных и инженерных задач.

Ключевые слова: железобетон; сцепление арматуры с бетоном; метод конечных элементов; модель пластичности повреждений бетона 2 (CDPM2); испытание на отрыв

Для цитирования: Мирсаяпов Илшат Т., Минзянов Р.И., Зайнутдинов А.М. Численное исследование напряженно-деформированного состояния в зоне контакта бетона и арматуры при статическом нагружении // Известия КГАСУ, 2023, № 3(65), с.122-134, DOI: 10.52409/20731523_2023_3_122, EDN: JKTSTG

Numerical study of the stress-strain state in the contact zone of concrete and reinforcement under static loading

Ilshat T. Mirsayapov¹, R.I. Minzyanov¹, A.M. Zainutdinov²

¹ Kazan State University of Architecture and Engineering
Kazan, Russian Federation

²DI Soyuzkhimpromproekt, Kazan, Russian Federation

Abstract: The Finite Element Method is used to simulate the behavior of the concrete-reinforcement contact zone when testing the pull-out of a single bar embedded in a concrete block. In the proposed model, elements are introduced into the contact zone, simulating deformations of reinforcement and surrounding concrete and simulating load transfer. This approach allows accurate modeling of the nonlinear response at high confining pressures. The purpose of the study: for given geometric, physical and mechanical characteristics, to choose the most appropriate theories of the strength of materials for using the created model in solving scientific, technical and engineering problems. To achieve this goal, it is necessary to perform a number of tasks: create a computer model, set the necessary characteristics of materials for it to work correctly; perform a verification calculation, compare it with existing experimental and theoretical studies; make a conclusion about the performance of the model and the areas of its application.

Results. We propose a model in the Ansys software package based on the finite element method. When developing the model, the experience of domestic and foreign scientists and researchers in terms of the choice of finite elements was taken into account. The model takes into account the real geometric, mechanical, physical parameters of objects. The model allows you to set different geometry and physical and mechanical characteristics of materials. The test results of 9 samples were obtained. A comparison of the finite element model with full-scale experiments is given.

Conclusions. As a result of the comparison, it was established that the calculation by the proposed numerical model is in good agreement with the results of experimental studies by other authors. This model is recommended to be used to determine stresses and displacements in the contact zone "concrete-reinforcement" for solving scientific and engineering problems.

Key words: reinforced concrete; adhesion of reinforcement to concrete; finite element method; concrete damage plasticity model 2 (CDPM2); pull-out test

For citation: Mirsayapov Ilshat T., Minzyanov R.I., Zainutdinov A.M. Numerical study of the stress-strain state in the contact zone of concrete and reinforcement under static loading // News KSUAE, 2023, № 3(65), p.122-134, DOI: 10.52409/20731523_2023_3_122, EDN: JKTSTG

1. Введение

Железобетон представляет собой композитный конструкционный материал, состоящий из арматурной стали и бетона. Для совместной работы требуется адекватная передача усилия между бетоном и арматурой, которая называется сцеплением. Стандартный способ исследования поведения сцепления, включая механизм передачи нагрузки в зоне контакта, факторы, влияющие на прочность контакта, и зависимость силы сцепления (или напряжения) от проскальзывания, заключается в проведении теста на отрыв.

Испытание на выдергивание проводится таким образом, что одиночная стержневая арматура, заделанная в бетонный цилиндр или призму, вытягивается в осевом направлении до разрушения испытуемого образца.

Конечно-элементное моделирование часто используется в дополнение к натурным экспериментам для исследования поведения систем и компонентов. Для железобетонных компонентов и систем, подвергающихся нагрузке, точное моделирование реакции требует точного описания зоны контакта (реакции зоны соединения).

Существует несколько подходов к моделированию зоны контакта бетона и арматуры. В обзоре и сравнении методов исследования характеристик сцепления арматуры с бетоном, автор в работе [1] приходит к выводу, что наиболее предпочтительным методом для исследования характеристик сцепления является beam-end test (исследование балок), поскольку данный метод позволяет в точности моделировать напряженно-деформированное состояние (НДС) бетона зоны заделки и корректно учитывать влияние на прочность сцепления таких факторов как интенсивность поперечного армирования, толщина защитного слоя, длина заделки и пр. Вместе с тем, использование данного метода связано с наибольшими технологическими трудностями при проведении испытания.

В процессе сопротивления стальной стержневой профилированной арматуры возникают последовательно три стадии: разрушение адгезионных связей, срез бетонных шпонок под арматурными выступами и разрушение образца (вытягивание арматуры или раскол призмы). Величину сцепления цементного геля между арматурой и бетоном определяли в работе [2]. Моделирование выполнялось в программном комплексе (ПК) Ansys 19.0 Workbench. В результате исследования было установлено, что адгезия не оказывает существенное влияние на несущую способность заделки, но может оказывать влияние на величину смещения в тех случаях, когда нагрузка не превышает 40% от разрушающей.

Интересный подход к моделированию прочности сцепления арматуры с бетоном авторы предложили в работе [3]. Исследователи предложили модель на основе искусственной нейронной сети. Данный метод может быть использован при обработке результатов численных и экспериментальных исследований.

В работе [4] сцепление арматуры с бетоном моделируются в ПК Ansys в виде многпустотной плиты перекрытия, а в работе [5] – в ПК Лира САПР в виде монолитной железобетонной плиты перекрытия существующего здания. Результаты расчетов по данным исследованиям согласуются с результатами экспериментов.

Зависимость прочности сцепления стальной арматуры с бетоном при наличии в нем определенных минеральных добавок исследовалась в работе [6]. Опытные результаты показали, что главным образом прочность сцепления между арматурой и цементным камнем зависит от коррозионной стойкости арматуры. Добавление минеральных добавок к бетону может увеличить прочность сцепления в 1,7 раз по сравнению с бетонами без добавок. Это может быть особенно важно для конструкций, эксплуатирующихся в агрессивных средах, к примеру, морские гидротехнические конструкции.

Большое внимание проблемам сцепления арматуры с бетоном уделяется также и за рубежом. Такой интерес связан с огромным потенциалом данной области, который позволяет испытывать новые конструкции и материалы без создания экспериментальных образцов, что экономит материальные, финансовые ресурсы и время.

Так, авторским коллективом из Университета Хохай, Китай, проводилась численная оценка связей сцепление-скольжение для естественно корродированных арматурных стержней в бетонных балках [7]. Применение метода конечных элементов показало хорошие результаты сходимости. Основным выводом этого исследования было то, что для адекватного описания структурного поведения решающими факторами были потеря связи при текучести и асимметрия развития текучести.

Сравнение сцепления стальной и полимерной композитной арматуры выполнено в работе [8]. При помощи ПК Ansys авторами сделан вывод, что сцепление полимерной арматуры с бетоном ниже, чем стальной. Предложены способы увеличения сопротивления заделки.

Исследования [9] и [10] также представляют большой интерес, поскольку наряду с численным моделированием выполнялось и экспериментальное. Результаты исследования показали, что наличие ребер приводит к среднему увеличению напряжений (примерно 33–67%), а введение возможного производственного брака вызывает резкое увеличение напряженности (примерно в 2–3,3 раза превышает приложенное среднее растягивающее напряжение).

Большое внимание поведения бетона на границе раздела сред «арматура-бетон» уделено в работе [11]. Авторами предложены две модели контакта, каждая из которых обладает своими преимуществами и недостатками.

В работе [12] представлена новая модель определения сцепления арматуры с бетоном. Модель основана на теории раскалывания Залесова, Сахарова, Старчевского. Методика и модель имеют хорошую сходимость с существующими теоретическими и экспериментальными исследованиями, и рекомендуется для оценки прочности сцепления.

Многими авторами проводились экспериментальные исследования. Многообразие форм, размеров, видов профиля арматуры, классов бетона и стали вызывает сложности в классификации всех методов испытания. Наиболее распространенным видом экспериментального исследования является вытягивание арматуры, заделанной в бетонный блок тем или иным образом. Среди таких исследований можно выделить эксперимент А.А. Квасникова [13]. Им проводились эксперименты по вытягиванию центрально расположенных стержней из бетонных блоков в виде усеченной пирамиды. Высота 400 мм, сторона верхнего основания 150 мм, нижнего – 200 мм. Пирамиды были изготовлены в жестком железобетонном массиве размерами 1000x3000x400 мм. Выдергивание стержней проводилось гидродомкратом мощностью до 75 т. В результате были получены аппроксимирующие зависимости между сцеплением и параметрами арматурного профиля.

В работе [14] приведены экспериментальные методы исследования сцепления арматуры с бетоном. Большой интерес также представляют работы [15]-[16], в которых приводится модифицированная диаграмма сжатия бетона, позволяющая получать наиболее приближенные значения численных экспериментов к реальным конструкциям.

Как видно из анализа состояния вопроса, одним из основных факторов, влияющих на адекватность работы модели, является зона контакта «сталь-бетон». Вопрос по-прежнему остается открытым, какой же способ моделирования сцепления наиболее близок к сцеплению в реальных конструкциях.

Таким образом, целью настоящего исследования является определение геометрических, физико-механических характеристик численной модели, а также выбор наиболее подходящих теорий прочности материалов для использования созданной модели при решении научных, технических и инженерных задач. В рамках данной работы необходимо выполнить следующие задачи: создать компьютерную модель, задать ей необходимые характеристики материалов для корректной работы; выполнить верификационный расчет, сравнить его с существующими экспериментальными и теоретическими исследованиями; сделать вывод о работоспособности модели и областях ее применения.

2. Материалы и методы

Для решения задачи метода конечных элементов выбран ПК ANSYS. Для анализа принимается тип задачи Static Structural (статический прочностной расчета). Статический прочностной анализ позволяет определить перемещения, напряжения, деформации и внутренние усилия в конструкциях или элементах, от нагрузок, не обладающих значительной инерцией или динамикой. Предполагается, что нагрузки и реакция не имеют мгновенного изменения во времени.

Для моделирования бетона и арматуры используется пространственный 8-узловой конечный элемент SOLID185. SOLID185 используется для трехмерного моделирования твердых тел. Он определяется восемью узлами, имеющими три степени свободы в каждом узле: перемещения по осям x , y и z . Элемент обладает пластичностью, гиперэластичностью, жесткостью при напряжении, ползучестью, большим прогибом и большой деформацией. Он также обладает смешанной формульной способностью для моделирования деформаций почти несжимаемых эластопластичных материалов и полностью несжимаемых гиперэластичных материалов (см. рис. 1).

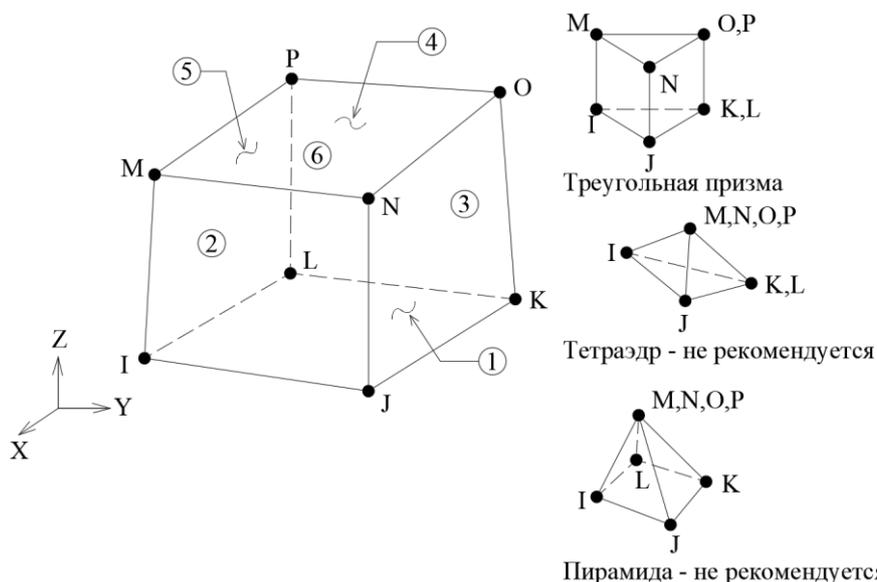


Рис. 1. Геометрия однородного твердого тела SOLID185 (иллюстрация авторов).
 Fig. 1. Geometry of a homogeneous solid SOLID185 (illustration by the authors).

Свойства материалов принимаются по СП 63.13330 в виде кусочно-линейных зависимостей. Для бетона будем использовать трехлинейную диаграмму (пример диаграммы для бетона В25 на рис. 2), для арматуры – двухлинейную диаграмму Прандтля (пример диаграммы для арматуры А400 на рис. 3). На диаграммах показаны зависимости напряжений в материалах от относительных деформаций.

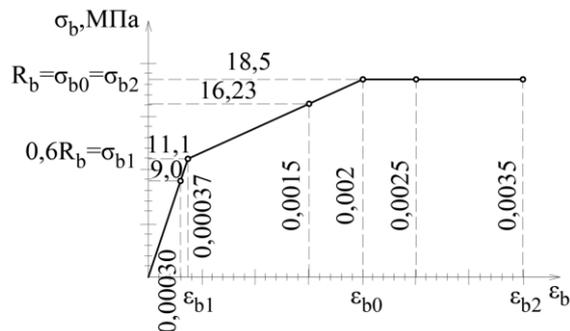


Рис. 2: Диаграмма состояния бетона В25 по СП63.13330 (иллюстрация авторов).
 Fig. 2: Diagram of the state of concrete B25 according to SP63.13330 (illustration by the authors).

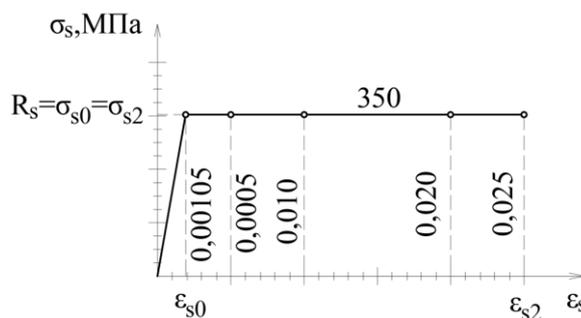


Рис. 3. Диаграмма состояния арматуры А400 по СП63.13330 (иллюстрация авторов).
 Fig. 3. A400 valve state diagram according to SP63.13330 (illustration by the authors).

В качестве расчётных моделей принимаются поверхности текучести Мизеса и Друкера-Прагера (см. рис 4).

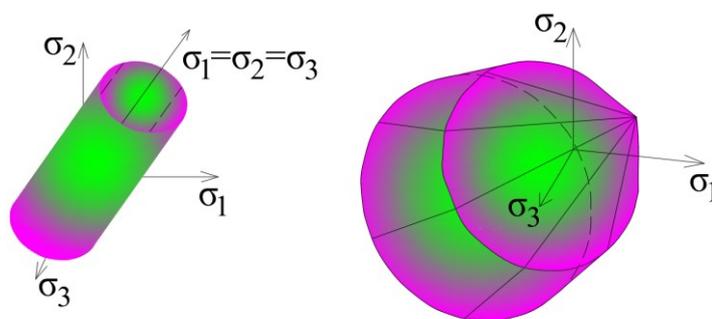


Рис. 4. Поверхности текучести Мизеса и Друкера-Прагера (иллюстрация авторов).

Fig. 4. Mises and Drucker-Prager yield surfaces (illustration by the authors).

Критерий прочности по Мизесу:

$$f(\sigma, \sigma_y) = \sigma_e - \sigma_y = 0, \tag{1}$$

по Друкеру-Прагеру для растяжения и сжатия соответственно

$$f_{DPt} = \frac{\sigma_e}{\sqrt{3}} + \beta_t \cdot \sigma_m - \sigma_{yt}, \tag{2}$$

$$f_{DPC} = \frac{\sigma_e}{\sqrt{3}} + \beta_c \cdot \sigma_m - \sigma_{yc} \cdot \Omega_c. \tag{3}$$

Для моделирования контакта используются элементы CONTA174 и TARGE170. CONTA174 используется для создания контакта и скольжения между трехмерными целевыми поверхностями и деформируемой поверхностью, определяемой этим элементом. Элемент применим для трехмерного структурного и связанного анализа контактов. Может использоваться как для парного, так и для общего контакта. TARGE170 используется для представления различных трехмерных целевых поверхностей для соответствующих контактных элементов (CONTA174). Сами контактные элементы перекрывают твердое тело, оболочку или линейные элементы, описывающие границу деформируемого тела, и потенциально находятся в контакте с целевой поверхностью, определенной в TARGE170.

3. Результаты и обсуждение

Для анализа НДС в зоне контакта бетона и арматуры были созданы 9 образцов с различными характеристиками (Таблица 1).

Таблица 1

Характеристики образцов для численного исследования

№ п/п	Размеры сечения, мм	Высота, мм	Длина заделки, мм	Класс арматуры	Диаметр, мм	Класс бетона
1	Ø200	300	200	A400	12	B25
2	Ø250	300	200	A400	12	B30
3	Ø250	300	200	A400	12	B35
4	Ø300	350	250	A400	14	B25
5	Ø300	350	250	A400	14	B30
6	Ø300	350	250	A400	14	B35
7	Ø350	400	300	A400	16	B25
8	Ø350	400	300	A400	16	B30
9	Ø350	400	300	A400	16	B35

Размеры периодического профиля, принятые по ГОСТ 5781, представлены в таблице 2.

Таблица 2.

Размеры профилей в мм

d_n	d	h	d_l	h_l	l	b	b_l	r
12	11,0	1,25	13,5	1,25	7	1,0	2,0	1,9
14	13,0	1,25	15,5	1,25	7	1,0	2,0	1,9
16	15,0	1,5	18	1,5	8	1,5	2,0	2,2

Ниже (рис. 5-7) представлены изополюса распределения главных напряжений в бетонном образце №1.

Эквивалентные напряжения (Equivalent (von-Mises) Stress) определяются по формулам (2), (3).

Если для главных напряжений справедливо неравенство $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, то Maximum Principal отображает главное напряжение σ_1 , Middle Principal – σ_2 , Minimum Principal – σ_3 .

Полное перемещение (Total deformation) определяется из условия:

$$u = \sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}. \quad (4)$$

Касательные напряжения (Maximum Shear) рассчитываются по формуле:

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}. \quad (5)$$

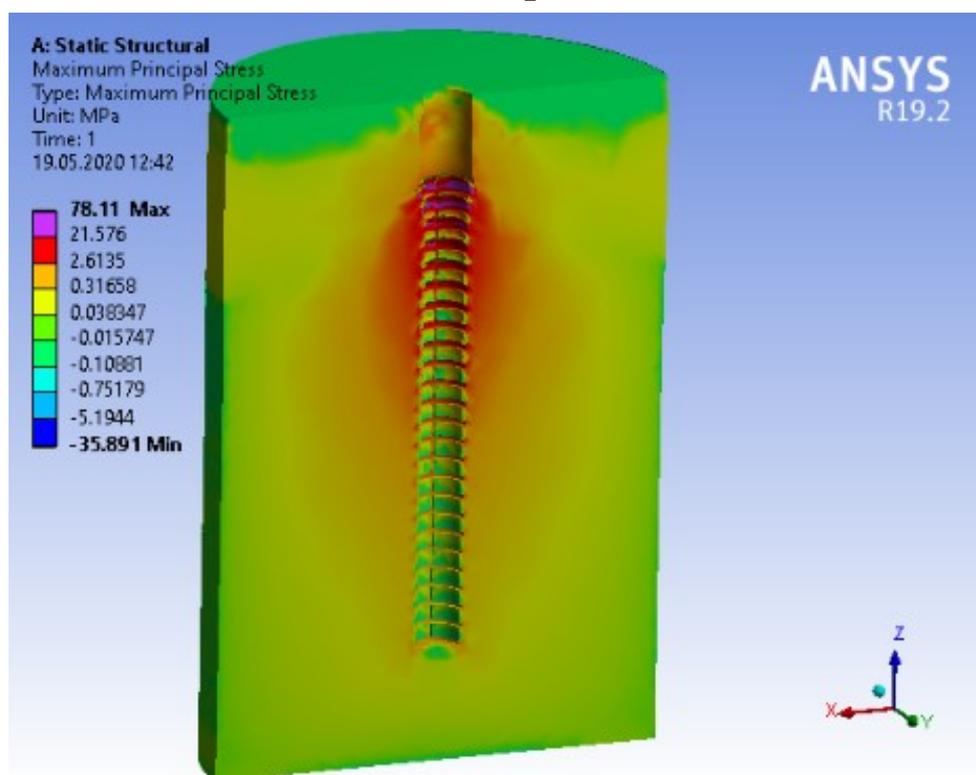


Рис. 5. Распределение главных напряжений σ_1 (МПа) в бетоне для образца №1 (иллюстрация авторов).

Fig. 5. Distribution of principal stresses σ_1 (MPa) in concrete for sample №1 (illustration by the authors).

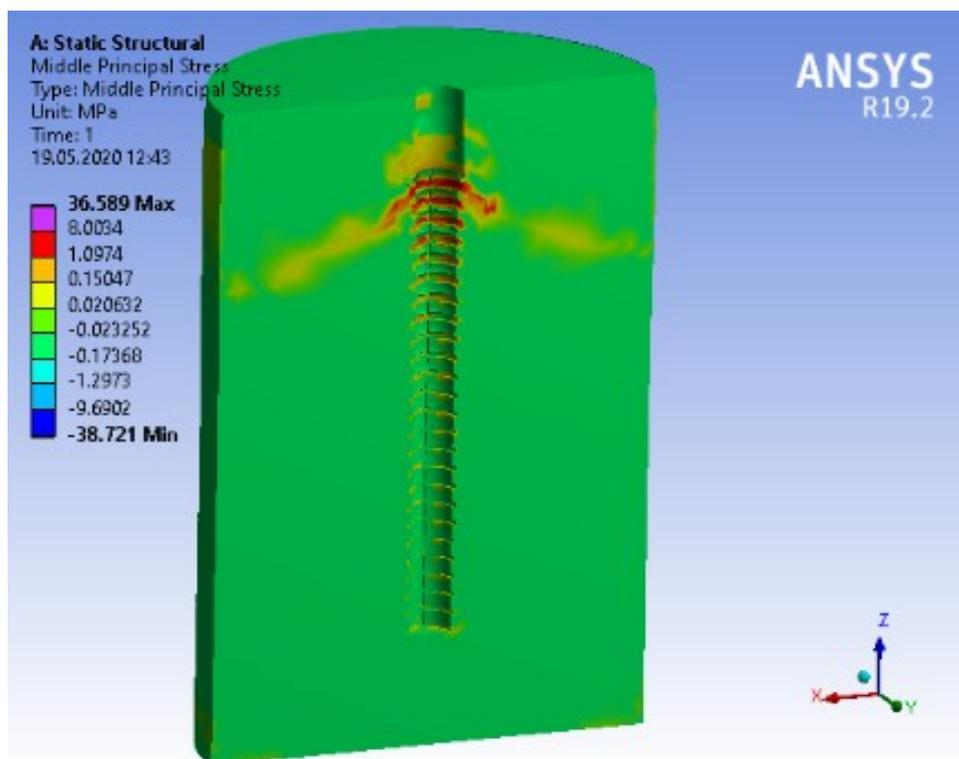


Рис. 6. Распределение главных напряжений σ_2 (МПа) в бетоне для образца №1 (иллюстрация авторов).

Fig. 6. Distribution of principal stresses σ_2 (MPa) in concrete for sample №1 (illustration by the authors).

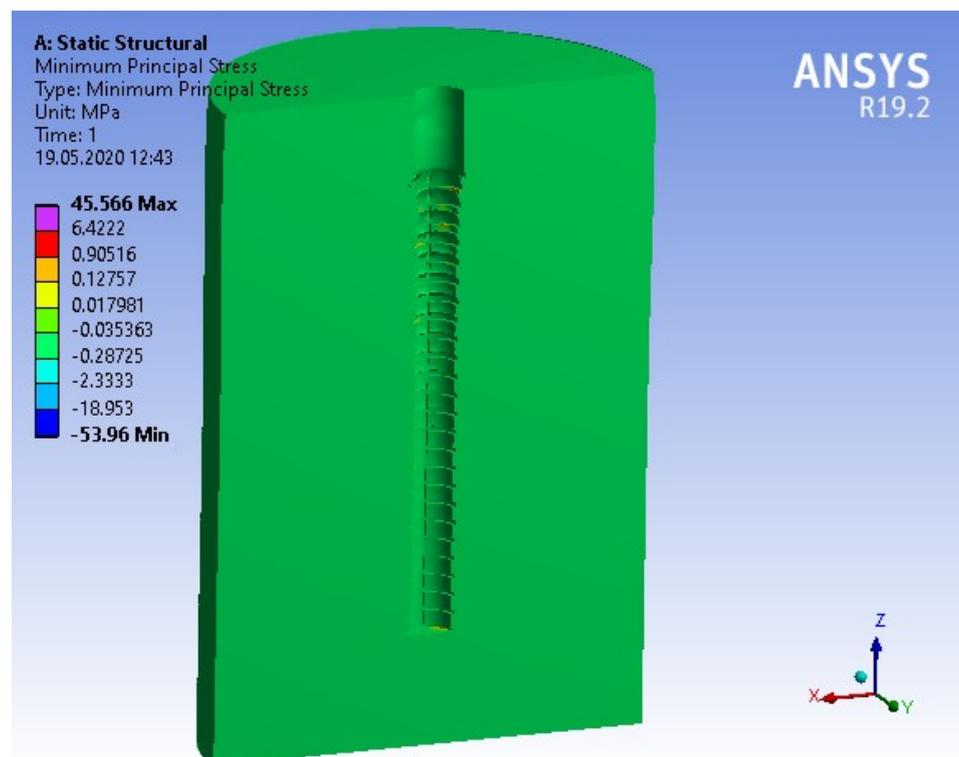


Рис. 7. Распределение главных напряжений σ_3 (МПа) в бетоне для образца №1 (иллюстрация авторов).

Fig. 7. Distribution of principal stresses σ_3 (MPa) in concrete for sample №1 (on the right - enlarged) (illustration by the authors).

На рисунках 8-10 представлены результаты расчета образцов, приведенных в таблице 1.

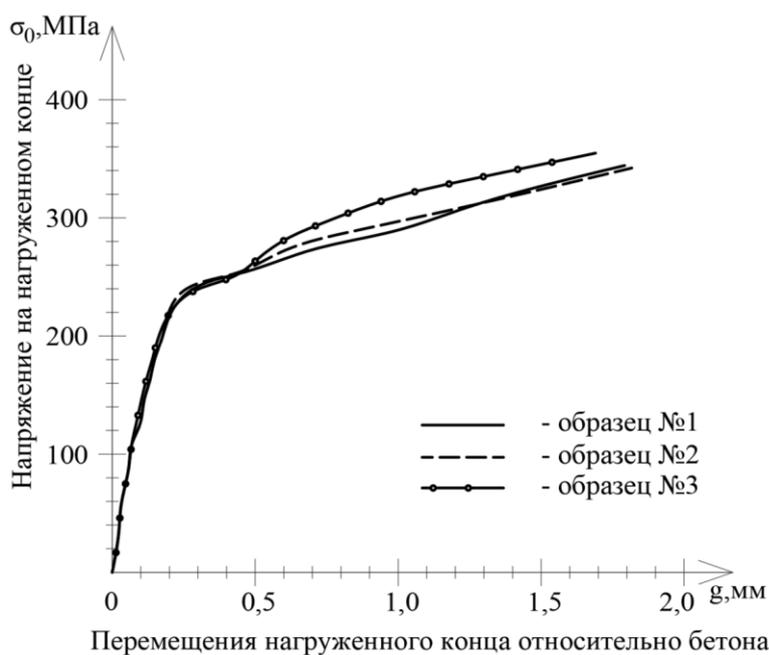


Рис. 8. Зависимость напряжений в арматурном стержне от перемещений нагруженного конца стержня (образцы 1÷3) (иллюстрация авторов).
 Fig. 8. Dependence of stresses in the reinforcing bar on the displacements of the loaded end of the bar (samples 1÷3) (illustration by the authors).

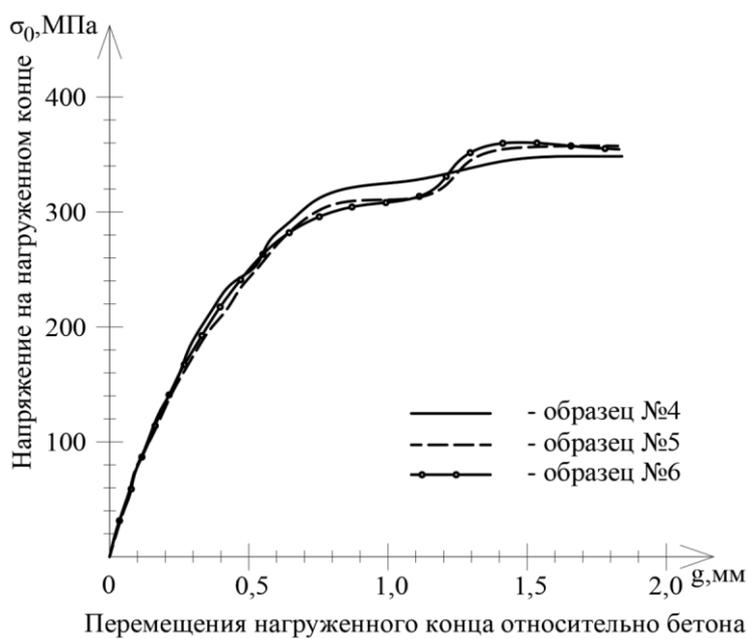


Рис. 9. Зависимость напряжений в арматурном стержне от перемещений нагруженного конца стержня (образцы 4÷6) (иллюстрация авторов).
 Fig. 9. Dependence of stresses in the reinforcing bar on the displacements of the loaded end of the bar (samples 4÷6) (illustration by the authors).

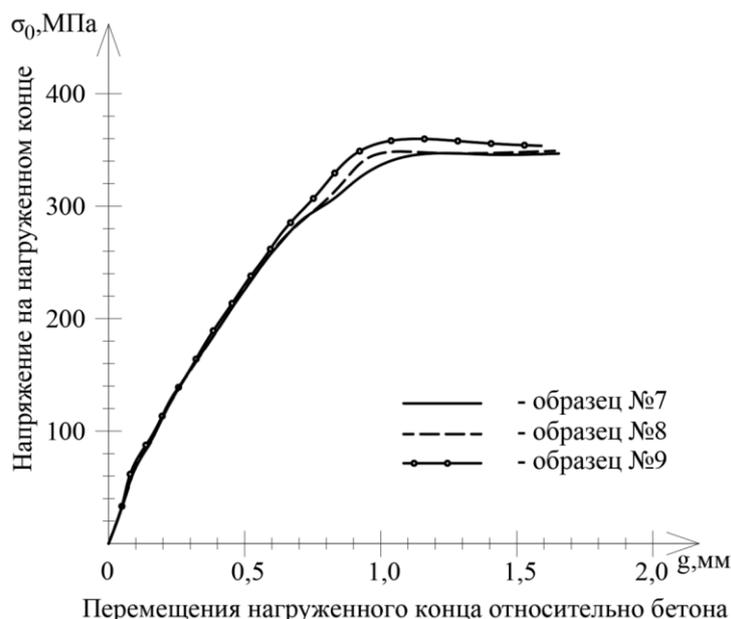


Рис. 10. Зависимость напряжений в арматурном стержне от перемещений нагруженного конца стержня (образцы 7÷9) (иллюстрация авторов).

Fig. 10. Dependence of stresses in the reinforcing bar on the displacements of the loaded end of the bar (samples 7÷9) (illustration by the authors).

По данным, представленным на рисунках 8-10, можно провести аналогию с зависимостями, полученными в работах [12], [13], что может говорить о сходимости результатов настоящего исследования с работами других авторов.

По рисункам 8-10 отчетливо видны участки упругой работы заделки арматуры в бетоне. Начиная с напряжений 250-300 МПа при перемещениях конца стержня на 0,5-0,7 мм начинается участок пластичной работы. Это вызвано деформациями бетонных консолей под выступами арматурного стержня. После пластической работы материала наступает разрушение, ниспадающая ветвь графика характеризует вырыв арматуры из бетонного блока.

Для сравнения результатов расчета выполняется их сравнению с экспериментальными данными, полученными в работе [13]. Также сравнение ведется с теорией, предложенной в работе [12].

Сравнение производится по формуле:

$$\delta = \frac{\sigma_{s0, \text{теор}}}{\sigma_{s0, \text{ANSYS}}}, \quad (6)$$

Таблица 3

Сравнение результатов расчета и экспериментов

	σ_{s0} , МПа	g_0 , мм
Теория [12]	347	1,52
ANSYS	355	1,59
Эксперимент А.А. Квасникова [13]	353	1,57
Теория/эксперимент А.А. Квасникова	0,9830	0,9681
ANSYS/эксперимент А.А. Квасникова	1,0057	1,0127

Общая картина, описывающая напряженно-деформированное состояние в зоне контакта бетона и арматуры, схожа для разработанной численной модели, теории и эксперимента А.А. Квасникова.

Можно заключить, что предложенная модель хорошо согласуется с результатами экспериментальных исследований и с теорией.

4. Заключение

1. Предложена модель в ПК Ansys, основанная на методе конечных элементов. При разработке модели учитывался опыт других ученых и исследователей в части выбора

элементов. Модель учитывает реальные геометрические, механические, физические параметры объектов.

2. Модель позволяет задать различную геометрию и физико-механические характеристики материалов. Получены результаты испытания 9 образцов.

3. В результате сравнения установлено, расчет по предложенной численной модели хорошо согласуется с результатами экспериментальных исследований других авторов, а также с теорией.

4. Модель подходит при решении научных, технических и инженерных задач при необходимости оценки уровня напряжений и перемещений в зоне контакта «бетон-арматура».

Список литературы / References

1. Стахов, Д. О. Обзор и сравнение методов исследования характеристик сцепления арматуры с бетоном / Д. О. Стахов // Молодой ученый. – 2021. – № 23(365). – С. 62-68. – EDN VWFIKC [Stakhov, D. O. Review and comparison of methods for studying the characteristics of adhesion of reinforcement with concrete / D. O. Stakhov // Young scientist. - 2021. - No. 23 (365). - P. 62-68. – EDN VWFIKC].
2. Аналитическое исследование величины сцепления цементного геля между арматурой и бетоном / А. Н. Николукин, В. П. Ярцев, С. А. Мамонтов [и др.] // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2020. – Т. 26. – № 3. – С. 483-495. – DOI 10.17277/vestnik.2020.03.pp.483-495. – EDN KIOXJK [Analytical study of the adhesion of cement gel between reinforcement and concrete / A. N. Nikolukin, V. P. Yartsev, S. A. Mamontov [et al.] // Bulletin of the Tambov State Technical University. - 2020. - T. 26. - No. 3. - S. 483-495. – DOI 10.17277/vestnik.2020.03.P.483-495. – EDN KIOXJK].
3. Моделирование прочности сцепления арматуры с бетоном на основе искусственной нейронной сети / А. Н. Николукин, В. П. Ярцев, Б. А. Бондарев, А. О. Корнеева // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2019. – № 2(54). – С. 11-20. – DOI 10.25987/VSTU.2019.54.2.001. – EDN ISNDAO [Nikoliukin A. N., Yartsev V. P., Bondarev B. A., Korneeva A. O. Modeling the adhesion strength of reinforcement to concrete based on an artificial neural network // Scientific Journal of Construction and Architecture. - 2019. - No. 2 (54). - P. 11-20. – DOI 10.25987/VSTU.2019.54.2.001. – EDN ISNDAO].
4. Ивашенко, Ю. А. Моделирование влияния нарушения сцепления арматуры с бетоном на прочность и деформативность изгибаемых железобетонных конструкций / Ю. А. Ивашенко // Наука ЮУрГУ : Материалы 69-й научной конференции, Челябинск, 04–05 апреля 2017 года / Министерство образования и науки Российской Федерации; Южно-Уральский государственный университет. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2017. – С. 17-23. – EDN ZVELJJ [Ivashenko, Yu. A. Modeling the effect of breaking the adhesion of reinforcement with concrete on the strength and deformability of bent reinforced concrete structures / Yu. Sciences of the Russian Federation; South Ural State University. - Chelyabinsk: Publishing Center of SUSU, 2017. - P. 17-23. – EDN ZVELJJ].
5. Mirsayapov, I. Research of the stress-strain state of a reinforced concrete beamless floor / I. Mirsayapov, E. Khorkov, R. Minzianov // E3S Web of Conferences Volume 274 (2021) : 2nd International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering (STCCE - 2021), Kazan, 21–28 апреля 2021 года. – France: EDP Sciences, 2021. – P. 3031. – DOI 10.1051/e3sconf/202127403031. – EDN BOCMUJ.
6. Хунг, Н. С. Влияние минеральных добавок на прочность сцепления цементного камня бетона со стальной арматурой / Н. С. Хунг, Б. И. Булгаков, О. В. Александрова // Промышленное и гражданское строительство. – 2022. – № 6. – С. 25-31. – DOI 10.33622/0869-7019.2022.06.25-31. – EDN DJCFEO [Hung, N. S., Bulgakov, B. I., Aleksandrova, O. V. Influence of mineral additives on the adhesion strength of concrete cement stone with steel reinforcement // Industrial and civil construction. - 2022. - No. 6. - P. 25-31. – DOI 10.33622/0869-7019.2022.06.25-31. – EDN DJCFEO].

7. Yu, X., Robuschi, S., Fernandez, I., & Lundgren, K. (2021). Numerical assessment of bond-slip relationships for naturally corroded plain reinforcement bars in concrete beams. *Engineering Structures*, 239. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112309>.
8. Li, M., Liu, Z., Yang, Z., Wang, Z., & Yuan, H. (2020). Bond-slip behaviors between reinforced concrete and coated rebar via a new strain monitoring method and FEA simulation. *Construction and Building Materials*, 262. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120402>.
9. Mahesh, Rawat, P., Singh, K. K., & Singh, P. K. (2020). Comparison of steel and fiber-reinforced polymer rebars for mining applications: A numerical approach. In *Materials Today: Proceedings* (Vol. 33, P. 5041–5045). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.840>.
10. Pantazopoulos, G., Pressas, I., & Vazdirvanidis, A. (2019). Fatigue failure analysis of a Ø14 B500C steel rebar: Metallurgical evaluation and numerical simulation. *Engineering Failure Analysis*, 101, 180–192. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.03.016>.
11. Seok, S., Haikal, G., Ramirez, J. A., Lowes, L. N., & Lim, J. (2020). Finite element simulation of bond-zone behavior of pullout test of reinforcement embedded in concrete using concrete damage-plasticity model 2 (CDPM2). *Engineering Structures*, 221. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110984>.
12. Mirsayapov, I. Rebar movement in seals under static loading / I. Mirsayapov, R. Minzianov // IOP conference series : Materials Science and Engineering, Kazan, 29 апреля – 15 2020 года. – Kazan, Russia: IOP Science, 2020. – P. 012073. – DOI 10.1088/1757-899X/890/1/012073. – EDN FAXEJY.
13. Квасников, А.А. Моделирование совместной работы арматуры различного периодического профиля с тяжелым бетоном : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / Квасников Анатолий Александрович. – М., 2019. – 176с [Kvasnikov, A.A. Simulation of the joint operation of reinforcement of various periodic profiles with heavy concrete: dis. ... cand. tech. Sciences: 05.23.01 / Kvasnikov Anatoly Aleksandrovich. - M., 2019. – 176p.].
14. Попов, А. М. Методы исследования взаимодействия арматуры с бетоном Часть 1. Экспериментальные и аналитические методы / А. М. Попов, А. С. Самошкин, В. М. Тихомиров // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 2(57). – С. 53-60. – DOI 10.52170/1815-9265_2021_57_53. – EDN DBNIBC [Popov, A. M. Methods for studying the interaction of reinforcement with concrete Part 1. Experimental and analytical methods / A. M. Popov, A. S. Samoshkin, V. M. Tikhomirov // Bulletin of the Siberian State University of Communications. - 2021. - No. 2 (57). - P. 53-60. – DOI 10.52170/1815-9265_2021_57_53. – EDN DBNIBC].
15. Mirsayapov, I. Modified trilinear stress-strain diagram of concrete designed for calculation of beams with fiberglass rebar / I. Mirsayapov, G. Arkhadze // IOP conference series : Materials Science and Engineering, Kazan, 29 апреля – 15 2020 года. – Kazan, Russia: IOP Science, 2020. – P. 012079. – DOI 10.1088/1757-899X/890/1/012079. – EDN XWJHRE.
16. Juliya Mironova. Structural solution of the horizontal joint of floor slabs in girderless frame // 2 International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering (STCCE –2021). 2021. Vol. 274 P.1–10. DOI: 10.1051/e3sconf/202127403017.
17. Холмянский, М.М. Механическое взаимодействие арматуры и бетона в железобетоне : дис. ... докт. техн. наук : 05.23.01 / Холмянский Марк Моисеевич. – М., 1970. – 230с. [Kholmyansky, M.M. Mechanical interaction of reinforcement and concrete in reinforced concrete: dis. ... doc. tech. Sciences: 05.23.01 / Kholmyanskiy Mark Moiseevich. - M., 1970. – 230p].

Информация об авторах

Мирсаяпов Илшат Талгатович, доктор технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: mirsayapovit@mail.ru

Минзянов Рустам Ильдарович, ассистент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: minzianovrustam@gmail.com

Зайнутдинов Алмаз Маратович, инженер-проектировщик, ПИ Союзхимпромпроект, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: almaz_zainutdinov@mail.ru

Information about the authors

Ишат Т. Мирсайапов, Doctor of technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: mirsayapovit@mail.ru

Rustam I. Minzyanov, assistant, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: minzianovrustam@gmail.com

Almaz M. Zainutdinov, project engineer, Design Institute Soyuzkhimpromproekt, Kazan, Russian Federation

E-mail: almaz_zainutdinov@mail.ru

УДК: 624.078.414
DOI: 10.52409/20731523_2023_3_135
EDN: JNOUXR



Конструктивное решение стыка колонн с перекрытием в сборно-монолитном каркасе для повышения сопротивляемости прогрессирующему разрушению

Ю.В. Миронова¹, А.М. Сулейманов¹

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация: *Постановка задачи.* Главной проблемой обеспечения сопротивляемости сборного железобетона прогрессирующему обрушению является необходимость модернизации типовых конструктивных решений стыков, как наиболее уязвимых элементов каркасных и бескаркасных зданий. В нормативных документах приводятся рекомендации в основном для монолитных каркасов зданий и сооружений, вопрос для сборного железобетона изучен недостаточно. *Цель работы* заключается в определении особенностей напряженно-деформированного состояния сборно-монолитного каркаса и модернизации конструктивного решения стыка колонны с перекрытием на основании результатов численного моделирования. *Задачами исследования* являются выявление наиболее опасной схемы прогрессирующего обрушения каркаса многоэтажного здания, определение особенностей работы сборно-монолитного стыка колонны при критичной схеме разрушения, разработка и численное моделирование конструктивного решения стыка. *Результаты.* В работе представлены результаты численных исследований сборно-монолитного каркаса при прогрессирующем обрушении, результаты моделирования и принятое конструктивное решение стыка, повышающее сопротивляемость каркаса лавинообразному разрушению.

Выводы. Значимость полученных результатов для сборно-монолитного строительства заключается в получении новых данных о работе элементов каркаса и разработке рекомендаций по модернизации стыка.

Ключевые слова: многоэтажные здания, сборно-монолитный железобетонный каркас, прогрессирующее разрушение, стык колонны с перекрытием, напряженно-деформированное состояние.

Для цитирования: Миронова Ю.В., Сулейманов А.М. Конструктивное решение стыка колонн с перекрытием в сборно-монолитном каркасе для повышения сопротивляемости прогрессирующему разрушению // Известия КГАСУ, 2023, № 3(65), с.135-144, DOI: 10.52409/20731523_2023_3_135, EDN: JNOUXR

Constructive solution of the joint of columns with the floor slab in a prefabricated-monolithic frame to increase resistance to progressive collapse

J.V. Mironova¹, A.M. Suleymanov¹

¹ Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russia

Abstract: *Problem statement.* The main problem of ensuring the resistance of precast concrete to progressive collapse is the need to modernize standard structural solutions of joints, as the most vulnerable elements of frame and frameless buildings. The regulatory documents provide recommendations mainly for monolithic frames of buildings and structures, the issue for precast reinforced concrete has not been studied enough. *The purpose of the work* is to determine the

features of the stress-strain state of the prefabricated monolithic frame and the modernization of the structural solution of the joint of the column with the overlap based on the results of numerical modeling. *The objectives of the study* are: to identify the most dangerous scheme of progressive collapse of the frame of a multi-storey building, to determine the features of the work of a prefabricated monolithic joint of a column with a critical destruction scheme, to develop and numerically simulate a constructive solution of the joint. *Results*. The paper presents the results of numerical studies of a prefabricated monolithic frame with progressive collapse, the results of modeling and the adopted design solution of the joint, which increases the resistance of the frame to avalanche-like destruction.

Conclusions. The significance of the results obtained for prefabricated monolithic construction consists in obtaining new data on the performance of the frame elements and developing recommendations for the modernization of the joint.

Keywords: multi-storied buildings, prefabricated-monolithic reinforced concrete frame, progressive collapse, joint of a column with a floor slab, stress-strain state

For citation: Mironova J.V., Suleymanov A.M. Constructive solution of the joint of columns with the floor slab in a prefabricated-monolithic frame to increase resistance to progressive collapse // News KSUAE, 2023, № 3(65), p.135-144, DOI: 10.52409/20731523_2023_3_135, EDN: JNOUXR

1. Введение

В последние годы особенно актуальной становится задача обеспечения безопасности зданий и сооружений [1-4]. Аварийные воздействия различного характера на объекты капитального строительства приводят к значительным экономическим потерям и человеческим жертвам. Разрушение может произойти по техногенным (силовым, несилowym), природным (сейсмическим, геологическим, стихийным) и чрезвычайным (взрывы бытового газа, пожары, аварии, наезды техники) причинам. Кроме того, существует вероятность локального разрушения, связанная с ошибками проектирования: нарушение норм, некачественное возведение или неправильная эксплуатация, дефекты материалов и конструкций и т.п. Использование монолитного железобетона для жилых и общественных зданий обусловлено рядом преимуществ, однако сборный и сборно-монолитный железобетон остаются востребованы в силу определённых причин и технических соображений: быстровозводимость, экономичность, применение унифицированных решений. Тем не менее, типовые решения не всегда могут обеспечить соблюдение современных требований по безопасности зданий. В этой связи вопрос повышения сопротивляемости каркасных и бескаркасных несущих систем прогрессирующему обрушению становится первостепенным при их проектировании и возведении. В действующих нормативных документах приводятся рекомендации по прямым и косвенным способам защиты зданий и сооружений от лавинообразного разрушения, однако, в отношении сборно-монолитных несущих систем вопрос недостаточно изучен – большая часть рекомендаций предназначена для монолитных каркасов, для которых с технологической точки зрения проще реализовать эти защитные мероприятия. Для предотвращения прогрессирующего обрушения необходимо блокировать первоначальные локальные разрушения элементов несущей системы и ограничить их распространение на другие участки. При этом следует обеспечить перераспределение напряжений с разрушенных конструкций на смежные элементы каркаса, способные воспринять эти напряжения [5, 6]. Основным способом осуществления этой задачи является повышение жесткости и степени неразрезности конструктивной системы, а главную роль в любых типах каркасов выполняют соединения несущих конструкций между собой, в частности стыки колонн и перекрытий, испытывающие сложное напряженное состояние [7].

Так как соединение сборных элементов между собой (сварка и анкеровка закладных деталей, бессварные связи, замоноличивание скважин и стыков бетоном и др.) является слабым местом сборного железобетона, как с точки зрения технологических решений, так и с точки зрения работы конструкций, то требуется модернизация конструктивных решений несущих элементов и стыков с целью повышения

сопротивляемости прогрессирующему обрушению в части армирования и способов создания непрерывности [8 – 11]. Задача по выбору оптимальных решений стыков, воспринимающих вертикальные и горизонтальные сверхнормативные или противоположные по знаку нагрузки, является актуальной [12, 13, 14]. В связи с попытками возрождения строительства из сборного железобетона разрабатываются и модернизируются существующие решения. Помимо несущей способности и деформативности основных несущих конструкций особое внимание оказывается узлам их соединения, которые должны быть просты в монтаже, обладать прочностью, долговечностью и пригодностью к нормальной эксплуатации. Совокупность этих составляющих позволит повысить сопротивляемость зданий из сборного железобетона прогрессирующему разрушению [15, 16, 17].

Работы по исследованию механизмов разрушения многоэтажных зданий при аварийных воздействиях [17, 18] доказали, что в несущих системах вследствие перераспределения усилий, их значения многократно превышают начальные, меняются характер и схемы работы конструкций и узлов. На схему перехода локального разрушения в глобальное оказывает влияние вид аварийного воздействия [12 – 14], что определяет направление модернизации элементов и узлов монолитных, сборных и сборно-монолитных зданий [6, 15 – 17]. В зависимости от расположения центра жесткости здания и местоположения удаляемой колонны, в ней, в смежных или в удаленных от нее колоннах могут возникать растягивающие усилия с большими и чрезмерными значениями [17]. Вследствие этого, сечения арматуры, запроектированного на сжимающие усилия становится недостаточно для восприятия противоположных по знаку усилий, напряжения находятся за пределом пластической работы стали, происходит вырыв арматуры из тела колонн, нарушается целостность сварных швов все это приводит к локальному разрушению и запускается процесс прогрессирующего обрушения.

При проектировании сборных и сборно-монолитных каркасов с учетом сопротивляемости прогрессирующему обрушению анализ изменения напряженно-деформированного состояния необходимо выполнять для всех элементов каркаса, а не только для элементов зоны локального воздействия и в соответствии с данными этого анализа закладывать соответствующие мероприятия во всей несущей системе. Что касается сборно-монолитных железобетонных каркасов, эту задачу необходимо решать с учетом типизации и унификации узлов и элементов

Представителями сборно-монолитных каркасов являются безригельные каркасы по системам «УИКСС» и «КУБ», запроектированных с жестким сопряжением плит перекрытий и колонн и шарнирным соединением плит между собой горизонтальными шпонками и выпусками арматуры [19, 20]. Соединение колонн между собой и с надколонной плитой осуществляется за счет сварки выпусков арматуры колонн и закладных деталей плиты, затем стык замоноличивается, образуется шпонка, данное решение обеспечивает работу стыка на продольные сжимающие силы, поперечные силы и изгибающие моменты, однако при прогрессирующем обрушении первостепенное значение в колонне имеет продольная сила. Конструктивное решение стыка должно предотвращать нарушение сварного шва между уголками плиты и закладной деталью колонны, нарушение ее анкеровки, скол бетона. Этого можно достичь применением в стыках колонн решений, аналогичных штепсельным соединениям [18, 19]. В работе [17] предложено конструктивное решение штепсельного стыка колонн сборного железобетонного каркаса с использованием закладной детали в виде гофрированной трубы и установки арматурных стержней для восприятия дополнительных усилий, именно это решение можно рассмотреть для обеспечения работы стыка на растяжение при прогрессирующем обрушении. В соответствии с рекомендациями СП «Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения» предлагается в стыке установить дополнительные связи между колонной и плитой перекрытия, представленные гнутыми арматурными стержнями, предусмотренными в плите и замоноличиваемым в скважину колонны при монтаже стыка, по аналогии со штепсельным соединением. Исследования штепсельных стыков приведены в работах [17, 18], испытаны соединения продольной арматуры сборных элементов с помощью муфт различных типов, даны решения по

установке в металлических трубах арматуры с заполнением полимерраствором, все эти предложения оказались малоэффективными вследствие разрушения от сдвига арматуры по контакту с раствором. Исследования [19, 21] были посвящены работе на вырыв из тела колонны арматуры при горизонтальных нагрузках, предложено спиральное обрамление арматуры, при разрушении арматурный стержень вместе с оболочкой плавно вышел из скважины, определены сопротивление стыка при выдергивании и среднее значение прочности анкеровки для типового и предложенного решений, предложено изменить форму скважины преобразованием в многошпоночное соединение или установить дополнительные анкерующие элементы.

Исходя из вышесказанного оптимальным и менее трудоемким вариантом модернизации типового конструктивного решения стыка представляется установка дополнительных арматурных связей между плитой и колонной по аналогии со штепсельным стыком, связи включаются в работу при возникновении растягивающих усилий, обеспечивая непрерывность системы. Целью исследования является определение напряженно-деформированного состояния предложенного конструктивного решения и разработка рекомендаций по проектированию.

Задачами исследования являются:

- получение данных о напряженно-деформированном состоянии сборно-монолитного каркаса при различных схемах разрушения и выявление наиболее опасных узлов;
- разработка конструктивного решения стыка колонн с надколонной плитой, повышающего сопротивляемость каркаса прогрессирующему обрушению;
- получение данных об особенностях работы усовершенствованного стыка с помощью численного моделирования и варьирования исходных данных.

2. Материалы и методы

Повышения сопротивляемости сборно-монолитного железобетонного каркаса прогрессирующему разрушению можно добиться усовершенствованием конструктивного решения стыка колонны с надколонной плитой перекрытия, в котором предусмотрены гибкие арматурные связи, устанавливаемые в скважины колонны с последующим их инъецированием мелкозернистым бетоном по аналогии со штепсельным стыком (рис.1). В качестве гибких связей может быть использована стальная стержневая арматура или канаты небольшого диаметра. Связи заанкерены в плиту на стадии изготовления. Конструктивное решение должно обеспечить работу стыка на вероятные растягивающие усилия при прогрессирующем обрушении, создавая локальную неразрывность связи колонны с перекрытием.

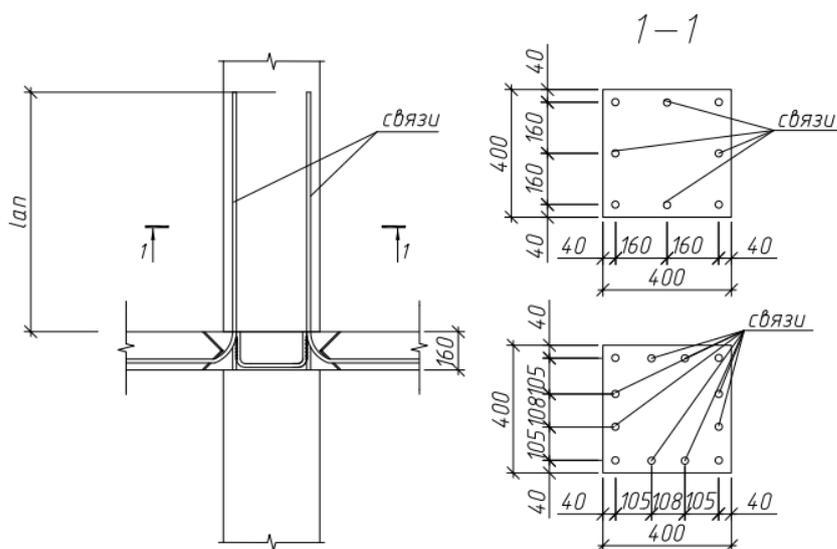


Рис.1 Конструктивное решение стыка с дополнительными связями (иллюстрация автора)

Fig. 1. Constructive solution of the joint with additional connections (illustration by the author)

На начальном этапе для анализа изменения напряженно-деформированного состояния несущих элементов и определения максимальных усилий выполнен расчет пространственной модели каркаса для стадии нормальной эксплуатации и стадии аварийных воздействий в ПК ЛИРА. Рассмотрена модель жилого 25-этажного сборно-монолитного здания, район строительства – г. Казань. Здание Г-образное в плане, размером 27,0 x 18,0 м в осях, высота этажа 3 м. Колонны сечением 400 x 400 мм, толщина плит перекрытия 160 мм, лестничная клетка 3,0 x 6,0 м. Бетон несущих конструкций тяжелый класса В25, стык между смежными плитами замоноличивается мелкозернистым бетоном класса В25. Арматура класса А500. Прогрессирующее обрушение моделировалось удалением крайних, средних и угловых колонн в соответствии с рекомендациями нормативных документов.

Предлагаемый стык был численно смоделирован методом конечных элементов, варьировались диаметры арматурного стержня, класс арматуры, количество связей, определен характер разрушения стыка и его напряженно-деформированное состояние. Численное моделирование и многофакторные эксперименты проведены в программном комплексе ANSYS. Физическая нелинейность бетона и арматуры с учтена применением теорий Bilinear Isotropic Hardening и Menetrey-Willam Base, бетон описан как упругопластический анизотропный материал как до, так и после образования макротрещин в бетоне. Рассмотрена модель угловой колонны геометрия модели была построена в SpaceClaim и экспортирована в ANSYS Workbench 2020. Плита размерами 1890 x 1890 мм, толщиной 160 мм. Колонны с размерами 400 x 400 мм, высотой 3000 мм. Задача рассмотрена в нелинейной постановке. Коэффициент трения между бетоном колонны и оболочкой скважины принят равным 0,6. Бетонная оболочка и арматура работали совместно. Варьировались диаметры арматурных связей 14, 18, 22 мм. Глубина заделки арматуры в колонну принята 1000 мм.

Верификация численной модели выполнена на результатах натурального эксперимента, смоделирован стык колонн, который подвергся испытаниям на растяжение [19], однако в данном эксперименте не учитывалось влияние плиты перекрытия. Анализ работы модели показал, что характер разрушения соответствует данным физического эксперимента, деформации по оси z линейные, усилие, при котором арматурный стержень вместе с оболочкой выходит из скважины отличается от исходного на 5%, данное расхождение допустимо. Таким образом, принципы численного моделирования применимы для дальнейших экспериментов и адекватно отражают действительную работу. Исходя из вышесказанного принято смоделировать сборно-монолитный стык колонны и перекрытия со связями по аналогии со штепсельным стыком.

3. Результаты и обсуждение

В результате расчета каркаса здания в линейной постановке и при аварийном воздействии по нескольким схемам получены данные по усилиям и перемещениям, которые приняты для дальнейшего численного моделирования стыка. Результаты расчета приведены в табл. 1.

Таблица 1

Максимальные значения усилий в элементах при различных схемах работы

Схема	Растяжение в пластинах		Сжатие в пластинах		Сжатие в стержнях	Растяжение в стержнях	Перемещения		
	Mx, т*м	Mу, т*м	Mx, т*м	Mу, т*м	N, т	N, т	Z, мм	X, мм	Y, мм
До удаления	6,65	5,86	22,9	22,5	512	-	40,8	47,3	147
Удаление угловой колонны	13,5	14,6	23,8	23	551	120,63	50	14,4	115
Удаление крайней колонны	13,3	12,3	23,3	23,2	583	-	55,9	44,1	170
Удаление средней колонны	9,49	10,6	22,8	22,4	526	-	41,8	50,3	150

Установлено, что растягивающие усилия в пластинах в 1,4 – 2,5 раза превышают усилия при нормальных условиях эксплуатации, сжимающие усилия в пластинах и усилия в колоннах увеличились незначительно, но при удалении угловой колонны, ввиду смещения центра жесткости каркаса, усилия в некоторых колоннах меняли знак, стержни воспринимают растягивающие напряжения. Таким образом, можно сделать вывод, что в зависимости от жесткостных характеристик каркаса в целом и от схемы разрушения могут быть выявлены наиболее опасные элементы с точки зрения прогрессирующего обрушения. Однако, основная часть колонн способна воспринять дополнительные напряжения, полученные вследствие перераспределения усилий, что объясняется работой железобетона на сжатие. Аналогичные данные об НДС были получены и в работах [11, 12, 14], что подтверждает необходимость разработки мероприятий по повышению сопротивляемости прогрессирующему обрушению.

Повышение сопротивляемости сборно-монолитного каркаса прогрессирующему обрушению возможно при доработке типового проектного решения стыка, допускающего возможность его работы на растяжение и обеспечивающего непрерывность связи колонны с надколонной плитой. Исходя из полученных результатов оптимальным решением является использование в качестве закладной детали гнутого арматурного стержня, заанкеренного в плиту и устанавливаемого в скважины колонны с последующим замоноличиванием. Диаметр и количество арматурных стержней нужно подбирать исходя из возможных максимальных сжимающих и растягивающих усилий. Преимуществом такого решения является минимальный расход арматуры, по сравнению с установкой дополнительных стержней по всей высоте колонны. Учитывая вышесказанное, предложено решение для сборного элемента колонны с возможностью размещения в расчетном сечении четырех или восьми дополнительных связей.

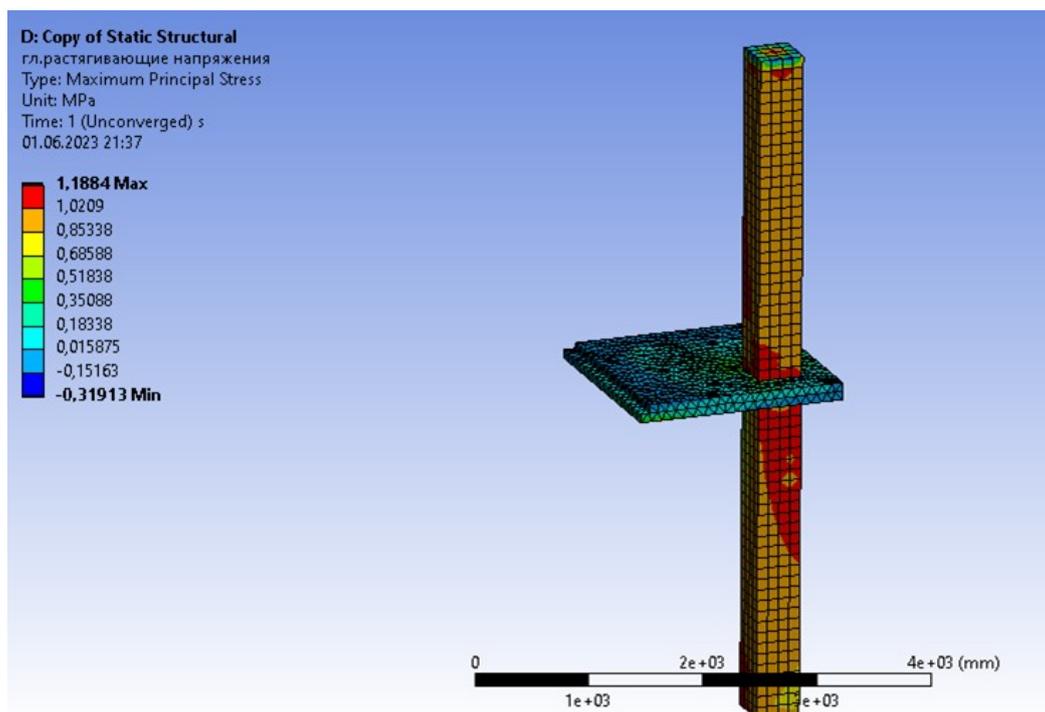


Рис. 2. Растягивающие усилия в бетоне колонны
(иллюстрация автора)

Fig. 2. Tensile forces in concrete columns
(illustration by the author)

Приведенное в [13] исследование стыка сборных колонн доказало эффективность идеи использования дополнительных закладных деталей в скважинах, обеспечивающих монолитность (непрерывность) колонны по высоте. Рассматриваемое в данной работе

конструктивное решение призвано обеспечить неразрывность вертикальных несущих конструкций не допуская разрушения от растягивающих напряжений по аналогии с [13].

В ходе численного моделирования (рис. 2) усовершенствованного конструктивного решения стыка получены данные о его напряженно-деформированном состоянии в зависимости от дополнительного армирования гибкими связями, результаты приведены в табл. 2. Установлено, что сопротивление стыка растяжению увеличилось более, чем в два раза относительно типового решения. Таким образом, дополнительные гибкие связи обеспечили восприятие растягивающих напряжений без нарушения анкеровки в теле плиты и колонны, тем самым обеспечив непрерывность стыка. Для рассмотренного в работе каркаса 25-этажного здания, оптимальным является применение связей $\varnothing 22$ мм, применение связей $\varnothing 18$ мм тоже возможно, но без обеспечения запаса по прочности арматуры.

Таблица 2
Максимальные значения напряжений в элементах при различных решениях стыка

Наименование		Нагрузка, тс	Напряжение в бетоне, Мпа	Напряжение в арматуре, МПа
Сжимающие усилия, тмх (типовое решение)		200	19,68	303,87
Растягивающие усилия, тмх (типовое решение)		120	1,1884	679,85
Растягивающие усилия	Усиленный стык, дополнительная арматура 4 $\varnothing 14$	60	1,1921	679,14
		120	1,1905	704,67
		180	1,1931	705,33
	Усиленный стык, дополнительная арматура 4 $\varnothing 18$	60	1,1891	413,24
		120	1,1843	429,19
		180	1,1845	430,64
	Усиленный стык, дополнительная арматура 4 $\varnothing 22$	60	1,0191	278,66
		120	1,0260	289,89
		180	1,2208	292,24

На основании полученных результатов в численном эксперименте были разработаны рекомендации по проектированию предлагаемого конструктивного решения, а именно при использовании каркаса системы КУБ 2.5 до 10 этажей аналогичными расчетами установлено, что целесообразно применять арматуру $\varnothing 14$. При этажности от 10 – 15 арматуру $\varnothing 18$. При этажности от 15 – 25 этажей $\varnothing 22$, количество дополнительной арматуры 4 – 8 шт. в зависимости от растягивающих усилий в стыке. Длина анкеровки при этом должна составлять не менее 1000мм, скважины заполнять мелкозернистым бетоном марки В25 под давлением. Согласно нормативным требованиям и изложенным в [1] принципам проектирования, данное решение адекватно, актуально и отражает общую направленность конструктивных решений стыков. Для повышения сопротивления связей вырыву дополнительно можно установить в скважины колонн гофрированную трубу, это решение является одним из направлений дальнейших исследований и в данной работе не рассматривалось. Рекомендации могут быть уточнены и расширены для арматуры других классов и диаметров, а также других размеров сечений колонн и классов бетона.

4. Заключение

Недопущение прогрессирующего обрушения для проектируемых и существующих зданий, особенно сборных и сборно-монолитных, имеющих типовые унифицированные решения является актуальной задачей. Изменение конструктивной схемы вследствие аварий различного происхождения приводит к иной картине напряженно-деформированного состояния, меняя значения и направление действия усилий. В частности, рассмотренный в работе стык колонн и надколонной плиты сборно-монолитной несущей системы, запроектированный на внецентренное сжатие, может подвергнуться растяжению. В несмежных пролетах типовое решение позволяет воспринять дополнительные усилия, а в смежных, удаленных или далеко расположенных

требуется усиление. Унификация и типизация сборных каркасов, позволяет не усиливать все расчетные сечения, а на основе прогноза работы каркаса в целом дать рекомендации по установке связей в зависимости от этажности, нагрузок и расположения элементов уже на стадии проектирования. Задачи исследования решены в полном объеме:

1. В результате расчета несущей системы сборно-монолитного каркаса 25-этажного здания по различным схемам разрушения получены данные о напряженно-деформированном состоянии элементов и узлов, определена величина изменения усилий и выявлен наиболее опасный узел, в котором усилия поменяли характер;

2. Предложено конструктивное решение стыка колонн с надколонной плитой, повышающего сопротивляемость каркаса прогрессирующему обрушению. Модернизация стыка заключается в установке дополнительных связей плита – колонна в виде гнутых арматурных стержней в качестве закладных деталей, обеспечивающих его работу на растяжение и непрерывность.

3. На основании анализа результатов численного моделирования стыка выявлены особенности напряженно-деформированного состояния стыка при работе на растяжение и даны рекомендации по подбору арматуры.

Дальнейшие исследования могут затрагивать моделирование стыка и анализ его напряженно-деформированного состояния с использованием гофрированной трубы в скважинах, учет в расчете сварного шва, определение и использование пластических свойств арматуры.

Список литературы / References

1. Кодыш Э.Н. Проектирование защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения с учетом возникновения особого предельного состояния // Промышленное и гражданское строительство. 2018 № 10. С.95–101. [Kodysh E.N. Designing the protection of buildings and structures against progressive collapse in view of the emergence of a special limiting state// Promyshlennoye i grazhdanskoye Stroitel'stvo. 2018. No 10. P. 95–101]
2. Тамразян А.Г. Основные принципы оценки риска при проектировании зданий и сооружений // Вестник МГСУ. 2011. № 2–1. С. 21–27. [Tamrazyan A.G. Recommendations to working out of requirements to robustness of buildings and constrictions//Vestnik MGSU. 2011. No 2–1. P. 21–27.]
3. Kiakojoury F. et al. Progressive collapse of framed building structural: Current knowledge and future prospects // Engineering Structures. 2020. Vol. 206. P. 110061. doi:10.1016/j.engstruct.2019.110061
4. Никитин Г.П. Подвесные несущие системы зданий Технопарка и Университета в г. Иннополис // Промышленное и гражданское строительство. 2022 № 3. С.19–24. [Nikitin G.P. Suspended load-bearing systems of Technopark and University buildings in Innopolis // Promyshlennoye i grazhdanskoye Stroitel'stvo. 2022. No 3. P. 19–24]
5. Люблинский В.А. К вопросу о перераспределении напряжений в вертикальных несущих железобетонных конструкциях многоэтажных зданий // Строительство и реконструкция. 2021. №2. С. 39–45. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-94-2-39-45 [Lyublinskiy V.A. To the question of redistribution of stress in vertical bearing RC structures of multi-story buildings // Stroitel'stvo i rekonstruktsiya. 2021. №2. P. 39–45. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-94-2-39-45]
6. Juliya Mironova. Structural solution of the horizontal joint of floor slabs in girderless frame // 2 International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering (STCCE–2021). 2021. Vol. 274 P.1–10. DOI: 10.1051/e3sconf/202127403017
7. Mirsayapov Ilshat and Nikitin Georgy and Khanbekov Midkhat/ Strength of reinforced concrete flat slabs for punching// STCCE-2020 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Kazan, Russia, 2020, 517, Vol. 890, 012076.
8. J. Liu, Y. Xue, C. Wang, J. Nie, and Z. Wu. Experimental investigation on seismic performance of mechanical joints with bolted flange plate for precast concrete column // Engineering Structures. 2020. Vol. 216. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110729.

9. Ruiz-Pinilla J.G., Cladera A., Pallares F.J., Calderon P.A., Adam J.M. Joint strengthening by external bars on RC beam-column joints // *Journal of Building Engineering*. 2022. Vol. 45. doi:10.1016/j.jobe.2021.103445.
10. Федорова Н.В., Савин С.Ю. Анализ особенностей сопротивления прогрессирующему обрушению конструктивных систем зданий и сооружений при внезапных структурных перестройках: аналитический обзор научных исследований. // *Строительство и реконструкция*. 2021. №3 С. 76–108. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2021-95-3-76-108>. [Fedorova N.V., Savin S. Yu. Progressive collapse resistance of facilities experienced to localized structural damage - an analytical review // *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2021. №3 P. 76–108. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2021-95-3-76-108>]
11. Kiakojoury F. et al. Progressive collapse of framed building structures: Current knowledge and future prospects // *Engineering Structures*. 2020. Vol. 206. P. 110061. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.110061.
12. Yi N.H. et al. Collision capacity evaluation of RC columns by impact simulation and probabilistic evaluation // *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2015. Vol. 13. No 2. P. 67–81.
13. Q. Rong and Q. Luo Experimental study on seismic performance of an improved precast reinforced concrete column-to-column joint // *Mechanics Based Design of Structures and Machines*. 2022. Vol. 50. No. 5. doi: 10.1080/15397734.2020.1763183.
14. H. T. Thai, Q. V. Ho, W. Li, and T. Ngo. Progressive collapse and robustness of modular high-rise buildings // *Structure and Infrastructure Engineering*. 2021. doi: 10.1080/15732479.2021.1944226.
15. P. Sharafi, M. Alembagheri, K. Kildashti, and H. T. Ganji. Gravity-Induced Progressive Collapse Response of Precast Corner-Supported Modular Buildings // *Journal of Architectural Engineering*. 2021. Vol. 27. No. 4. doi: 10.1061/(asce)ae.1943-5568.0000499.
16. J. Peng, C. Hou, and L. Shen. Progressive collapse analysis of corner-supported composite modular buildings // *Journal of Building Engineering*. 2022. Vol. 48. doi: 10.1016/j.jobe.2021.103977.
17. Люблинский В.А., Миронова Ю.В. Повышение сопротивляемости штепсельного стыка колонн прогрессирующему обрушению // *Строительство и реконструкция*. 2022. №5. С. 57-66. doi.org:10.33979/2073-7416-2022-103-5-57-66 [Lyublinskiy V.A., Mironova J.V. Increasing the resistance of the plug joint of columns to progressive collapse // *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2022. №5 P. 57–66/ doi.org:10.33979/2073-7416-2022-103-5-57-66]
18. Трошков Е.О. Сравнение результатов компьютерного моделирования и экспериментальных исследований штепсельных стыков сборных железобетонных колонн с плитами перекрытий // *Жилищное строительство*. 2017. №7. С.41-46. [Troshkov E.O. Comparison of the results of computer modeling and experimental studies of plug joints of precast reinforced concrete columns with floor slabs // *Zhilishchnoe stroitel'stvo*. 2017. №7. P.41-46.]
19. Соколов Б.С., Трошков Е.О. Деформативность штепсельных стыков сборных железобетонных плит перекрытий с колоннами в несущей системе УИКСС // *Вестник гражданских инженеров*. 2017. №3 (62). С. 32-39 [Sokolov B.S., Troshkov E.O. Deformability of plug joints of precast reinforced concrete floor slabs with columns in the bearing system of UICSS // *Vestnik grazhdanskih inzhenerov*. 2017. №3 (62). P. 32-39]
20. В.А. Попов, В.А. Казаков, А.Ф. Андриюшенков, Н.С. Воловник Организация производства сборных железобетонных конструкций строительной системы «КУБ 3V» для освоения выпуска 30 000 кв. м жилой площади в год // *Вестник СибАДИ*. № 3 (49), 2016. С.68–74. [V.A. Popov, V.A. Kazakov, A.F. Andryushenkov, N.S. Volovnik Organization of production of prefabricated reinforced concrete structures of the KUB 3V building system for the development of an output of 30,000 sq. m of living space per year // *Vestnik SibADI*. No. 3 (49), 2016. P.68–74.]

21. Mirsayapov, I. Rebar movement in seals under static loading / I. Mirsayapov, R. Minzianov // IOP conference series : Materials Science and Engineering, Kazan, 29 апреля – 15 2020 года. Vol. 890. – Kazan, Russia: IOP Science, 2020. – P. 012073. – DOI 10.1088/1757-899X/890/1/012073. – EDN FAXEJY.

Информация об авторах

Миронова Юлия Викторовна, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: yul.mironova2018@mail.ru

Сулейманов Альфред Мидхатович, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: sulejmanov@kgasu.ru

Information about the authors

Julia V. Mironova, candidate of technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: yul.mironova2018@mail.ru

Alfred M. Suleymanov, doctor of technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: sulejmanov@kgasu.ru

УДК: 691.328.4
DOI: 10.52409/20731523_2023_3_145
EDN: KGTNOV



Оценка эффективности применения высокомодульной полимерной композитной арматуры

Илшат Т. Мирсаяпов¹, В.А. Лим², А.И. Мирсаяпов², А.М. Сулейманов¹

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Казань, Российская Федерация

²Казанский Гипрониавиапром им. Б.И. Тихомирова,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация: *Постановка задачи.* Интерес со стороны предприятий строительной отрасли к изделиям из полимерных композитных материалов с каждым годом растет. Наряду с известными достоинствами полимерной композитной арматуры существуют недостатки, которые препятствуют её применению в масштабном строительстве. Наиболее характерным недостатком является низкий модуль упругости по сравнению со сталью. Данное несовершенство возможно устранить путем использования в конструкциях высокомодульной полимерной композитной арматуры. Цель работы заключается в оценке эффективности применения высокомодульной полимерной композитной арматуры в изгибаемых элементах. Задачами исследования являются: оценка прочности по нормальным сечениям изгибаемых бетонных балок, армированных высокомодульной полимерной композитной арматурой, а также сравнения показателей несущей способности бетонных балок, армированных стальной, низкомодульной и высокомодульной полимерной композитной арматурой.

Результаты. В работе представлена сравнительная оценка несущей способности по нормальным сечениям изгибаемых бетонных балок, армированных высокомодульной полимерной композитной арматурой, стальной арматурой и низкомодульной полимерной композитной арматурой.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в том, что использование высокомодульной полимерной арматуры позволяет увеличить несущую способность бетонных изгибаемых элементов, при этом имея высокий модуль упругости по сравнению со сталью.

Ключевые слова: неметаллическая арматура, высокомодульная полимерная композитная арматура, прочность нормальных сечений, бетонные конструкции, изгибаемые элементы.

Для цитирования: Мирсаяпов Илшат Т., Лим В.А., Мирсаяпов А.И., Сулейманов А.М. Оценка эффективности применения высокомодульной полимерной композитной арматуры // Известия КГАСУ, 2023, № 3(65), с.145-153, DOI: 10.52409/20731523_2023_3_145, EDN: KGTNOV

Evaluation of the effectiveness of the use of high-modulus polymer composite reinforcement

Pshat T. Mirsayapov¹, V.A. Lim², A.I. Mirsayapov², A.M. Suleymanov¹

¹Kazan State University of Architecture and Engineering,
Kazan, Russian Federation

²Kazan Giproniaviaprom named after B.I. Tikhomirov,
Kazan, Russian Federation

Abstract: Problem statement. The interest of the enterprises of the construction industry in products made of polymer composite materials is growing every year. Along with the well-known advantages of polymer composite reinforcement, there are disadvantages that prevent its use in large-scale construction. The most characteristic disadvantage is the low modulus of elasticity compared to steel. This imperfection can be eliminated by using high-modulus polymer composite reinforcement in the structures. The purpose of the work is to evaluate the effectiveness of the use of high-modulus polymer composite reinforcement in bending elements. The objectives of the study are to assess the strength in normal sections of bent concrete beams reinforced with high-modulus polymer composite reinforcement, as well as to compare the bearing capacity of concrete beams reinforced with steel, low-modulus and high-modulus polymer composite reinforcement.

Results. The paper proposes a comparative assessment of the increase in the ability of bending concrete beams in normal sections, reinforced with high-modulus polymer composite reinforcement, steel reinforcement and low-modulus polymer composite reinforcement.

Conclusions. The significance of results obtained for the construction industry lies in the fact that the use of high-modulus polymer reinforcement increases the load-bearing capacity of concrete bending elements, while having a significant high elasticity compared to steel.

Keywords: non-metallic reinforcement, high-modulus polymer composite reinforcement, strength of normal cross-sections, concrete structures, bendable elements.

For citation: Mirsayapov Ilshat T., Lim V.A., Mirsayapov A.I., Suleymanov A.M. Evaluation of the effectiveness of the use of high-modulus polymer composite reinforcement // News KSUAE, 2023, № 3(65), p.145-153, DOI: 10.52409/20731523_2023_3_145, EDN: KGTNOV

1. Введение

В настоящее время изделия из полимерных композитных материалов вызывают большой интерес со стороны предприятий строительной отрасли в связи её известными преимуществами по сравнению со сталью [1-3]. Полимерная композитная арматура имеет большой опыт экспериментальных исследований. В течении последних 20 лет композитные материалы стали более выгодными для использования их в изгибаемых бетонных элементах. [4-7]. В настоящее время для армирования бетонных конструкций применяется арматура из композитных материалов на основе стеклянных, базальтовых, углеродных и комбинированных волокон в соответствии с ГОСТ 31938-2022. Эти виды материалов различаются своими физико-механическими характеристиками. Диапазон разброса прочности на растяжения варьируется от 1000 до 1400 МПа, а модуль упругости при растяжении – 50000-130000 МПа [9,10]. В связи с низким модулем упругости полимерной композитной арматуры, она не находит широкого применения в строительной отрасли [3,5,15].

Данный недостаток можно компенсировать путем использования высокомодульной полимерной композитной арматуры. В научно-исследовательском институте космических и авиационных материалов был получен полимерный композитный материал с прочностными и жесткостными характеристиками, превышающими характеристики стали [8]. «Аристар» — это ряд высокотехнологических композитных материалов, отличающихся высокими показателями прочности, трещиностойкости, термостойкостью, высокой химической и радиационной стойкостью, пожаробезопасностью. Например, углепластик марки «Аристар-В43» имеет предел прочности на растяжение, равный 2200 МПа, при этом модуль упругости при растяжении достигает порядка 270000 Мпа, что значительно выше, чем модуль упругости стали.

Целью работы является оценка эффективности применения высокомодульной полимерной композитной арматуры в изгибаемых бетонных элементах.

Объектом исследования являются изгибаемые бетонные элементы, армированные высокомодульной композитной арматуры. Предмет исследования – несущая способность по нормальному сечению изгибаемых бетонных балок, армированных высокомодульной полимерной композитной арматурой.

Задачами исследования являются:

- оценка напряжено-деформированного состояния изгибаемых бетонных балок, армированных высокомодульной полимерной композитной арматурой;
- сравнительный анализ показателей несущей способности изгибаемых бетонных балок, армированных стальной, низко-модульной и высоко-модульной полимерной композитной арматурой.

2. Материалы и методы

В нашей стране действует свод правил – СП 295.1325800.2017 «Конструкции бетонные, армированные полимерной композитной арматурой. Правила проектирования». Согласно СП 295.1325800.2017 расчет по прочности нормальных сечений производится в зависимости от соотношения между значениями относительной высоты сжатой зоны бетона ξ и значением граничной относительной высоты сжатой зоны ξ_R . Как подчеркивают Степанова В. Ф. [2] и Мухамедиев Т.А. [9] результаты экспериментальных исследований показывают, что расчет и работа бетонных элементов, армированных полимерной композитной арматурой аналогична железобетонным элементам, с учетом различных коэффициентов на материал и адгезию материалов. На рис. 1 представлена блок-схема методики определения прочности нормальных сечений изгибаемых элементов, армированных полимерной композитной арматурой.

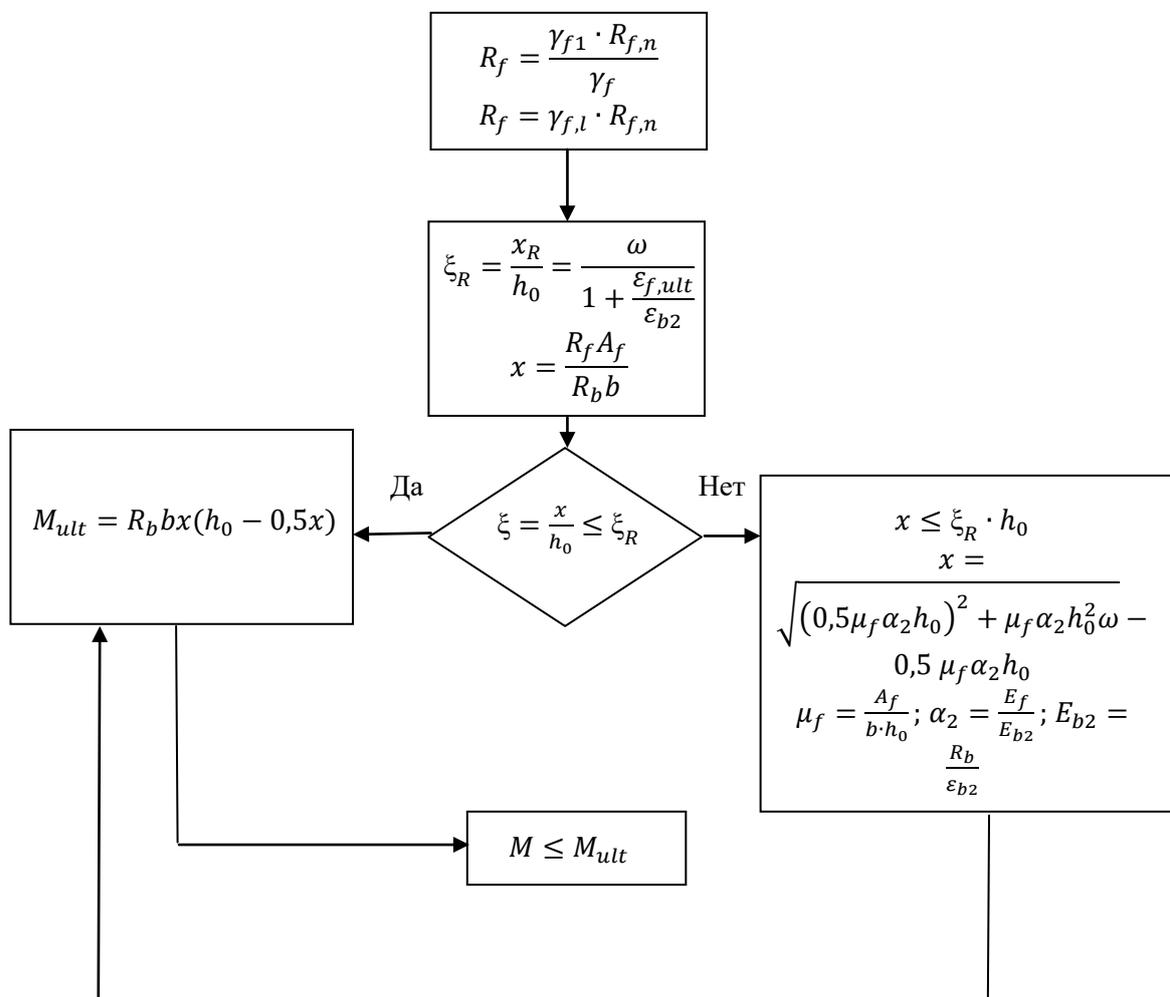


Рис. 1. Блок-схема методики определения несущей способности нормальных сечений изгибаемых элементов, армированных АКП по СП 295.1325800.2017
 Fig. 1. Block diagram of the methodology for determining the bearing capacity of normal sections of bent elements reinforced with automatic transmission according to SP 295.1325800.2017

За расчетные характеристики исследуемого объекта приняты следующие показатели высоко-модульной полимерной композитной арматуры, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Расчетные характеристики высокомодульной полимерной композитной арматуры

№ серии	Маркировка балок	Армирование	Расчетный диаметр, мм	Расчетная площадь сечения A_s , мм ²	Модуль упругости E_f , МПа	Сопrotивление растяжению R_f , МПа
1	Бк-6уп	2 \varnothing 6 АУК	6	57	270000	2200
	Бк-8уп	2 \varnothing 8 АУК	8	101		
	Бк-10уп	2 \varnothing 10 АУК	10	157		

В табл. 1 АУК – это арматура углепластиковая композитная.

Для сравнительного анализа напряженно-деформированного состояния (далее НДС) изгибаемых бетонных элементов, армированных высокомодульной полимерной композитной арматурой с НДС изгибаемых бетонных элементов, армированных низкомоульной полимерной композитной арматурой и стальной арматурой, параметры бетонных балок (геометрические размеры поперечного сечения, расчетный пролет, расчетная схема) и характеристики низкомоульной и стальной арматуры (модуль упругости, сопротивление растяжению, расчетный диаметр и расчётная площадь поперечного сечения), а также результаты напряженного деформированного состояния этих балок были взяты из экспериментальных исследований, прочности, трещиностойкости и деформативности по нормальному сечению бетонных изгибаемых элементов, армированных полимерной композитной арматурой, проведенных на кафедре ЖБК КГАСУ [10-14].

Базовый образец, используемый в [10-14], представлен на рис. 2. Расчетные характеристики низкомоульной и стальной арматуры, используемые в [10-14], представлены в табл. 2.

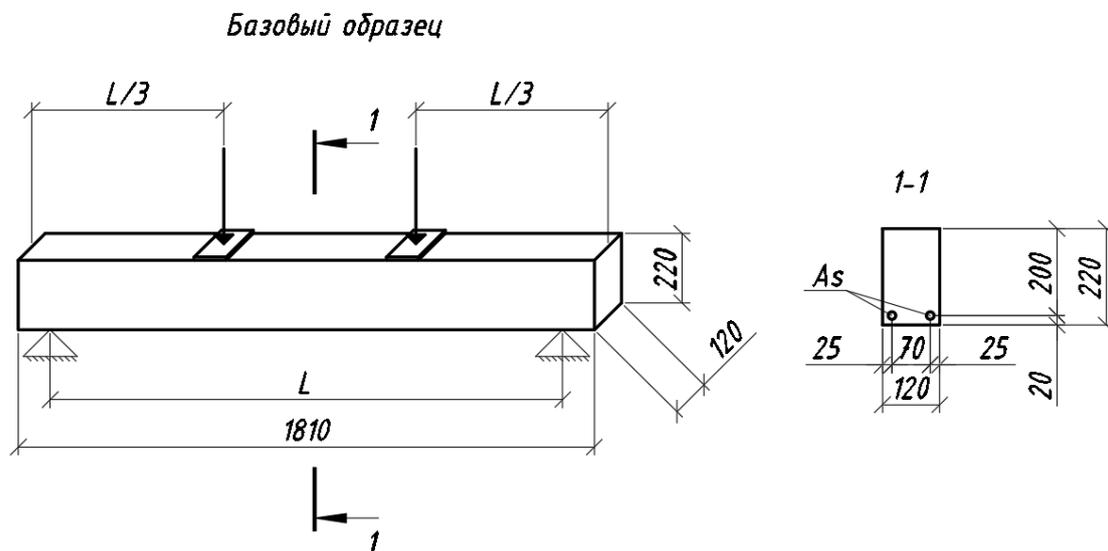


Рис.2. Схема базового бетонного образца балки Антакова И.А. [13]

Fig.2 Scheme of the basic concrete beam sample Antakova I.A. [13]

Таблица 2

Расчетные характеристики низко модульной полимерной композитной и стальной арматуры

№ серии	Маркировка балок	Армирование	Расчетный диаметр, мм	Расчетная площадь сечения A_s , мм ²	Модуль упругости E_f , МПа	Сопротивление растяжению R_f , МПа
1	Бк-12ст	2 ϕ 12 A400	12	226	200000	400
	Бк-8ст	2 ϕ 8 A400	8	101		
	Бк-6ст	2 ϕ 6 A400	6	57		
2	Бк-10сп	2 ϕ 10 АСК	8,6	116,12	55000	1200
	Бк-8сп	2 ϕ 8 АСК	7	76,93		
	Бк-6сп	2 ϕ 6 АСК	5	39,25	51770	1250

3. Результаты и обсуждение

В ходе расчета, согласно блок-схеме, приведенной на рис.1, были определены величины относительной высоты сжатой зоны бетона ξ и значения граничной относительной высоты сжатой зоны ξ_R , представленные в табл. 3.

Таблица 3

Сопоставление величин относительной высоты сжатой зоны бетона " ξ " и граничной относительной высоты сжатой зоны " ξ_R "

Вид армирования	Маркировка балок	Величины ξ и ξ_R по СП295.1325800.2017			Характер разрушения
		ξ	ξ_R	ξ/ξ_R	
A400	Бк-6ст	0,0313	0,509	0,0615	Разрыв арматуры
	Бк-8ст	0,0558	0,509	0,11	Разрыв арматуры
	Бк-12ст	0,126	0,509	0,248	Разрушение бетона сжатой зоны
АСК	Бк-6сп	0,0525	0,101	0,518	Разрыв арматуры
	Бк-8сп	0,099	0,105	0,95	Разрыв арматуры
	Бк-10сп	0,15	0,105	1,44	Разрушение бетона сжатой зоны
АУК	Бк-6уп	0,143	0,334	0,428	Разрыв арматуры
	Бк-8уп	0,253	0,334	0,757	Разрыв арматуры
	Бк-10уп	0,393	0,334	1,18	Разрушение бетона сжатой зоны

В табл. 3. представлены отношения величин относительной высоты сжатой зоны бетона ξ к значениям граничной относительной высоты сжатой зоны ξ_R , и соответствующий этим отношениям характер разрушения балки.

Результаты сопоставления величин предельного изгибающего момента для стальной, низко модульной [10-14] и высоко модульной арматуры диаметрами 6 мм, 8мм, 10(12) мм представлены на рис. 3.

По результатам анализа расчета несущей способности были определены отношения величины предельного изгибающего момента (табл. 4), которые характеризуют эффективность применения высоко модульной полимерной композитной арматуры.

Таблица 4

Отношение величины предельного изгибающего момента стальной и низко модульной полимерной композитной арматуры к высоко модульной полимерной композитной арматуры

Вид армирования	Маркировка балок	Величины ξ и ξ_R по СП295.1325800.2017		
		M_{ult}	$M_{ult}(A400, АСК)/M_{ult}(АУК)$	$M_{ult}(АУК)/M_{ult}(А400, АСК)$
А400	Бк-6ст	4,421	0,32	3,16
	Бк-8ст	7,698	0,33	3,03
	Бк-12ст	16,432	0,54	1,88
АСК	Бк-6сп	9,436	0,68	1,48
	Бк-8сп	17,24	0,74	1,35
	Бк-10сп	21,025	0,68	1,46
АУК	Бк-6уп	13,976	-	-
	Бк-8уп	23,298	-	-
	Бк-10уп	30,766	-	-

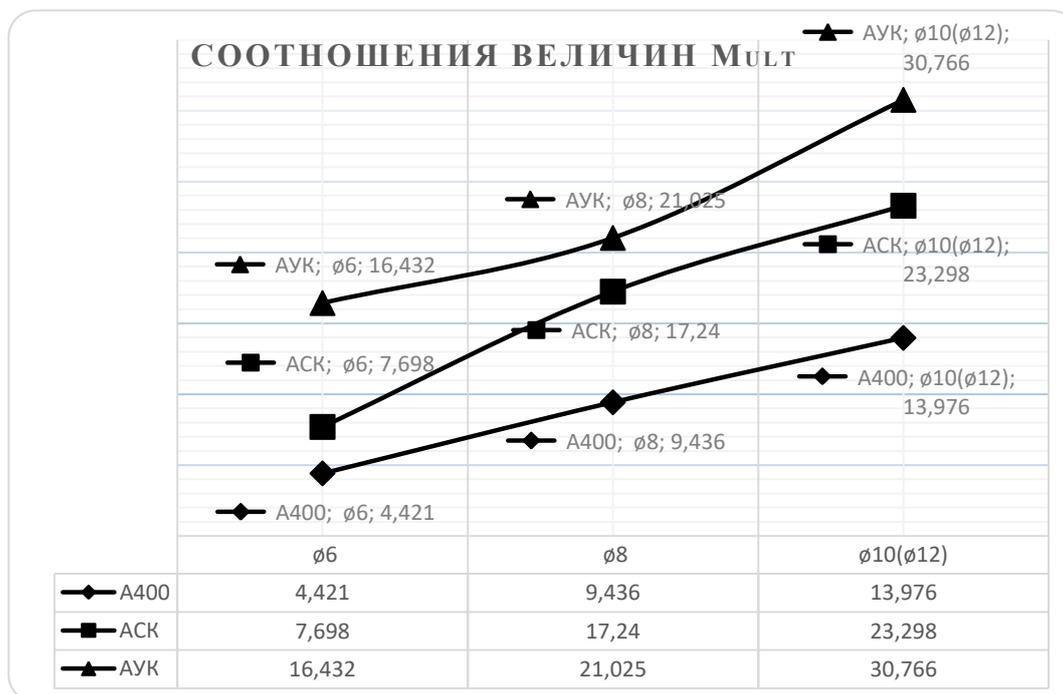


Рис. 3. Соотношение величин предельного изгибающего момента стальной, низко модульной, высоко модульной полимерной композитной арматуры (иллюстрация автора)

Fig. 3. The ratio of the values of the limiting bending moment of steel, low-modulus, high-modulus polymer composite reinforcement (illustration by the authors)

В результате оценки прочности по нормальному сечению изгибаемых бетонных балок, армированных стальной, низко модульной и высоко модульной полимерной композитной арматуры, выявлено, что несущая способность балок, армированных высоко модульной полимерной композитной арматуры выше по сравнению со стальной арматурой в 3,16 раза для арматуры диаметром 6 мм, в 3,03 раза – для диаметра 8 мм, в

1,88 раза – для диаметра 10(12) мм, по сравнению с низко модульной арматурой в 1,48 раза для арматуры диаметром 6, в 1,35 раза – для диаметра 8, в 1,46 раза – для диаметра 10.

4. Заключение

Проведена оценка эффективности применения высоко модульной полимерной композитной арматуры в изгибаемых элементах. Выявлено, что использование высоко модульной углепластиковой арматуры имеет положительный эффект для прочности по нормальному сечению изгибаемых бетонных элементов. Наиболее эффективной оказалась высоко модульная полимерная композитная арматура диаметром 6 мм по сравнению со стальной и низко модульной полимерной композитной арматурой.

Так как для полной картины напряженно-деформируемого состояния необходимо учитывать прочность по наклонным сечениям, влияние арматуры сжатой зоны, то в дальнейшем планируется провести ряд теоретических и экспериментальных исследований.

Список литературы/References

1. Степанов А.Ю., Римшин В.И. Напряженно-деформированное состояние конструкций зданий и сооружений, армированных композитной полимерной арматурой при сейсмическом воздействии // Строительство и реконструкция №1 (57) 2015 (январь-февраль) С. 57-61. [Stepanov A.Yu., Rimshin V.I. Stress-strain state of structures of buildings and structures reinforced with composite polymer reinforcement under seismic impact // Construction and Reconstruction No. 1 (57) 2015 (January-February) P. 57-61.].
2. Степанова В.Ф., Степанова А.Ю., Жирков Е.П. Арматура композитная полимерная: - М. 2013. – 200 с. [Stepanova V.F., Stepanova A.Yu., Zhirkov E.P. Composite polymer reinforcement: - М. 2013. – 200 p].
3. Гиль А.И., Бадалова Е.Н., Лазовский Е.Д. Стеклопластиковая и углепластиковая арматура в строительстве: преимущества, недостатки, перспективы применения // Вестник Полоцкого государственного университета, 2015, Серия F, №16 С. 48-53. [Gil A.I., Badalova E.N., Lazovsky E.D. Fiberglass and carbon fiber reinforcement in construction: advantages, disadvantages, application prospects // Bulletin of Polotsk State University, 2015, Series F, No. 16, P. 48-53.].
4. Mathias Hammerl, Benjamin Kromoser. The influence of pretensioning on the load-bearing behaviour of concrete beams reinforced with carbon fibre reinforced polymers // Composite Structures 273 (2021) P. 1-10
5. Sami Sbahien, Furqan Tahir, Sami G. Al-Ghamdi. Environmental and mechanical performance of different fiber reinforced polymers in beams // Materials Today: Proceedings 62 (2022) P. 3548-3552
6. Andrew Y.Chen, Sebastian Baehr, Austin Turner, Zilan Zhang, Grace X. Gu. Carbon-fiber reinforced polymer composites: A comparison of manufacturing methods on mechanical properties // International Journal of Lightweight Materials and Manufacture 4 (2021) P. 468-479.
7. Антаков, И. А. Совершенствование методики расчета прочности нормальных сечений изгибаемых бетонных элементов с композитной полимерной арматурой / И. А. Антаков // Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконструкции: Материалы IV Международной (X Всероссийской) конференции, Чебоксары, 21–22 ноября 2018 года. – Чебоксары: Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, 2018. – С. 119-127. [Antakov, I. A. Improvement of the methodology for calculating the strength of normal sections of bent concrete elements with composite polymer reinforcement / I. A. Antakov // New in architecture, design of building structures and reconstruction: Materials of the IV International (X All-Russian) Conference, Cheboksary, November 21-22, 2018. Cheboksary: I.N. Ulyanov Chuvash State University, 2018. – P. 119-127.].
8. Научно-исследовательский институт космических и авиационных материалов // niikam.ru. URL: <http://www.niikam.ru> (дата обращения: 01.04.2023). [Research

- Institute of Space and Aviation Materials // niikam.ru. URL: <http://www.niikam.ru> (reference date: 01.04.2023)]
9. Мухамедиев, Т.А. К расчету по прочности изгибаемых конструкций из бетона с композитной полимерной арматурой / Т.А. Мухамедиев, Д.В. Кузеванов // Строительная механика и расчет сооружений. – М., 2016. – № 4 (267). – С. 18-22. [Mukhamediev, T.A. The calculation of the strength of bent structures made of concrete with composite polymer reinforcement / T.A. Mukhamediev, D.V. Kuzevanov // Construction mechanics and calculation of structures. - M., 2016. - No. 4 (267). - P. 18-22.]
 10. Mirsayarov, I., Antakov, I., Antakov, A. Experimental and Theoretical Analysis of Crack Resistance and Deformability of Concrete Beams Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars//Lecture Notes in Civil Engineering, 2023, 291, P. 381–404.https://doi.org/10.1007/978-3-031-14623-7_34
 11. Ilshat Mirsayarov, Igor Antakov and Aleksey Antakov / Improving methods of strength design of normal sections of flexural concrete members reinforced with fiber-reinforced polymer bars// STCCE-2020 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Kazan, Russia, 2020, 517, Vol. 890, 012057.
 12. Ил.Т. Мирсаяпов, И.А. Антаков, А.Б. Антаков К расчету прогибов изгибаемых бетонных элементов, армированных композитной полимерной арматурой// Вестник МГСУ Том 16. Выпуск 4 2021, С.413. [И.Т. Mirsayarov, I.A. Antakov, A.B. Antakov On the calculation of deflections of bent concrete elements reinforced with composite polymer reinforcement// Bulletin of MGSU Volume 16. Issue 4, 2021, P.413.]
 13. И.Т. Мирсаяпов, И.А. Антаков, А.Б. Антаков. К расчету ширины раскрытия трещин изгибаемых бетонных элементов, армированных композитной полимерной арматурой// Вестник МГСУ Том 15. Выпуск 12, 2020, С.1663. [И.Т. Mirsayarov, I.A. Antakov, A.B. Antakov. Calculation of the crack opening width of bent concrete elements reinforced with composite polymer reinforcement// Bulletin of MGSU Volume 15. Issue 12, 2020, P.1663.]
 14. Антаков, И. А. Особенности работы изгибаемых элементов с композитной полимерной арматурой под нагрузкой / И. А. Антаков // Жилищное строительство. – 2018. – № 5. – С. 15-18. [Antakov, I. A. Features of the work of bent elements with composite polymer reinforcement under load / I. A. Antakov // Housing construction. – 2018. – No. 5. – P. 15-18.]
 15. Iman Chitsazan, Mohsen Kobraei, Mohd Zamin Jumaat and Payam Shafigh. Экспериментальное исследование поведения прочности при изгибе бетонных балок армированных ПКА и сравнение предельного момента нагрузки с АСІ // Журнал гражданского строительства и строительных технологий, Том 1(2), Декабрь, 2010. - С. 27-42. [Iman Chitsazan, Mohsen Kobraei, Mohd Zamin Jumaat and Payam Shafigh. Experimental Study of Flexural Strength Behavior of PCB Reinforced Concrete Beams and Comparison of Ultimate Load Moment with ACI // Journal of Civil Engineering and Construction Technologies, Volume 1(2), December, 2010. - P. 27-42.]

Информация об авторах

Мирсаяпов Илшат Талгатович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой железобетонных и каменных конструкций; Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация.

Email: mirsayapovit@mail.ru

Лим Владимир Александрович, аспирант, инженер 2-й категории, Казанский Гипронииавиапром им. Б.И. Тихомирова, г. Казань, Российская Федерация.

Email: v.lim@gar-rt.ru

Мирсаяпов Арслан Илшатович, аспирант, инженер 2-й категории, Казанский Гипронииавиапром им. Б.И. Тихомирова, г. Казань, Российская Федерация.

Email: a.mirsayapov@gar-rt.ru

Сулейманов Альфред Мидхатович, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: sulejmanov@kgasu.ru

Information about the authors

Ilshat T. Mirsayapov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures; Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.

Email: mirsayapovit@mail.ru

Vladimir A. Lim, post-graduate student, engineer of the 2nd category, Kazan Giproniiaviaprom named after B.I. Tikhomirov, Kazan, Russian Federation.

Email: v.lim@gap-rt.ru

Arslan I. Mirsayapov, post-graduate student, engineer of the 2nd category, Kazan Giproniiaviaprom named after B.I. Tikhomirov, Kazan, Russian Federation.

Email: a.mirsayapov@gap-rt.ru

Alfred M. Suleymanov, doctor of technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: sulejmanov@kgasu.ru



УДК: 691, 624.138

DOI: 10.52409/20731523_2023_3_154

EDN: LEHMXN



Модификация дорожных цементогрунтов нанокремнеземом

Е.А. Вдовин¹, П.Е. Буланов¹, Б.К. Хусаенов², Д.Р. Выборнов¹

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет,

²ООО «Спецдорпроект»

г. Казань, Российская Федерация

Аннотация: *Постановка задачи.* Актуальность исследования обоснована необходимостью повышения уровня конструктивных характеристик и долговечности цементогрунтов в слоях дорожных одежд, а также сокращения содержания минерального вяжущего в укрепленных грунтах, применяя в качестве эффективного модификатора нанокремнезем. Цель работы заключается в исследовании влияния модификации цементогрунтов нанокремнеземом на физико-механические характеристики материала дорожных одежд. Задачами исследования являются оценка влияния нанокремнезема на предел прочности при сжатии и предел прочности на растяжение при изгибе модифицированных цементогрунтов, и также исследование влияния нанокремнезема на уровни показателя морозостойкости укрепленных грунтов.

Результаты. Установлено влияние модификации цементогрунтов нанокремнеземом на уровни показателей предела прочности при сжатии, предела прочности на растяжение при изгибе и морозостойкости. Определено оптимальное содержание и эффективность нанокремнезема для цементогрунтов, обеспечивающих их возможное применения в конструктивных слоях дорожных одежд.

Выводы. Установлено, что модификация нанокремнеземом обеспечивает достижение у цементогрунтов марки по прочности М40 при содержании 8 % портландцемента и 0,6 % модификатора или 10 % портландцемента и 0,45 % модификатора от массы грунта. Исходя из нормативных требований, разработанные модифицированные цементогрунты могут применяться для устройства конструктивных слоёв оснований и покрытий переходных и облегченных типов дорожных одежд в зависимости от дорожно-климатических условий. Однако, недостаточные значения коэффициентов морозостойкости ограничивает область применения полученных цементогрунтов в дорожных одеждах. Для дальнейшего повышения уровней физико-механических характеристик необходимы дополнительные исследования процессов модификации цементогрунтов наночастицами.

Ключевые слова: цементогрунт, нанокремнезем, глинистый грунт, прочность, морозостойкость, аппарат вихревого слоя.

Для цитирования: Вдовин Е.А., Буланов П.Е., Хусаенов Б.К., Выборнов Д.Р. Модификация дорожных цементогрунтов нанокремнеземом // Известия КГАСУ, 2023, № 3(65), с.154-162, DOI: 10.52409/20731523_2023_3_154, EDN: LEHMXN

Modification of road soil-cement with nanosilica

E.A. Vdovin¹, P.E. Bulanov¹, B.K. Khusaenov², D.R. Vybornov¹

¹ Kazan State University of Architecture and Engineering,

² LLC «Specdorproect»

Kazan, Russian Federation

Abstract: *Problem statement.* The relevance of the study is justified by the need to increase the level of construction and technical characteristics and durability of soil-cement in pavement layers, as well as to reduce the content of mineral binder in reinforced soils, using nanosilica as an effective modifier. The aim of the work is to study the physical and mechanical characteristics of soil-cement modified with nanosilica.

Results. The effect of modification of soil-cement with nanosilica on the levels of indicators of compressive strength, tensile strength in bending and freeze-thaw durability has been established. The optimal content and efficiency of nanosilica for soil-cement, which ensure their possible use in the structural layers of pavements, has been determined.

Conclusions: It has been established that the modification with nanosilica ensures that the soil-cement achieve the M40 strength grade with a content of 8 % Portland cement and 0.6 % modifier or 10 % Portland cement and 0.45 % modifier by weight of the soil. Based on the regulatory requirements, the developed modified soil-cement can be used for the construction of structural layers of bases and coatings of transitional and lightweight types of pavement, depending on road and climatic conditions. However, insufficient values of frost resistance coefficients limit the applicable scope of the obtained cement soils in pavements. For further increase of the levels of physical and mechanical characteristics, additional studies on the processes of modifying soil-cement with nanoparticles are needed.

Keywords: soil-cement, nanosilica, clay, strength, freeze-thaw durability, vortex apparatus.

For citation: Vdovin E.A., Bulanov P.E., Khusaenov B.K., Vybornov D.R. Modification of road soil-cement with nanosilica // News KSUAE, 2023, № 3(65), p.154-162, DOI: 10.52409/20731523_2023_3_154, EDN: LEHMXN

1. Введение

Известно, что цементогрунты представляют собой разновидность строительного материала, полученного в результате смешения и последующего уплотнения грунтов, портландцемента (ПЦ) и воды (и модификаторов по мере необходимости) [1, 2]. Они имеют ряд преимуществ: экономичность, снижение негативной нагрузки на окружающую среду и технологичность (удобоукладываемость) при строительстве [3]. Цементогрунты широко используются в качестве основания дорожных одежд, материалов для укрепления откосов автомобильных дорог, армирования фундаментов и пр. [4, 5].

Увеличение интенсивности движения, транспортной нагрузки и давления в шинах, обусловили необходимость разработки инженерами и учеными более совершенных технологий, повышающих несущую способность дорожных одежд [6-8]. Для строительства оснований и покрытий автомобильных дорог используются различные виды глинистых грунтов и местных материалов, особенно в районах с отсутствием прочных каменных материалов [9-11]. Однако, данные материалы во влажных условиях [12] восприимчивы к воздействиям климатических факторов, что способствует развитию процессов повреждения конструктивных слоев дорожных одежд и сокращению срока службы автомобильных дорог [13].

Известно, что введение различных вяжущих улучшает свойства глинистых грунтов и местных материалов. Эти вяжущие вещества подразделяют на традиционные и нетрадиционные [1, 13]. Традиционные включают как минеральные: цемент, известь,

золы уноса, так и различные органические вяжущие: битумы, дегти и пр., а нетрадиционные – спектр различных видов ферментов, жидких полимеров, смол, силикатов, производных лигнина и пр. Среди названных вяжущих для укрепления глинистых грунтов наиболее эффективны портландцементы, так как цементогрунты обладают достаточно высокой прочностью [14-16].

Опыт исследований и применения укрепленных материалов свидетельствует о том, что для повышения уровня строительно-технических характеристик и долговечности грунтов с большим содержанием глинистых минералов, укрепленных портландцементами, в слоях дорожных одежд, а также сокращения расхода минерального вяжущего целесообразно применение модификаторов [17-19].

В последние десятилетия наночастицы вызывают особый научный интерес в области строительного материаловедения [20]. Наиболее широко применяемыми наночастицами в цементных композитах являются SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , а также углеродные нанотрубки. Одним из наиболее эффективным по данным исследований является нанокремнезем [21, 22]. Из анализа литературы следует, что для определения эффективности модификации дорожных цементогрунтов нанокремнеземом не достаточно результатов исследований и практического опыта.

Цель работы заключается в исследовании влияния модификации цементогрунтов нанокремнеземом на физико-механические характеристики материала дорожных одежд.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- исследование влияния нанокремнезема на предел прочности при сжатии и предел прочности на растяжение при изгибе модифицированных цементогрунтов;
- исследование влияния нанокремнезема на уровни показателя морозостойкости модифицированных цементогрунтов.

2. Материалы и методы

Для проведения исследований использовались пробы глинистого грунта Сахаровского месторождения Алексеевского района Республики Татарстан. Число пластичности грунта определялась как разность влажности грунта на границе текучести (31,04 %) и влажности грунта на границе раскатывания (18,14 %) и соответствовало 0,129. Содержание песчаных частиц (2,00-0,05 мм) в грунте по массе составляло 7,14 %. В соответствии с ГОСТ 25100 глинистый грунт относится к суглинку тяжелому пылеватому.

В качестве вяжущего использовался портландцемент ЦЕМ I 42,5Н ЗАО «Вольскцемент». ПЩ вводился в количестве 6%, 8% и 10% от массы грунта.

В качестве модификатора цементогрунтов применялся нанокремнезем с размером частиц 50 нм, содержание SiO_2 составляло 99,6% (производитель: LUOYANG TONGRUN INFO TECHNOLOGY CO., LTD, Китай). Нанокремнезем вводился в количествах 0,15%, 0,30%, 0,45% и 0,60% от массы грунта. Распределение нанокремнезема осуществлялось в аппарате вихревого слоя (ABC Vortex 297, Нижний Новгород, Россия) под воздействием ферромагнитных частиц,двигающихся в магнитном поле реактора. Длина рабочей зоны индуктора составляла 330 мм, напряжение на индукторе вихревого слоя регулировалось в диапазоне от 30 В до 380 В, сила тока – от 20 А до 180 А, частота индуктора – до 400 Гц.

Определение степени дисперсности проводилось на лазерном анализаторе размера частиц (HORIBA LA-950, Киото, Япония) после фиксированного времени активации наполнителя. Диапазон измерений размера частиц от 0,1 до 1000 мкм. Источниками оптического излучения являлись: лазерный диод с длиной волны 650 нм и светодиод с длиной волны 405 нм.

Время распределения наночастиц в воде составляло от 30 до 75 минут в зависимости от содержания нанокремнезема. Количество ферромагнитных частиц (роликов) в реакторе составляло 25 штук. В соответствии с ГОСТ 6870 применяемые ролики имели следующее обозначение: ролик 2x19,8 А 5. Ролики были произведены в ОАО «Шумихинский ЗПИ», Россия.

Содержание воды в модифицированных цементогрунтовых смесях рассчитывалось из условия достижения оптимальной влажности, при которой обеспечивается максимальная плотность смеси.

Определение предела прочности на сжатие цементогрунтов производилось после водонасыщения образцов в течении 2 суток. Возраст образцов на момент проведения испытаний составлял 28 суток. Коэффициент морозостойкости определялся как отношение прочности цементогрунтов после 15 циклов замораживания-оттаивания к прочности водонасыщенных образцов после 28-суточного твердения в нормальных условиях. Испытания физико-механических свойств цементогрунтов проводилось по ГОСТ 23558.

3. Результаты и обсуждение

Анализ результатов исследований показал, что модификация цементогрунтов дорожного назначения нанокремнеземом способствует повышению уровня физико-механических характеристик дорожно-строительного материала, таких как предела прочности при сжатии, растяжения при изгибе, коэффициента морозостойкости (рис. 1 - 3).

Установлено, что для всех исследованных модифицированных цементогрунтов сохраняется зависимость повышения уровней пределов прочности при сжатии и растяжении при изгибе с увеличением содержания нанокремнезема в цементогрунтах (рис. 1 - 2). Наибольшее увеличение предела прочности при сжатии по сравнению с немодифицированными материалами в 3,5 раза, предела прочности на растяжение при изгибе - в 3,0 обеспечивается при наименьшем содержании ПЦ (6,0 %) и наибольшем содержании нанокремнезема (0,6 %). Полученные результаты свидетельствуют, что наибольший эффект повышения прочностных показателей при модификации нанокремнеземом проявляется в цементогрунтах с малым содержанием ПЦ. Выявленные зависимости коррелируют с данными, представленными авторами в исследованиях цементогрунтов [22-23].

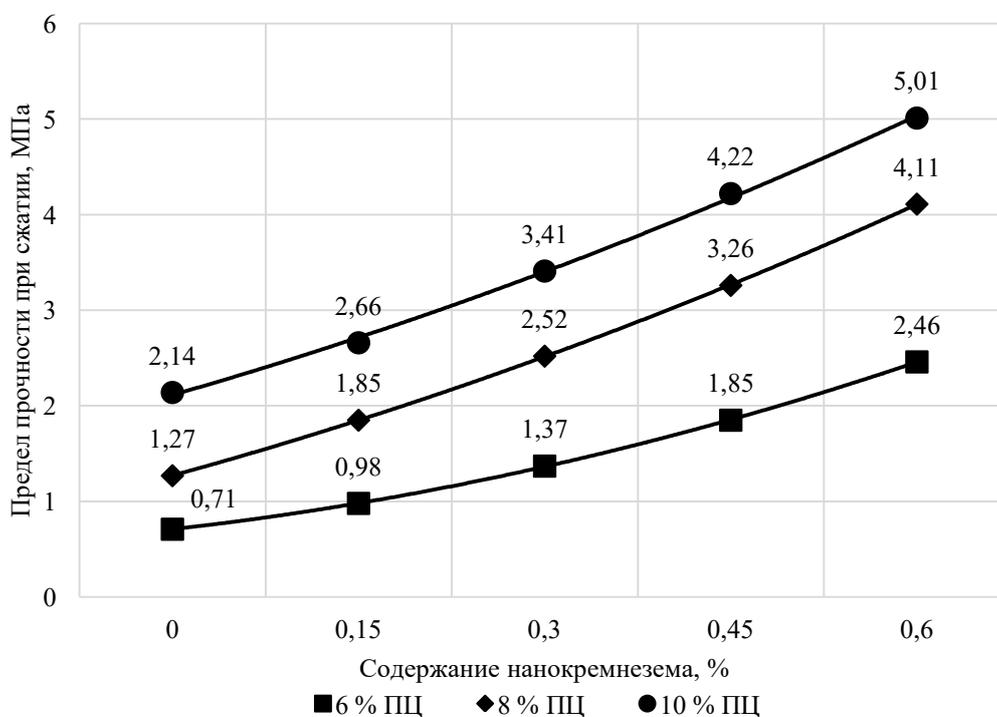


Рис. 1 – Зависимость влияния нанокремнезема на предел прочности при сжатии цементогрунтов (иллюстрация авторов)

Fig. 1 Dependence of the effect of nanosilicon on the compressive strength of cement soils (illustration of authors)

Следует отметить, что с увеличением содержания ПЩ и нанокремнезема повышение прочностных показателей цементогрунтов идет с меньшей интенсивностью, но достаточно эффективно: минимальное повышение прочности при содержании в составе грунта 10% ПЩ и 0,6 % нанокремнезема обеспечивается в 2,3 раза, прочности на растяжение при изгибе – в 2,0 раза по сравнению с немодифицированными материалами.

Выявлено, что модификация цементогрунтов нанокремнеземом обеспечивает повышение морозостойкости цементогрунтов. Оптимальное содержание нанокремнезема в пределах исследуемого диапазона (от 0 до 0,6%), способствующее максимальному повышению коэффициентов морозостойкости модифицированных цементогрунтов, составляет 0,45 % при ПЩ – 6 и 8 %, 0,6% - при ПЩ 10%. Анализ результатов показал, что наибольший эффект повышения коэффициентов морозостойкости модифицированных цементогрунтов (в 1,6 раза по сравнению с немодифицированными материалами) проявляется при повышении содержания ПЩ до 10% (рис. 3). Возможно, для формирования более морозоустойчивой структуры цементогрунтов при модификации их наноматериалами требуется определенное содержание минералов клинкера ПЩ, чтобы реализовать потенциал модификатора. Данное предположение подтверждается результатами, полученными при исследовании цементоминеральных материалов [24, 25].

Основываясь на результатах и данных других исследователей, повышение прочности и морозостойкости цементогрунтов, модифицированных нанокремнеземом, по нашему мнению, связано со следующими механизмами взаимодействия продуктов гидролиза и гидратации цемента. Нанокремнезем проявляет высокую пуццолановую активность за счет большого количества чистого аморфного SiO_2 [22]. Изменения, наблюдаемые в цементных смесях, модифицированных наночастицами SiO_2 , являются результатом химической реакции между нанокремнеземом и портландитом, образующимся при гидратации цемента. Нанокремнезем также ускоряет гидратацию цемента благодаря своей высокой поверхностной энергии [25].

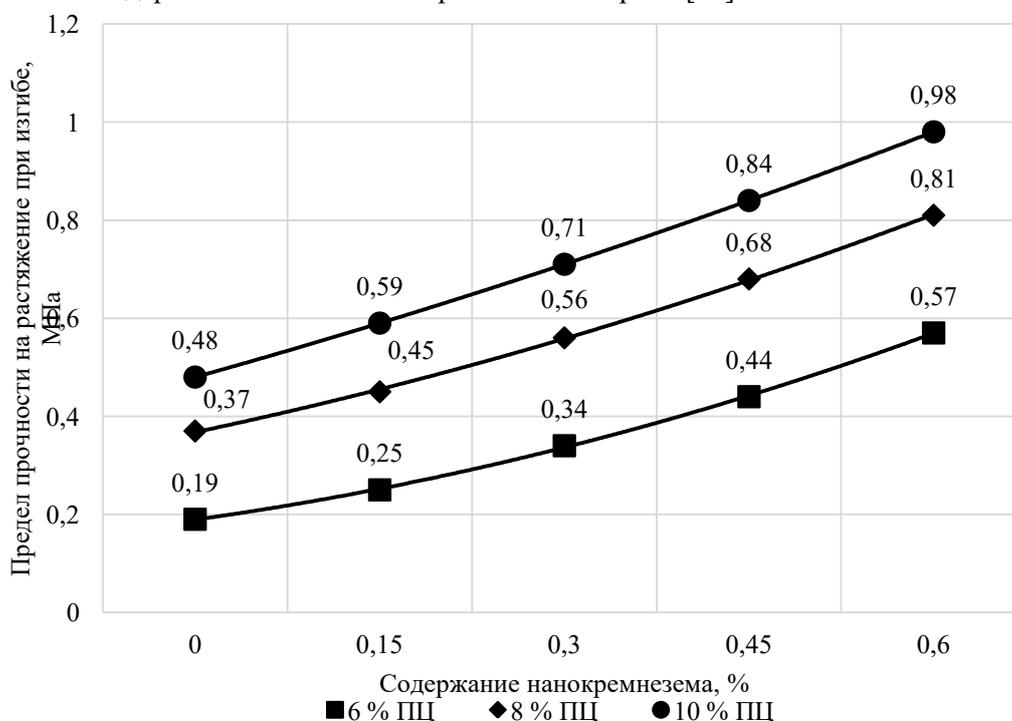


Рис. 2 – Зависимость влияния нанокремнезема на предел прочности на растяжение при изгибе цементогрунтов (иллюстрация авторов)

Fig. 2 Dependence of the effect of nanosilicon on the tensile strength during bending of cement soils (illustration of authors)

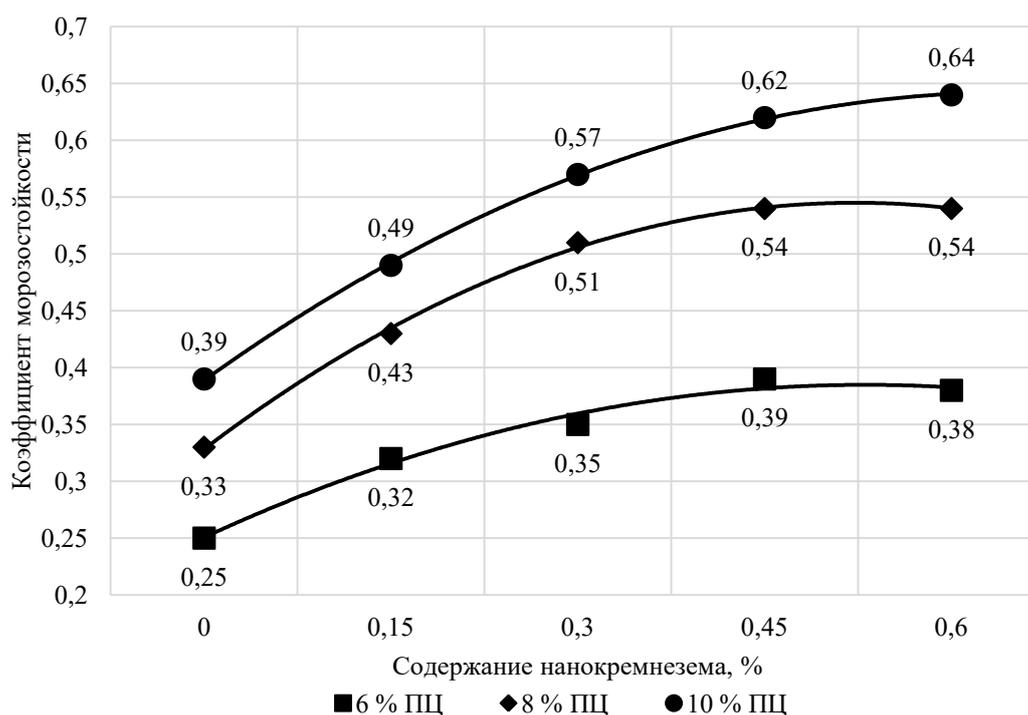


Рис. 3 – Зависимость влияния нанокремнезема на коэффициента морозостойкости цементогрунтов (иллюстрация авторов)

Fig.3 Dependence of the effect of nanosilicon on the coefficient of frost resistance of cement soils (illustration of authors)

Наночастицы SiO_2 в цементных системах вызывают физические изменения, одним из которых является повышение плотности упаковки структуры материала в результате эффекта более полного заполнения микропор частицами [23].

Другим известным физическим механизмом является эффект зародышеобразования, при котором продукты гидратации обволакивают частицы, что способствует формированию плотной матрицы материала с более равномерно распределенными продуктами гидратации [21]. Следует предположить, что вторичный гель С-S-H(II), являющийся продуктом взаимодействия цемента и нанокремнезема, обволакивает частицы грунта и заполняет микропоры в структуре, повышая плотность цементогрунтовой смеси. Данные результаты подтверждаются исследованиями [24-26].

Совместный эффект перечисленных физических и химических процессов при модификации цементогрунтов нанокремнеземом обеспечивает повышение уровней прочности и морозостойкости укрепленных грунтов, что коррелирует с результатами работ [21, 23].

Установлено, что модификация цементогрунтов нанокремнеземом обеспечивает достижение марки по прочности М40 при содержании в грунте 8 % ПЦ и 0,6 % модификатора или 10 % ПЦ и 0,45 % модификатора. По ГОСТ 23558 разработанные модифицированные цементогрунты с маркой по прочности М40 возможно использовать в конструктивных слоях оснований и покрытий переходных и облегченных типов дорожных одежд в зависимости от дорожно-климатических условий. Однако, недостаточное значение коэффициента морозостойкости (ниже 0,75) у полученных модифицированных материалов ограничивает область применения цементогрунтов в дорожных одеждах. Для обеспечения требуемых уровней физико-механических характеристик необходимы дополнительные исследования процессов модификации цементогрунтов наночастицами.

4. Заключение

1) Модификация цементогрунтов дорожного назначения нанокремнеземом способствует повышению уровня предела прочности при сжатии, растяжения при изгибе и коэффициента морозостойкости.

2) Установлено, что для всех исследованных модифицированных цементогрунтов сохраняется зависимость повышения уровней пределов прочности при сжатии и растяжения при изгибе с увеличением содержания нанокремнезема в цементогрунтах. Наибольшее увеличение предела прочности при сжатии по сравнению с немодифицированными материалами в 3,5 раза, предела прочности на растяжение при изгибе - в 3,0 обеспечивается при наименьшем содержании портландцемента (6,0%) и наибольшем содержании нанокремнезема (0,6%). С увеличением содержания портландцемента и нанокремнезема повышение прочностных показателей цементогрунтов идет с меньшей интенсивностью, но достаточно эффективно.

3) Выявлено, что модификация цементогрунтов нанокремнеземом обеспечивает максимальное повышение коэффициентов морозостойкости при оптимальном содержании модификатора, которое составило 0,45 % для материалов с портландцементом 6 и 8 %, 0,6% - с портландцементом 10%. Наибольший эффект повышения коэффициентов морозостойкости модифицированных цементогрунтов (в 1,6 раза по сравнению с немодифицированными материалами) проявляется при повышении содержания портландцемента до 10%.

4) Повышение уровней прочности и морозостойкости модифицированных цементогрунтов, возможно обеспечивается химической реакцией между нанокремнеземом и портландитом, образующемся при гидратации цемента, а также в результате образования более плотной упаковки структуры материала с заполнением его микропор частицами C-S-H(II).

5) Установлено, что разработанные модифицированные цементогрунты с маркой по прочности М40 возможно использовать в конструктивных слоях оснований и покрытий переходных и облегченных типов дорожных одежд в зависимости от дорожно-климатических условий. Расширение области применения цементогрунтов, модифицированных нанокремнеземом, возможно после дополнительных исследований процессов модификации укрепленных грунтов наночастицами.

Список литературы/References

1. Abbey S.J., Eyo U.E., Okeke C.A.U., Ngambi S. Experimental study on the use of RoadCem blended with by-product cementitious materials for stabilisation of clay soils // *Construction and Building Materials*. 2021. No. 280. P. 122476. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122476.
2. Jiang N.-J., Du Y.J., Liu K. Durability of Lightweight Alkali-Activated Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS) Stabilized Clayey Soils Subjected to Sulfate Attack // *Applied Clay Science*. 2018. No. 161. P. 70-75. doi: 10.1016/j.clay.2018.04.014.
3. Behnood A. Soil and clay stabilization with calcium-and non-calcium-based additives: a state-of-the-art review of challenges, approaches and techniques // *Transportation Geotechnics*. 2018. No. 17. P. 14-32. doi: 10.1016/j.trgeo.2018.08.002.
4. Eyo E.U., Abbey S.J. Machine learning regression and classification algorithms utilised for strength prediction of OPC/by-product materials improved soils // *Construction and Building Materials*. 2021. No. 284. P. 122817. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122817.
5. Ayeledeen M., Kitazume M. Using fiber and liquid polymer to improve the behavior of cement-stabilized soft clay // *Geotextiles and Geomembranes*. 2017. No. 46. P. 592-602. doi: 10.1016/j.geotexmem.2017.05.005.
6. Vdovin E.A., Bulanov P.E., Mavliev L.F. Physical and mechanical characteristics of soil stabilized with quicklime for road bed // *Construction of Unique Buildings and Structure*. 2022. No. 105. P. 10503. doi: 10.4123/CUBS.105.3.

7. Cai Y., Xu L. R., Liu W. Z., Shang Y., Su N., Feng D. Field Test Study on the dynamic response of the cement-improved expansive soil subgrade of a heavy-haul railway // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2020. No. 128, P. 105878. doi: 10.1016/j.soildyn.2019.105878.
8. Galeev R., Abdrakhmanova L., Nizamov R. Nanomodified organic-inorganic polymeric binders for polymer building materials // *Solid State Phenomena*. – 2018. – Vol. 276. – P. 223-228. – DOI 10.4028/www.scientific.net/SSP.276.223. – EDN YBYFXX.
9. Amiri M., Sanjari M., Porhonor F. Microstructural evaluation of the cement stabilization of hematite-rich red soil // *Case Studies in Construction Materials*. 2022. No. 16. P. e00935. doi: 10.1016/j.cscm.2022.e00935.
10. Zhang Y., Zhong X., Lin J., Zhao D., Jiang F., Wang M.-K., Ge H., Huang Y. Effects of fractal dimension and water content on the shear strength of red soil in the hilly granitic region of southern China // *Geomorphology*. 2020. No. 351. P. 106956. doi: 10.1016/j.geomorph.2019.106956.
11. Mukhametrakhimov R. Kh., Lukmanova L. V. Structure and properties of mortar printed on a 3D printer // *Magazine of Civil Engineering*. – 2021. – No. 2(102). – P. 10206. – DOI 10.34910/MCE.102.6. – EDN KYROBO.
12. Cai Y., Xu L., Liu W., Shang Y., Su N., Feng D. Field test study on the dynamic response of the cement-improved expansive soil subgrade of a heavy-haul railway // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2020. No. 128. P. 105878. doi: 10.1016/j.soildyn.2019.105878.
13. Roshan K., Choobbasti A., Soleimani K., Fakhrabadi A. The effect of adding polypropylene fibers on the freeze-thaw cycle durability of lignosulfonate stabilised clayey sand // *Cold Regions Science and Technology*. 2021. No. 193. P. 103418. doi: 10.1016/j.coldregions.2021.103418.
14. Wang D., Wang H., Larsson S., Benzerzour M., Maherzi W., Amar M. Effect of basalt fiber inclusion on the mechanical properties and microstructure of cement-solidified kaolinite // *Construction and Building Materials*. 2020. No. 241. P. 118085. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118085.
15. Salik T., Gandomi A.H. Improvement of shear strength of cohesive soils by additives: a review // *Basics of Computational Geophysics*. 2021. No. 12. P. 189-211. doi: 10.1016/B978-0-12-820513-6.00011-4.
16. В. Г. Хозин, О. В. Хохряков, Р. К. Низамов Карбонатные цементы низкой водопотребности - перспективные вяжущие для бетонов // *Бетон и железобетон*. – 2020. – № 1(601). – С. 15-28. – EDN VIDDBF [V.G. Khozin, O.V. Khokhryakov, R.K. Nizamov Carbonate cements of low water demand - promising binders for concrete // *Concrete and reinforced concrete*. – 2020. – № 1(601). – P. 15-28. – EDN VIDDB]
17. Коновалова Н.А., Дабижа О.Н., Панков П.П., Руш Е.А. Утилизация гидролизного лигнина в составах цементогрунтов // Тюменский индустриальный университет. 2019. № 23(11). С. 32-37 [Konovalova N., Dabizha O., Pankov P., Rush E. Utilization of Hydrolysis Lignin in Compositions Soil-Cements // *Ecology and Industry of Russia*. 2019. No. 23(11). P. 32-37.] doi: 10.18412/1816-0395-2019-11-32-37.
18. Куюков С.А., Гензе Д.А., Шматок В.В., Жигайлов А.А. Комплексный подход к повышению долговечности цементогрунтового основания // *Транспорт. Транспортные сооружения. Экология*. 2019. № 4. С. 80-89 [Kujukov S.A., Genze D.A., Shmatok V.V., Zhigajlov A.A. A comprehensive approach to improving the durability of soil cement foundation // *Tyumen Industrial University*. 2019. No. 4. P. 80-89.] doi: 10.15593/24111678/2019.04.10.
19. Жигайлов А.А., Куюков С.А., Тестешев А.А., Шматок В.В. Технико-экономическое обоснование метода повышения физико-механических характеристик модифицированного цементогрунта дорожного назначения // *Путевой навигатор*. 2020. № 42 (68). С. 24-29. 89 [Zhigailov A.A., Kuyukov S.A., Testeshev A.A., Shmatok V.V. Feasibility study of the method for improving the physical and mechanical characteristics of the modified cement-reinforced soil // *Way navigation*. 2020. No. 42 (68). P. 24-29.]

20. Khantimirov A.G., Abdrakhmanova L.A., Nizamov R.K., Khozin V.G. Investigation of properties in nanomodified polyethylene-based wood-polymer composites // *Nanotechnologies in construction*. 2023. No. 15(2). P. 110-116. doi: 10.15828/2075-8545-2023-15-2-110-116.
21. Niewiadomski P., Hoła J., Ćwirzeń A. Study on properties of self-compacting concrete modified with nanoparticles // *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2018. No. 18(3). P. 877-886. doi: 10.1016/j.acme.2018.01.006.
22. Dolatabad Y.A., Kamgar R., Nezaad I.G. Rheological and Mechanical Properties, Acid Resistance and Water Penetrability of Lightweight Self-Compacting Concrete Containing Nano-SiO₂, Nano-TiO₂ and Nano-Al₂O₃ // *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*. 2019. No. 44. P. 603-618. doi: 10.1007/s40996-019-00328-1.
23. Luo, X.; Kong, L.; Bai, W. Effect of Superhydrophobic Nano-SiO₂ on the Hydraulic Conductivity of Expansive Soil and Analysis of Its Mechanism // *Applied Sciences*. 2023, No. 13, P. 8198. doi: 10.3390/app13148198.
24. Zhenli H., Xiaoping X., Beibei L. Evaluating the Effect of Nano-SiO₂ on Different Types of Soils: A Multi-Scale Study // *International Journal Environmental Research and Public Health*. 2022. No. 19(24). P. 1-7. doi: 10.3390/ijerph192416805.
25. Xingchen Z., Jianen G., Henghui F., Xinghua L., Zhe G., Li X., Shengli S. Study on the Mechanism of Nano-SiO₂ for Improving the Properties of Cement-Based Soil Stabilizer // *Nanomaterials*. 2020. No. 10(3). P.405-416. doi: 10.3390/nano10030405.
26. Nemuschenko D.A., Larichkin V.V., Onipchenko A.P., Subbotin V.S. A research into the distribution of silicium dioxide nanoparticles in the mixing water // *Novosibirsk State Technical University (NSTU)*. 2020. No. 5. P.678-687. doi: 10.22227/1997-0935.2020.5.678-687.

Информация об авторах

Вдовин Евгений Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: vdovin007@mail.ru

Буланов Павел Ефимович, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: pavel.bulanov1991@yandex.ru

Хусаенов Булат Каримович, ведущий инженер, ООО «Спецдорпроект», г. Казань, Российская Федерация

E-mail: husaenov1711@mail.ru

Выборнов Даниил Романович, бакалавр, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: f_lays@mail.ru

Information about the authors

Evgeniy A. Vdovin, candidate of Engineering Sciences, assistant professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: vdovin007@mail.ru

Pavel E. Bulanov, candidate of Engineering Sciences, assistant professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: f_lays@mail.ru

Bulat K. Khusaenov, lead Engineer, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: husaenov1711@mail.ru

Daniil R. Vybornov, bachelor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: f_lays@mail.ru

УДК: 625.71

DOI: 10.52409/20731523_2023_3_163

EDN: LSIEXN



Математическое моделирование движения автомобилей и пешеходов на нерегулируемых примыканиях

Т.К. Комарова¹

¹Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет,
г. Москва, Российская федерация

Аннотация: Одним из наиболее распространенных элементов городской улично-дорожной сети является нерегулируемое примыкание в одном уровне, оборудованное пешеходным переходом. Целью исследования является определение пропускной способности полос движения на нерегулируемом примыкании в одном уровне с пешеходным движением. Задачами исследования являются разработка математической модели движения транспортных и пешеходных потоков на нерегулируемом примыкании в одном уровне, предложение иерархии и расчетной схемы движения автомобилей и пешеходов, определение пропускной способности полос движения второстепенной дороги, обоснование достоверности результатов математического моделирования. Математическая модель представляет комплексную систему уравнений, которые нужно применять в зависимости от предложенной иерархии транспортных потоков с учетом пешеходного движения. В статье приведены этапы разработки и результаты математического моделирования движения автомобилей и пешеходов на нерегулируемых примыканиях с целью определения их пропускной способности. Проведено сравнение результатов натурных исследований и математического моделирования пропускной способности правоповоротной полосы движения второстепенной дороги. Предложенная модель и результаты моделирования могут быть использованы для определения пропускной способности при проектировании, реконструкции и капитальном ремонте нерегулируемых примыканий в одном уровне с пешеходным движением.

Ключевые слова: пропускная способность, нерегулируемое примыкание, пешеходный переход, математическая модель, интенсивность движения, интервал следования.

Для цитирования: Комарова Т.К. Математическое моделирование движения автомобилей и пешеходов на нерегулируемых примыканиях // Известия КГАСУ, 2023, № 3(65), с.163-174, DOI: 10.52409/20731523_2023_3_163, EDN: LSIEXN

Mathematical modelling of the automobiles and pedestrian moving on the unsignalized junction

T.K. Komarova¹

¹Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract: One of the most common elements of the urban road network is an unsignalized junction at the same level equipped with a pedestrian crossing. The purpose of the study is to determinate the capacity of traffic lanes at an unsignalized junction at the same level with pedestrian traffic. The objectives of the study are to develop a mathematical model of the movement of traffic and pedestrian flows at an unsignalized junction at the same level, to propose a hierarchy and a design scheme for the movement of cars and pedestrians, to determine the capacity of the lanes of a minor road, to substantiate the reliability of the results of mathematical modelling. The mathematical model represents a complex system of equations

that need to be applied depending on the proposed hierarchy of traffic flows, taking into account pedestrian traffic. The article presents the stages of development and the results of mathematical modelling of the movement of cars and pedestrians on unsignalized junctions in order to determine their capacity. The comparison of the results of field studies and mathematical modelling of the capacity of the right-turn lane of a minor road is carried out. The proposed model and the simulation results can be used to determine the capacity during the design, reconstruction and overhaul of unsignalized junctions at the same level with pedestrian traffic.

Keywords: capacity, unsignalized junction, pedestrian crossing, mathematical model, traffic, headway.

For citation: Komarova T.K. Mathematical modelling of the automobiles and pedestrian moving on the unsignalized junction // News KSUAE, 2023, № 3(65), p.163-174, DOI: 10.52409/20731523_2023_3_163, EDN: LSIEXN

1. Введение

Методика определения пропускной способности нерегулируемых примыканий изложена в ОДМ 218.2.020-2012 [1] и основана теории Е.М. Лобанова о принятии интервалов в главном потоке автомобилей водителями второстепенной дороги. Зарубежные исследования посвящены вопросам движения автомобилей с учетом приоритета проезда примыкания [2, 3, 4]. Согласно принципам мультимодальности [5, 6, 7] в системе необходимо дополнительно выделить пешеходов и велосипедистов, как активных участников дорожного движения и окружающей среды относительно автомобиля [8].

Поток автомобилей и комплекс условий, в которых он движется, представляет собой типичный пример сложной системы [9, 10, 11]. При разработке проблемы, связанной с движением потока автомобилей [12], может быть рассмотрена сложная система «водитель – автомобиль – дорожные условия – средства управления движением – окружающая среда». Чтобы обеспечить наиболее эффективное функционирование системы, то есть наиболее безопасные, удобные и экономичные условия движения потоков автомобилей [13, 14] и пешеходов, необходимо определить количественные связи внутри системы и установить их влияние на поведение всей системы как единого целого. Для получения количественных показателей функционирования системы большое значение имеет выбор математического аппарата. Выбор математического аппарата существенно зависит от конечной цели и решаемых задач [9].

Целью исследования является определение пропускной способности полос движения на нерегулируемом примыкании в одном уровне с пешеходным движением.

Задачами исследования являются разработка математической модели движения транспортных и пешеходных потоков на нерегулируемом примыкании в одном уровне, предложение иерархии и расчетной схемы движения автомобилей и пешеходов, определение пропускной способности полос движения второстепенной дороги, обоснование достоверности результатов математического моделирования.

2. Материалы и методы

2.1. Разработка общей концепции математической модели

В качестве математической модели выбрана дискретная система стохастическо-детерминированных уравнений, которые следует комбинировать и последовательно применять в зависимости от исходных данных и планировочных условий для поставленной задачи.

Для случайной величины X внутри системы уравнений принято распределение Пуассона. Функция, вероятность и плотность распределения случайных величин приняты для дискретной модели согласно распределению Пуассона. Для определения границ применения математической модели проведена рандомизация параметра λ случайной величины и принято усеченное распределение пуассоновских величин.

Математические основы моделирования и распределения случайных величин приняты по вероятностно-статистическому справочнику Г.И. Ивченко и Ю.И. Медведева «Дискретные вероятностные модели: Все важнейшие дискретные модели теории вероятностей, математической статистики и комбинаторного анализа и методы их применения в теории и практике» [9].

Случайная величина (с.в.) X имеет распределение Пуассона с параметром λ ($\lambda > 0$), что кратко обозначается так: $(X) = \Pi(\lambda)$, если ее плотность имеет вид по формуле (1) [9]:

$$P\{X = r\} = \pi_r(\lambda) = e^{-\lambda} \frac{\lambda^r}{r!}, \quad r = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

Если в пуассоновском распределении значение 0 запрещено, то наблюдаемая с.в. X имеет усеченное в нуле (или положительное) пуассоновское распределение по формуле (2):

$$P\{X = k\} = e^{-\lambda} \frac{\lambda^k}{1 - e^{-\lambda}}, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

Среднее EX и дисперсия положительного пуассоновского распределения DX определены по формулам (3) и (4) соответственно:

$$EX = \frac{\lambda}{1 - e^{-\lambda}}, \quad (3)$$

$$DX = \frac{\lambda}{1 - e^{-\lambda}} - \frac{\lambda^2 e^{-\lambda}}{(1 - e^{-\lambda})^2}, \quad (4)$$

при этом EX^{-1} получим по формуле (5):

$$EX^{-1} = \frac{1}{e^\lambda - 1} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{\lambda^j}{j! j} \approx [(\lambda - 1)(1 - e^{-\lambda})]^{-1}, \quad (5)$$

(аппроксимация справедлива для достаточно больших значений λ [9]).

Сумма n независимых одинаково распределенных положительных пуассоновских величин имеет производящую функцию по формуле (6):

$$G(z) = \left(\frac{e^{\lambda z} - 1}{e^\lambda - 1} \right)^n, \quad (6)$$

а соответствующие вероятности имеют вид по формуле (7):

$$P\{Y = y\} = \frac{n! \sigma(y, n) \lambda^y}{(e^\lambda - 1)^n y!}, \quad y = n, n+1, \dots, \quad (7)$$

где $\sigma(y, n)$ есть числа Стирлинга второго рода.

Пусть $\{U_1, U_2, \dots\}$ - последовательность независимых и равномерно распределенных на отрезке $[0, 1]$ случайных величин и ξ равна по формуле (8) [9]:

$$\xi = \max \left\{ k : \prod_{i=1}^k U_i \geq e^{-\lambda} \right\}. \quad (8)$$

Тогда величина ξ распределена по закону $\Pi(\lambda)$.

Таким образом, выборку $X = (X_1, \dots, X_n)$ из распределения $\Pi(\lambda)$ можно смоделировать по формуле (9) [9]:

$$X_j = \max \left\{ k : \prod_{i=1}^k U_{X_{j-1}+i} \geq e^{-\lambda} \right\}, \quad j = 1, \dots, n, \quad X_0 = 0. \quad (9)$$

2.2. Математическое моделирование движения транспортных и пешеходных потоков

Для модели движения транспортных и пешеходных потоков на нерегулируемом пересечении при наличии пешеходного движения выбраны следующие характеристики:

- интервалы следования между передними бамперами автомобилей;
- граничные интервалы, принимаемые водителями второстепенных направлений движения;
- интервалы между группами пешеходов, пересекающих проезжую часть;
- требуемый интервал времени для пешеходов, необходимый для безопасного пересечения проезжей части.

Под событием принято появление одного автомобиля или случая перехода проезжей части в рассматриваемом условном сечении объекта. Сечение может быть назначено в следующих створах:

- полосы движения;
- дороги главного или второстепенного направления;
- кромки проезжей части в начале и конце зоны пешеходного перехода;
- вдоль границы пешеходного перехода.

Следует учитывать, что выбранный характер распределения случайных величин предполагает, что появление одного автомобиля не связано с моментом появления впереди идущего автомобиля, а величины соседних интервалов не имеют корреляционной связи.

Также следует учитывать, что появление одного пешехода или эквивалентной группы пешеходов не связано с моментом появления впереди идущего пешехода или группы пешеходов, а величины соседних интервалов не имеют корреляционной связи.

Количество случаев перехода проезжей части пешеходами зависит от ширины пешеходного перехода и интенсивности пешеходного движения. Автором принято, что случай перехода проезжей части осуществляет группа пешеходов n_{gp} эквивалентная одному свободно движущемуся пешеходу. Также группа пешеходов занимает всю ширину пешеходного перехода, что эквивалентно движению пешеходов в двух направлениях

Пропускную способность полосы движения [4, 15], оборудованную пешеходным переходом P_{III} , определим по формуле (10):

$$P_{III} = \frac{3600}{\delta t_{nn}} e^{-\frac{N_{neu} t_{neu.треб.}}{3600}} \quad (10)$$

где δt_{nn} – интервал между передними бамперами автомобилей при разъезде из очереди при пересечении пешеходного перехода, сек.

$t_{neu.треб.}$ – минимальное время, которое требуется группе пешеходов для пересечения проезжей части, сек;

N_{neu} – интенсивность пешеходов, чел./час.

В случае распределения интервалов следования [15, 16] между автомобилями в транспортном потоке согласно распределению Пуассона и применении стохастической модели движения транспортных потоков общее выражение для определения пропускной способности имеет вид [17, 18] по формуле (11):

$$P = M \frac{e^{-\frac{M}{3600} \delta t_{gp}}}{1 - e^{-\frac{M}{3600} \delta t}} \quad (11)$$

где P – пропускная способность нерегулируемого примыкания, авт./час;

M – интенсивность движения главного направления, авт./час;

δt_{cp} – граничный интервал, принимаемый водителями второстепенного направления, сек;

δt – интервал между передними бамперами автомобилей при разезде из очереди второстепенного направления, сек.

При пересечении транспортных потоков нескольких направлений движения, необходимо учитывать их иерархию.

В случае появления пешеходов на проезжей части, также следует учесть преимущество их движения перед автотранспортными средствами.

Автором предложена иерархия транспортных и пешеходных потоков различных направлений, выраженная следующими классами i ($i=1...4$) с порядковыми номерами j ($j=T1...T6$) и k ($k=П1...П3$). Расчетная схема представлена на рис. 1.

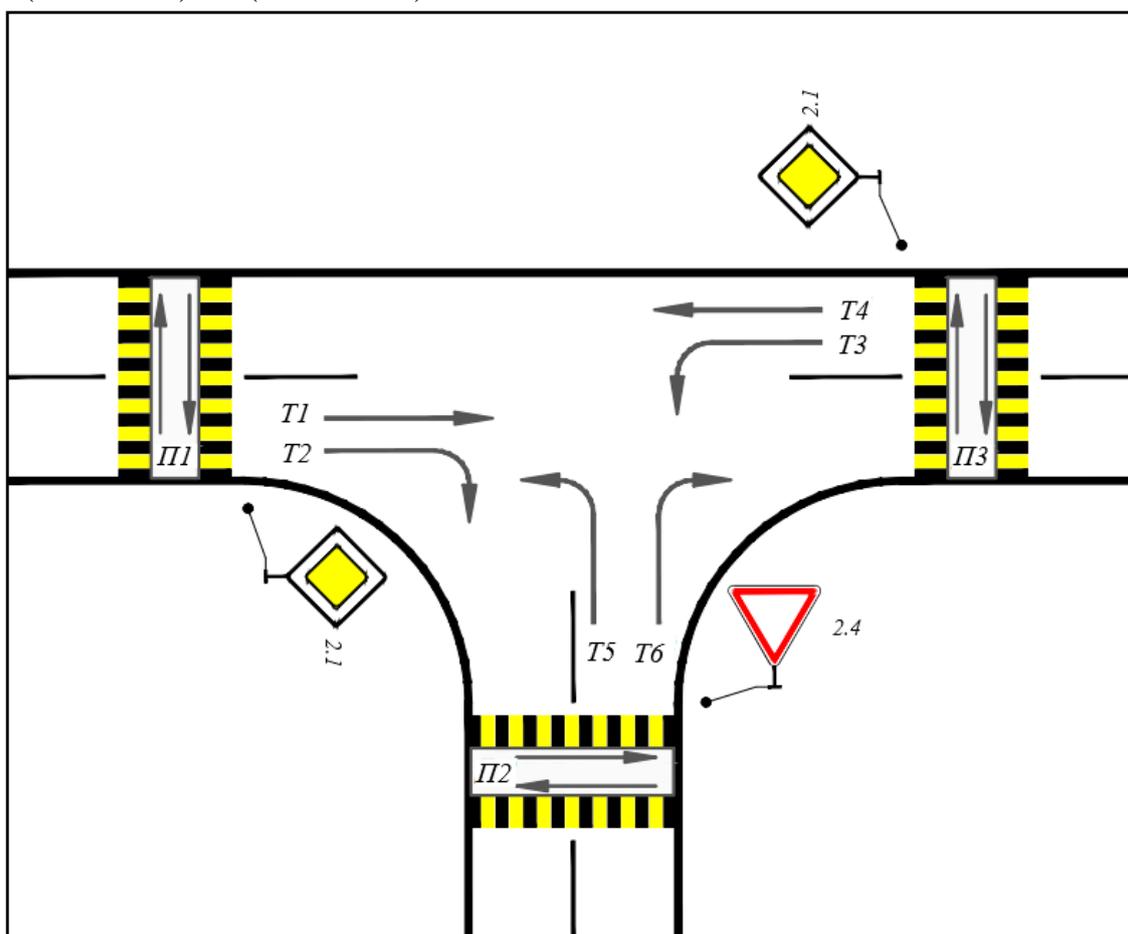


Рис. 1. Схема нерегулируемого примыкания с указанием направлений движения (иллюстрация автора).

Fig. 1. The scheme of unsignaled junction with indicating the directions of movement (illustration by the author).

Класс 1. Водители обладают преимуществом проезда примыкания и могут беспрепятственно осуществлять движение в случае отсутствия пешеходных переходов. К ним относят главные направления движения прямо Т1, Т4 и направо Т2. При наличии пешеходных переходов водители уступают пешеходным потокам П1-П3.

Класс 2. При отсутствии пешеходных переходов водители уступают направлениям движения Т1 и Т2. К ним относят главные левоповоротные направления движения Т3 и второстепенные правоповоротные направления движения Т6. При наличии пешеходных переходов водители уступают также пешеходным потокам П1-П3.

Класс 3. При отсутствии пешеходных переходов водители уступают направлениям движения Т1, Т3, Т4. К нему относят второстепенные левоповоротные направления

движения Т5. При наличии пешеходных переходов водители также уступают пешеходным потокам П1-П3.

Класс 4. Пешеходы беспрепятственно движутся по нерегулируемому переходу принятыми группами потоков П1-П3.

Математическая модель определения пропускной способности нерегулируемого примыкания с учетом иерархии типов транспортных потоков соответствует условиям:

– В транспортных потоках Т1, Т2 существует граничный интервал, достаточный для движения потоков Т3, Т6;

– В транспортных потоках Т3, Т6 отсутствует очередь ожидающих граничного интервала в транспортных потоках Т1, Т2.

– В транспортных потоках Т1, Т3, Т4 существует граничный интервал, достаточный для движения потока Т5;

– В транспортных потоках Т5 отсутствует очередь ожидающих граничного интервала в транспортных потоках Т1, Т3, Т4;

– В пешеходных потоках П1, П2, П3 существует граничный интервал, достаточный для движения потоков Т1 – Т6.

– В транспортных потоках Т1 – Т6 отсутствует очередь ожидающих граничного интервала в пешеходном потоке П1, П2, П3.

Для каждого транспортного потока направлений Т1-Т6 необходимо определить пропускную способность $P_{j,k}$ и вероятность их беспрепятственного движения $p_{j,k}$.

Вероятность беспрепятственного движения транспортных потоков $p_{j,k}$ определим по формуле (12):

$$p_{j,k} = \left(1 - \frac{N_j}{P_{j,k}}\right) * p_{\text{пеш}}^k \quad (12)$$

где N_j – интенсивность j -ого направления движения, авт./час.

Если транспортный поток не пересекает пешеходный, то $p_{\text{пеш}}^k = 1$.

Пропускную способность транспортных потоков различных направлений $P_{j,k}$ одного типа i можно объединить в пропускную способность по формуле (13):

$$P_i = \sum_1^{j,k} P_{j,k}, \quad (13)$$

Также необходимо определить вероятность беспрепятственного проезда всех потоков i –ого типа p_i по формуле (14):

$$p_i = \prod_1^{j,k} p_j p_{j,k}, \quad (14)$$

Тогда пропускная способность примыкания может быть определена по формуле (15):

$$P = p_i P_i = \prod_1^{j,k} p_j p_{j,k} \sum_1^{j,k} P_{j,k} \quad (15)$$

3. Результаты и обсуждение

В качестве расчетной модели принято нерегулируемое однополосное примыкание для правого поворота (рис. 2).

Ширина полосы движения главного и второстепенного направлений принята 3,75 м. Радиус примыкания принят 8,0 м. Ширина пешеходного перехода принята 5,0 м.

Граничный интервал, необходимый для поворота направо второстепенного направления принят $\delta t_{\text{эл}}^{\text{наво}} = 6,4$ сек. Интервал следования второстепенного направления при разъезде из очереди при повороте направо принят $\delta t_{\text{от}}^{\text{наво}} = 3,5$ сек.

Интенсивность движения главного направления принята от 0 до 2000 авт./час. Интенсивность движения пешеходов принята от 0 до 500 чел./час. Интенсивность движения второстепенного направления определена в зависимости от условий и равна пропускной способности P_9 .

Пропускная способность примыкания P будет определяться пропускной способностью правооборотной полосы движения второстепенного направления P_9 в зависимости от интенсивности движения главного направления и интенсивности пешеходов.

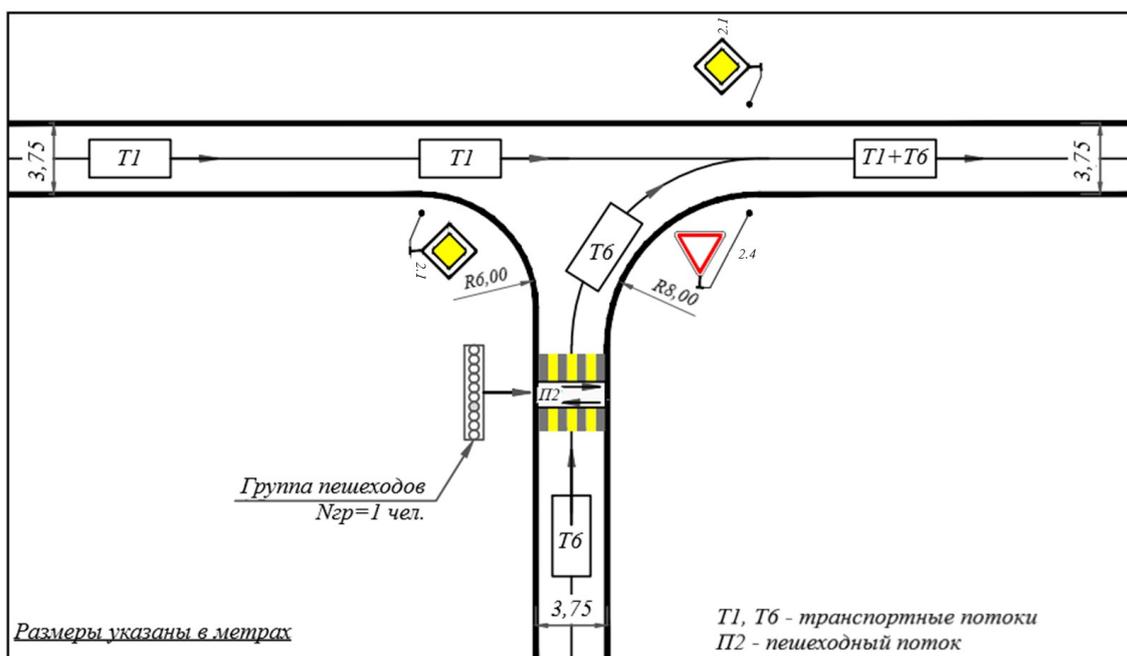


Рис. 2. Расчетная модель 1.1 (иллюстрация автора).
Fig. 2. Design model 1.1 (illustration by the author).

Результаты математического моделирования приведены на рис. 3 и 4. Характерные группы изолиний графиков представлены в диапазонах интенсивности движения главного направления $N_1 = 600 - 1100$ авт./час и $N_1 = 1-500$ авт./час.

При интенсивности движения главного направления N_1 в диапазоне от 600 авт./час до 1100 авт./час и отсутствии пешеходного движения пропускная способность правооборотной полосы движения не превышает 450 прив. ед./час.

При интенсивности движения пешеходов 150 пеш./час, пропускная способность находится в диапазоне 170 – 350 прив. ед./час.

При увеличении интенсивности движения пешеходов до 400 пеш./час пропускная способность снижается на 47% до 235 прив. ед./час.

При увеличении интенсивности движения пешеходов до 500 чел/час пропускная способность не превышает 200 прив. ед./час.

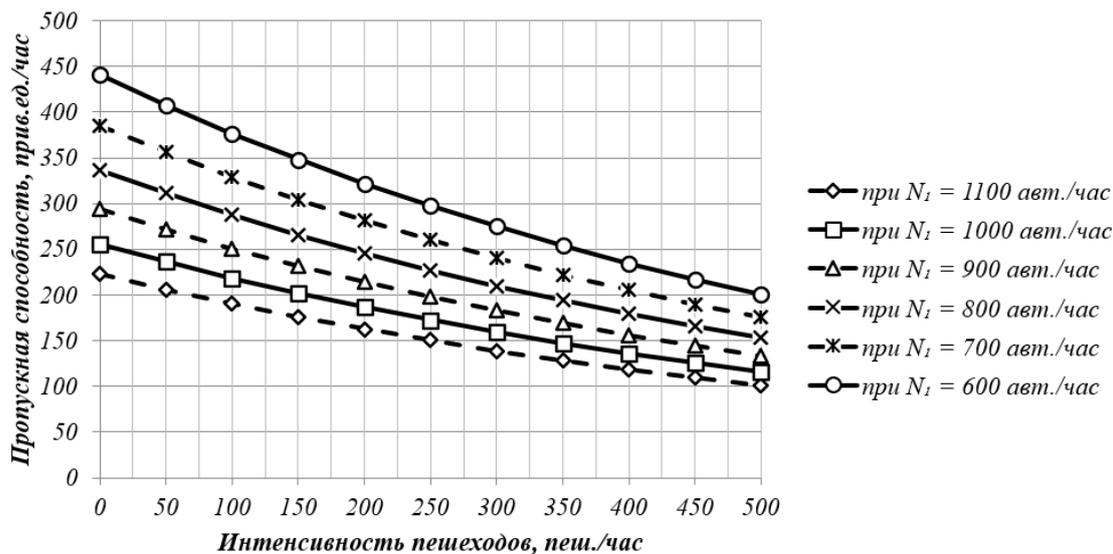


Рис. 3. Пропускная способность направления Т6 при $N_1 = 600 - 1100$ авт./час, $N_{пеш} = 0 - 500$ пеш./час. (иллюстрация автора).

Fig. 3. Capacity of the direction T6 at $N_1 = 600 - 1100$ veh./hour, $N_{пеш} = 0 - 500$ people/hour (illustration by the author).

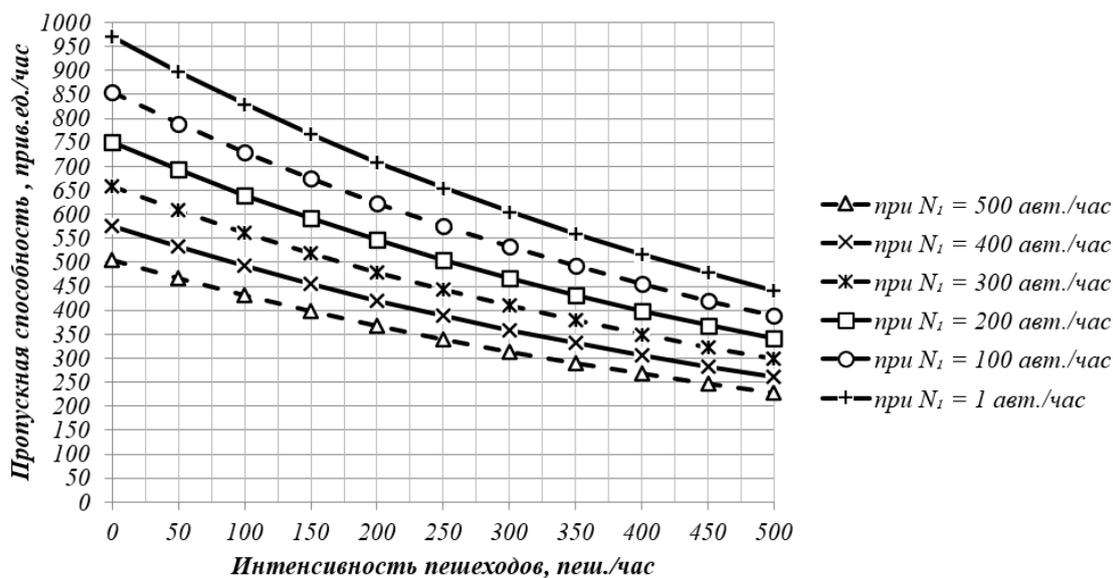


Рис. 4. Пропускная способность направления Т6 при $N_1 = 1 - 500$ авт./час, $N_{пеш} = 0 - 500$ пеш./час. (иллюстрация автора).

Fig. 4. Capacity of the direction T6 at $N_1 = 1 - 500$ veh./hour, $N_{пеш} = 0 - 500$ people/hour (illustration by the author).

При интенсивности движения главного направления N_1 в диапазоне от 100 авт./час до 500 авт./час и отсутствии пешеходного движения пропускная способность правоповоротной полосы движения не превышает 850 прив. ед./час.

При интенсивности движения пешеходов 150 пеш./час, пропускная способность находится в диапазоне 400 – 750 прив. ед./час.

При увеличении интенсивности движения пешеходов до 400 пеш./час пропускная способность снижается на 47% до 455 прив. ед./час.

При увеличении интенсивности движения пешеходов до 500 чел./час пропускная способность не превышает 450 прив. ед./час.

Результаты расчета показали, что при интенсивности движения пешеходов более 400 пеш./час пропускная способность полосы движения снижается практически в два раза.

Сравнение результатов исследования пропускной способности правоповоротной полосы движения второстепенной дороги при $N_{\text{пеш}} = 0$ чел./час с данными отечественных [1] и зарубежных авторов [3, 4] приведены на рис. 5.

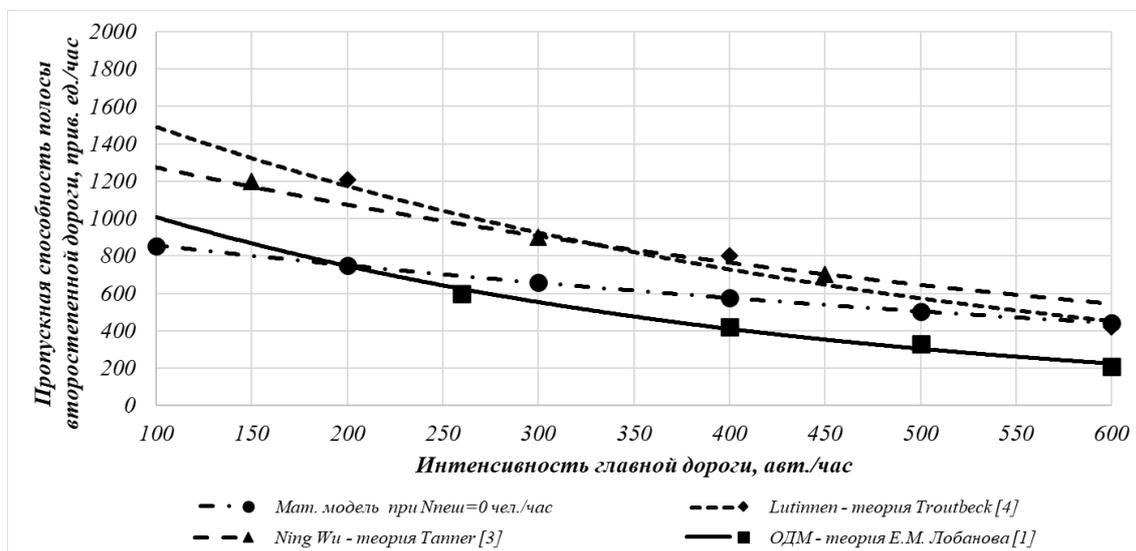


Рис. 5. Сравнение результатов математического моделирования и открытых данных. (иллюстрация автора).

Fig. 5. Comparison of the results of mathematical modeling and open data. (illustration by the author).

Проведено сравнение результатов математического моделирования и натуральных наблюдений, проведенных на городском нерегулируемом примыкании, оборудованном пешеходным переходом [19, 20].

Статистические показатели интенсивности пешеходов, зафиксированные при проведении наблюдений, как количество случаев перехода проезжей части группами по 5 человек и интенсивности движения автомобилей по правопоротной полосе второстепенной дороги, как количество автомобилей приведенное к легковому автомобилю, приведены на рисунке 6. Полученные данные находятся в диапазоне 55 – 324 чел./час. и 73 – 220 прив. ед./час соответственно.

Выборка данных математического моделирования для проведения сравнительного анализа принята в диапазоне интенсивности пешеходного движения 50 - 350 чел./час и в диапазоне пропускной способности полосы движения 50 – 300 прив. ед./час.

Для сравнения выборок по критерию Фишера для дисперсий выборок предложены две гипотезы:

H_0 – дисперсии генеральных совокупностей $D(X) = D(Y)$, различие между средними значениями статистически незначимо.

H_1 – генеральные средние $D(X) > D(Y)$, различие между средними значениями результатов статистически значимо.

Степень свободы для критерия Фишера составила 38. Допустимая ошибка $\alpha = 0,05$. Уровень надежности $P = 0,95$.

Критическое значение критерия Фишера для односторонней критической области $F_{\text{крит}} = 0,583$. Наблюдаемое значение критерия Фишера для независимых выборок составило $F_{\text{набл}} = 0,286$.

Так как $F_{\text{набл}} < F_{\text{крит}}$, то принята гипотеза H_0 , то есть различие между средними значениями результатов статистически незначимо.

- W.Brilon // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. - April, 2021.
4. Luttinen, R.T. Capacity at Unsignalized Intersections / R.T. Luttinen // TL Consulting Engineers: TL Research Report. - Lahti, 2003. - No. 3. ISBN: 952-5415-02-3, ISSN1458-3313.
 5. Hensher, D. Mobility as a service and private car use: Evidence from the Sydney MaaS trial / D.Hensher, C.Ho, D.Reck // Transportation Research Part A: Policy and Practice. - March, 2021. - Vol. 145. - P.17-33.
 6. Msaas, B. Literature Review of Mobility as a Service. Sustainability / B.Msaas // MDPI. - July, 2022. - 14, 8962.
 7. Wong, Y. Emerging transport technologies and the modal efficiency framework: a case for mobility as a service (MaaS) / Y.Wong, D.A. Hensher, C.M. Mulley // Special issue of Transportation Research Part A on MaaS and Intelligent Mobility Guest Edited by David Hensher and Corinne Mulley. – 2020. - Vol. 131. - P. 5-19.
 8. Teodorović, D. Chapter 5 - Capacity and Level of Service / D.Teodorović, M.Janić // Transportation Engineering, Butterworth-Heinemann. - 2017. - P.197-292.
 9. Ивченко, Г.И. Дискретные вероятностные модели: Все важнейшие дискретные модели теории вероятностей, математической статистики и комбинаторного анализа и методы их применения в теории и практике / Г.И.Ивченко, Ю.И.Медведев. – М.: ЛЕНАНД, 2021. - 620 с. ISBN 978-5-9710-7145-7. [Ivchenko, G.I. Discrete probability models: All the most important discrete models of probability theory, mathematical statistics and combinatorial analysis and methods of their application in theory and practice / G.I.Ivchenko, Yu.I.Medvedev. – М.: LENAND, 2021. - 620 p. ISBN 978-5-9710-7145-7.]
 10. Liu, L. Modelling Pedestrian Social Group Passing Strategy with Expression-Matrix and Social Force / L.Liu, Y.Zhao, X.Zou // Traffic and Granular Flow 2019. – 2020. - Vol 252.
 11. Yashina, M.V. Uniform Cluster Traffic Model on Closed Two-Contours System with Two Non-symmetrical Common Nodes / M.V.Yashina, A.G.Tatashev // Traffic and Granular Flow 2019. Springer Proceedings in Physics. - 2020. – Vol. 252.
 12. Cordes, J. The Trouble with 2nd Order Models or How to Generate Stop-and-Go Traffic in a 1st Order Model / J.Cordes, A.Schadschneider, A.Tordeux // Traffic and Granular Flow 2019. Springer Proceedings in Physics. - 2020. – Vol. 252.
 13. Николаева, Р.В. Исследование наездов на пешеходов на улично-дорожной сети г. Казани / Р.В. Николаева, И.И. Попова // Техника и технология транспорта. - 2022. - № 1 (24). - С. 10. URL: <http://transport-kgasu.ru/files/N2410BDD122.pdf>. [Nikolaeva, R.V. Study of collisions with pedestrians on the road network of Kazan / R.V. Nikolaeva, I.I. Popova // Transport engineering and technology. - 2022. - № 1 (24). - P. 10. URL: <http://transport-kgasu.ru/files/N2410BDD122.pdf>.]
 14. Николаева, Р.В. Оценка поведения пешеходов / Р.В. Николаева, П.Л. Щур // Вестник НЦБЖД. – 2023. – № 2 (56). – С. 119–127. [Nikolaeva, R.V. Pedestrian Behavior Assessment. / R.V. Nikolaeva, P.L. Shchur // Vestnik NCBZHD. – 2023. – № 2 (56). – P. 119–127.]
 15. Lemke, K. The New German Highway Capacity Manual (HBS 2015) / K.Lemke // Transportation Research Procedia. - 2016. - Vol. 15. - P.26-35.
 16. Luttinen, R.T. Movement Capacity at Two-Way Stop-Controlled Intersections / R.T. Luttinen // Transportation Research Record. – 2004. vol. 1883. - P. 198-202.
 17. Wegmann, H. A General Capacity Formula for Unsignalized Intersections / H.Wegmann // Intersections without Traffic Signals II: Proceedings of an International Workshop. - 18–19 July, 1991. - P.177-191.
 18. Wu, N. Universal procedure for capacity determination at unsignalized (Priority-Controlled) intersections / N.Wu, W.Brilon // Transportation Research Part B: Methodological. - July, 2001. - vol. 35. - P. 593-623.
 19. Komarova, T.K. Improving the Digital Modeling Quality of Unsignalized Intersections Equipped with a Pedestrian Crossing / T.K. Komarova // 2022 Intelligent Technologies

and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED). - 2022. - P. 1-4. - doi: 10.1109/TIRVED56496.2022.9965532.

20. Немчинов, Д.М. «Переходный» период / Д.М. Немчинов, Д.С. Мартяхин, Т.К. Комарова, Н.В. Данилина // Автомобильные дороги. – 2022. – № 9(1090). – С. 120-121. – EDN NCJDRV. [Nemchinov D.M. "Transition" period. D.M. Nemchinov, D.S. Martuyakhin, T.K. Komarova, N.V. Danilina // Highways. – 2022. – № 9(1090). – P. 120-121. – EDN NCJDRV.]

Информация об авторах

Комарова Татьяна Константиновна, аспирант, ассистент кафедры «Изыскания и проектирование дорог», Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, г. Москва, Российская Федерация.

Email: tatianakkom@gmail.com

Information about the authors

Tatiana K. Komarova, postgraduate student, assistant of the Department of Survey and Design of Roads, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Email: tatianakkom@gmail.com



Предотвращение обрушения стенок котлованов и траншей в стесненных условиях застроенных территорий

Р.А. Хузиахметов¹, К.Р. Хузиахметова¹, Ф.Р. Расулев²

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет,

²ООО «Казанский Инженерный Проект»,

г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. *Постановка задачи.* Опыт строительства новых зданий и производства ремонтных и реставрационных работ в условиях плотной городской застройки позволяет обеспечить безопасность выполнения работ подземной части зданий на исторически сложившихся территориях. *Целью* настоящего исследования является изучение конструктивных и технологических решений по предотвращению обрушения стенок котлованов и траншей для фундаментов различной глубины заложения в стесненных условиях городской застройки. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Выполнен информационно-аналитический обзор конструктивных решений объектов строительства, ремонта и реконструкции в стесненных условиях городской застройки.
2. Выполнен обзор современного опыта по организации и технологии работ нулевого цикла при строительстве и ремонте зданий в стесненных условиях городской застройки.
3. Выполнен обзор конструктивных решений и нормативных требований по обеспечению устойчивости стенок траншей и котлованов.

Результаты. Выполненный обзор строительства новых объектов с одновременной реконструкцией существующих зданий городской застройки позволяет констатировать, что полноценные инженерно-геологические изыскания, а также качественное конструирование и проектирование подземной и надземной частей зданий являются залогом безопасного производства выполнения строительно-монтажных работ.

Выводы. Безопасность объекта строительства и ремонта в стесненных условиях плотной городской застройки связана с сохранением работоспособного состояния всех существующих на осваиваемой территории зданий, также с недопущением опасных ситуаций на каждом этапе строительства новых объектов. При этом следует учитывать ограниченную возможность развертывания необходимой по размерам строительной площадки по сравнению с нестесненными условиями, определяемыми нормативными требованиями к новому строительству. Проанализированные конструктивные решения креплений стенок траншей и котлованов обеспечивают соблюдение требований безопасности на строительной площадке. При этом при разработке и засыпке неглубоких земляных выемок требуется безоговорочное соблюдение требований безопасного производства работ. Рассмотренные авторами отдельные схемы конструкций укрепления вертикальных стенок траншей и котлованов в различных сочетаниях позволяют выполнить новые комбинаторные схемы креплений, исполнение которых ориентировано на применение традиционных и современных легких строительных материалов и изделий.

Ключевые слова: безопасность строительных работ, стесненные условия, устойчивость, обрушение грунта, крепление стенок траншей и котлованов.

Для цитирования: Хузиахметов Р. А., Хузиахметова К. Р., Расулев Ф. Р. Предотвращение обрушения стенок котлованов и траншей в стесненных условиях застроенных территорий // Известия КГАСУ, 2023, № 3(65), с. 175-184, DOI: 10.52409/20731523_2023_3_175, EDN: NSPDCV

Prevention of collapse of pit and trench walls in cramped conditions of built-up areas

R.A. Khuziakhmetov¹, K.R. Khuziakhmetova¹, F.R. Rasulev²

¹Kazan State University of Architecture and Engineering,

²LLC «Kazan Engineering Project»,

Kazan, Russian Federation

Abstract: *Problem statement.* The experience of construction of new buildings and repair and restoration works in the conditions of dense urban development allows ensuring the safety of work performance of the underground part of buildings on the historically established territories.

The purpose of this research is to study design and technological solutions to prevent the collapse of the walls of pits and trenches for foundations of various depths in cramped urban conditions. The following tasks were solved to achieve this goal:

1. The information and analytical review of design solutions for construction, repair and reconstruction projects in cramped urban conditions was carried out.
2. The review of modern experience in the organization and technology of zero-cycle work during the construction and renovation of buildings in cramped urban conditions was carried out.
3. The review of design solutions and regulatory requirements to ensure the stability of the walls of trenches and pits was completed.

Results. The performed review of new construction sites with a simultaneous reconstruction of existing buildings of urban development allows stating that a full survey, as well as the qualitative design and construction of underground and above-ground parts of buildings is a guarantee of safe implementation of construction and erection works.

Conclusions. The safety of the object of construction and repair in the cramped conditions of dense urban building is linked to the preservation of serviceable condition of all existing buildings on the territory under development, as well as the avoidance of dangerous situations at each stage of construction of new facilities. At the same time, it is necessary to take into account the limited possibility of deployment of the necessary size of the construction site in comparison with the unconstrained conditions determined by the regulatory requirements for new construction. The analyzed structural solutions of trench and excavation wall supports ensure compliance with the safety requirements at the construction site. At the same time, during the development and backfilling of shallow excavations, it is required to observe the requirements of safe work performance. The individual schemes of structures for strengthening vertical walls of trenches and pits considered by the authors in various combinations make it possible to perform new combinatorial schemes of fastening, the execution of which is focused on the use of traditional and modern lightweight building materials and products.

Keywords: safety of construction works, cramped conditions, stability, soil collapse, fixing the walls of trenches and pits.

For citation: Khuziakhmetov R.A., Khuziakhmetova K.R., Rasulev F.R. Prevention of collapse of pit and trench walls in cramped conditions of built-up areas // News KSUAE, 2023, № 3(65), p. 175-184, DOI: 10.52409/20731523_2023_3_175, EDN: NSPDCV

1. Введение

Любой вид строительного-монтажных работ на новых строительных объектах, а также выполнение капитального ремонта существующих объектов недвижимости имеет достаточно высокий уровень опасности и травматизма [1, 2]. Основными причинами травматизма являются слабая подготовка и недостаточный опыт строительных рабочих [3–5]. При этом одни опасности имеют потенциально-вероятностный характер [6, 7], а другие приводят к получению травм [8–10]. Недопущение несчастных случаев при выполнении земляных работ и работ нулевого цикла в траншеях и котлованах на объектах строительства и ремонта является важной и сложной, но вполне решаемой

задачей [11, 12]. При этом одна из основных серьезных и аварийно-опасных ситуаций – это обрушение откосов или вертикальных стенок грунта [13, 14].

Строительство новых зданий и сооружений в современных городах осуществляется в условиях плотной городской застройки. В связи с этим необходимо организовывать выполнение строительно-монтажных работ в стесненных условиях как при работах нулевого цикла, так и при строительстве надземной части каждого конкретного здания, встраиваемого в комплекс уже имеющихся на территории зданий и сооружений. Сложной и ответственной частью работы является подготовка к строительству каждого нового объекта, поскольку это требует организации инженерно-геологических изысканий на месте предполагаемого строительства, проектирования и конструирования подземной фундаментной части здания и коммуникаций. При этом следует обеспечить сохранность и безопасное работоспособное состояние окружающих зданий и сооружений в непосредственной близости от возводимого объекта. В России имеется достаточный опыт такого строительства.

Принятый в Российской Федерации Федеральный закон № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» от 30 декабря 2009 года регламентирует необходимость обеспечения безопасности зданий и сооружений на всех периодах их жизненного цикла, в том числе при их строительстве и при ремонтно-строительных работах, во время капитального ремонта и реставрации объектов. Достижению этих целей способствует выполнение всестороннего качественного обследования технического состояния строительных конструкций здания до начала ремонтных работ [15], выбор строительной техники [16–18], а также подготовка всей требуемой проектной документации [19, 20].

Производство земляных работ, выполняемых вручную или механизированным способом, должно осуществляться в соответствии с требованиями действующего документа «Правила по охране труда при строительстве, реконструкции и ремонте»¹ и другими взаимосвязанными с ними нормативными актами. В советский период российской истории требования безопасности при выполнении земляных работ хронологически содержались в строительных нормах безопасности: СНиПах 50-ых годов, СНиП III-A.11-62, СНиП III-A.11-70, СНиП III-4-80, СНиП 12-03-2001 и СНиП 12-04-2002.

В настоящее время в Российской Федерации действует впервые принятый приказом Минстроя РФ от 23 июля 2018 года № 444/пр свод правил СП 381.132258800.2018 «Сооружения подпорные. Правила проектирования»². Кроме основных требований к проектированию подпорных сооружений и стен подвалов, этот свод правил распространяет свое действие и на ограждения котлованов, траншей и конструкций их крепления.

Целью данного обзора является изучение конструктивных и технологических решений по предотвращению обрушения стенок котлованов и траншей для фундаментов различной глубины заложения в стесненных условиях городской застройки.

Для достижения поставленной цели следует решить следующие задачи:

1. Выполнить информационно-аналитический обзор конструктивных решений объектов строительства, ремонта и реконструкции в стесненных условиях городской застройки.
2. Выполнить обзор современного опыта по организации и технологии работ нулевого цикла при строительстве и ремонте зданий в стесненных условиях городской застройки.
3. Выполнить обзор конструктивных решений и нормативных требований по обеспечению устойчивости стенок траншей и котлованов.

2. Основная часть

2.1. Информационно-аналитический обзор конструктивных решений объектов строительства, ремонта и реконструкции в стесненных условиях городской застройки.

¹ Утверждены Министерством труда и социальной защиты 11 декабря 2020 г. № 883н

² Введен в действие с 24 января 2019 г.

В 2018/19 годах в Казани была завершена реконструкция трехэтажной Шамовской больницы, построенной в 1907-1910 годах купцом Я.Ф. Шамовым³. При реконструкции здания в непосредственной близости от него была сооружена подземная четырехэтажная пристройка в котловане глубиной около 20 м. Особенно проблемным было расположение подземного котлована в непосредственной близости от фундамента существующего здания на расстоянии около 0,5 м. Авторами статьи⁴ в проектной документации⁵ были разработаны технические решения, предусматривающие усиление фундаментов основного реконструируемого здания вблизи разрабатываемого котлована для строительства подземной пристройки. Для усиления оснований и фундаментов на отдельных участках котлована были запроектированы вертикальные буронабвекционные сваи диаметром 150 мм, длиной 9 м с объединением их монолитным железобетонным ленточным ростверком сечением 500x500 мм. Фундаменты существующего здания были пересажены на монолитную железобетонную плиту толщиной 500 мм с укреплением искусственного основания. Основными несущими элементами ограждения котлована были запроектированы буронабивные сваи диаметром 1000 мм, длиной около 33 м с железобетонным ленточным ростверком, который монолитно соединялся с плитой усиления фундамента под торцевой стеной существующего здания больницы.

Этим же коллективом авторов были разработаны конструктивные решения ограждающих конструкций котлована, а также мероприятия по обеспечению устойчивости разрабатываемого котлована глубиной более 10 м под единый трехъярусный подземный паркинг под двумя 25-этажными жилыми зданиями, возводимыми в окружении 4-х и 5-ти этажными зданиями^{6,7}.

В статье [21] представлено проектное решение 24-этажного жилого дома с пристроенной подземной двухэтажной парковкой. Здание и парковка расположены в зоне исторической застройки г. Ростов-на-Дону, где они граничат с гаражами и тремя жилыми зданиями, построенными более 100 лет назад. Конструктивное решение по укреплению стен котлована заключается в устройстве ограждения из буронабивных свай и буронабвекционных свай-анкеров для исключения влияния на близ расположенные здания.

В исследовании [22] рассматривается устройство ограждения котлована размерами в плане 59x55 м и глубиной около 4,8 м с применением металлической шпунтовой стенки с глубиной заделки шпунта 12 м. Объект строительства (16-этажное монолитное здание) расположен в Приморском районе г. Санкт-Петербург вблизи станции метро. Для данного участка характерным являются сложные инженерно-геологические грунтовые условия, отягощенные в гидрогеологическом отношении (грунтовые воды установлены на глубине 0,2-1,3 м). Также в данной работе приведен перечень ограждений для крепления стен котлованов. Кроме этого, авторами выполнен расчет котлована с использованием современных методов расчета напряженно-деформированного состояния системы «массив грунта – шпунтовая стенка – окружающая застройка».

Прогноз оседания земляной поверхности при разработке котлована для строительства общественного здания в городских условиях выполнен в статье [23]. Здание запроектировано 16-этажным с подземным встроено-пристроенным паркингом. Размеры здания высотой 54,8 м в плане по первому этажу около 29,8x43,99 м. Котлован в плане прямоугольный с размерами 59x55 м и глубиной около 4,8 м. Укрепление стенок котлована запроектировано из металлического шпунта Ларсена. Глубина заделки шпунта

³ Реконструкция здания Шамовской больницы была начата в 2009 году.

⁴ Мирсаяпов И.Т., Хасанов Р.Р., Сафин Д.Р. Исследование ограждающих конструкций котлована подземного пристроя при реконструкции Шамовской больницы г. Казани // Известия КГАСУ, 2015, № 4 (34). С. 191-199.

⁵ Мирсаяпов И.Т., Хасанов Р.Р., Сафин Д.Р. Ограждающая конструкция котлована и конструкции, обеспечивающие устойчивость ограждения здания Шамовской больницы (1908 г. арх. К.С. Олешкевич) РТ, г. Казань, ул. Калинина, д. 5/24. Пояснительная записка к проекту. – Казань. 2015.. – 68 с.

⁶ Мирсаяпов И.Т., Хасанов Р.Р., Сафин Д.Р. Проектирование ограждения глубокого котлована в условиях стесненной городской застройки // Известия КГАСУ, 2015, № 2 (32). С. 183-191.

⁷ Мирсаяпов И.Т., Хасанов Р.Р., Сафин Д.Р. Ограждающая конструкция котлована жилого комплекса по ул. Шульгина г. Казани. Пояснительная записка к проекту. – Казань. 2015.. – 60 с.

до прочного слоя грунта составляет 12 м. Для предотвращения горизонтального сдвига шпунтовой стенки углы котлована были раскреплены распорками в два пояса на расстоянии 4 м и 8 м от углов котлована.

В работе [24] запроектирован котлован под 8-этажное здание с трехуровневой подземной автостоянкой. Котлован прямоугольный с размерами 37,6x31,3 м и глубиной 11,45 м. Ограждение котлована выполнено в виде «стена в грунте» толщиной 600 мм, которое заглубляется ниже дна котлована на 6,25 м. В зоне влияния запроектированного котлована находятся два здания застройки середины XX века, имеющие глубины заложения фундаментов до 2,1 м. Для крепления этого ограждения запроектированы активные грунтовые анкеры-РИТ и распорные конструкции. Грунтовые анкеры-РИТ установлены в двух уровнях, в том числе и под существующими зданиями.

2.2. Обзор современного опыта по организации и технологии работ нулевого цикла при строительстве и ремонте зданий в стесненных условиях городской застройки.

Факт строительства в стесненных условиях обуславливает невозможность полноценного развертывания строительной площадки и организации условий для выполнения различных строительных работ, в том числе и использование строительных машин и механизмов. Об этом говорится в статье [25], в которой рассматриваются вопросы организации строительства зданий и технологии их возведения в условиях плотной городской застройки. До начала земляных работ по периметру будущего котлована обычно устраиваются шпунтовые ограждения с применением металлических труб, швеллеров или двутавров погружением в грунтовый массив. В ответственных случаях элементы шпунтового ограждения (круглого трубчатого сечения) устанавливаются в пробуренные скважины. Также, отступив от существующих фундаментов на 1-3 м, для усиления фундаментов имеющихся зданий устраиваются буроинъекционные сваи. В особо ответственных случаях отдельные из этих свай проходят через тело существующего фундамента. После завершения работ нулевого цикла шпунтовое ограждение извлекается, а буроинъекционные сваи остаются в грунте. Также по завершении строительства подземной части здания в грунте остаются все элементы конструкции «стена в грунте». Это сооружение является достаточно сложным по исполнению и требует вложения значительных материальных затрат. В статье также изложена технология выполнения работ нулевого цикла в условиях городской застройки. Кроме этого, в данной статье приведены мероприятия, обеспечивающие соблюдение санитарных требований и требований безопасного производства работ.

Автор исследования [26] аналитически развивает приведенные в работе [25] особенности обеспечения безопасного строительства в условиях плотной городской застройки. Кроме этого, обращается внимание на необходимость геотехнического мониторинга состояния близ расположенных зданий и сооружений. Также в статье указывается на необходимость соблюдения нормативных требований учета возникающих экологических проблем, связанных с защитой атмосферного воздуха, вывозом строительных отходов и влиянием на возможность изменения состояния грунтовых вод.

В статье [27] отмечается, что «котлован является сложным инженерным сооружением». К этому же следует добавить, что котлован, разрабатываемый в стесненных условиях, усложняет задачу и повышает ответственность возводимых в нем сооружений. Это связано с тем, что требуется гарантировать сохранность находящихся рядом с ним зданий и сооружений. Важным также является обеспечение безопасного и безаварийного ведения работ в котловане при выполнении строительно-монтажных работ нулевого цикла. В статье приведен перечень котлованов по глубине, их конструктивным исполнениям, дана оценка качества ограждений котлованов, а также выполнен анализ замечаний по отклонениям от проектных решений (то есть нарушений). Кроме того, в статье представлена информация по нарушениям (причинам), вызвавшие в 12 случаях аварийные ситуации, основными из которых явились следующие: нарушения технологии производства работ, отступления от требований проекта, использование данных результатов ранее проведенных инженерно-геологических изысканий, некачественное их проведение.

2.3. Информационно-аналитический обзор конструктивных решений и нормативных требований по обеспечению устойчивости стенок траншей и котлованов.

В исследовании [22] выполнен обзор конструктивных исполнений креплений стенок траншей и котлованов:

- распорные крепления (в распор или с уклоном), комплектуемые деревянными ограждающими досками или деревянными либо металлическими щитовыми конструкциями;

- свайные ограждающие барьеры (железобетонные сваи, стальные трубы, плиты или профили) с размещением в шахматном порядке в один-два ряда через 0,5 или 1,5 м с заполнением или без него;

- «стена в грунте», применяемая в котлованах для подземных уровней зданий и сооружений глубиной до 30-40 м;

- грунтовые анкера (инъекционные или самозабуриваемые), используемые для предотвращения обрушения стен котлована;

- переносное сеточное ограждение стен траншей и котлованов из высокопрочной стальной проволоки и труб для кратковременного крепления и при незначительных сроках работ;

- шпунтовые ограждения для крепления стен котлованов глубиной до 8 м при слабых водонасыщенных грунтах с высоким уровнем грунтовых вод. Наиболее распространены шпунты «Ларсен».

Для фундаментов мелкого заложения конструктивные решения крепления стенок котлованов и траншей, их разработка, вопросы обеспечения безопасности производства работ в них представлены в учебниках и других учебно-методических разработках по технологии и организации строительства и в нормативно-технической литературе.

Обеспечение устойчивости стен неглубоких траншей и котлованов возможно при их разработке с откосами менее угла естественного откоса грунта, а также при разработке траншей с вертикальными стенками без крепления и с креплением вертикальных стенок. Разработку земляных выемок глубиной до 2 м без крепления их стенок можно производить только при связном грунте.

При большей глубине траншей с вертикальными стенками, а также при несвязных грунтах необходимо устраивать их крепление. Авторами данной статьи были проанализированы рисунки и чертежи из вышеназванных учебных и нормативных источников, где они имеют различное оформление, степень конструктивной наполненности и детализации. На нижеприведенном рисунке авторы представили оформленные ими в едином стиле часто используемые основные виды вертикальных креплений земляных выемок.

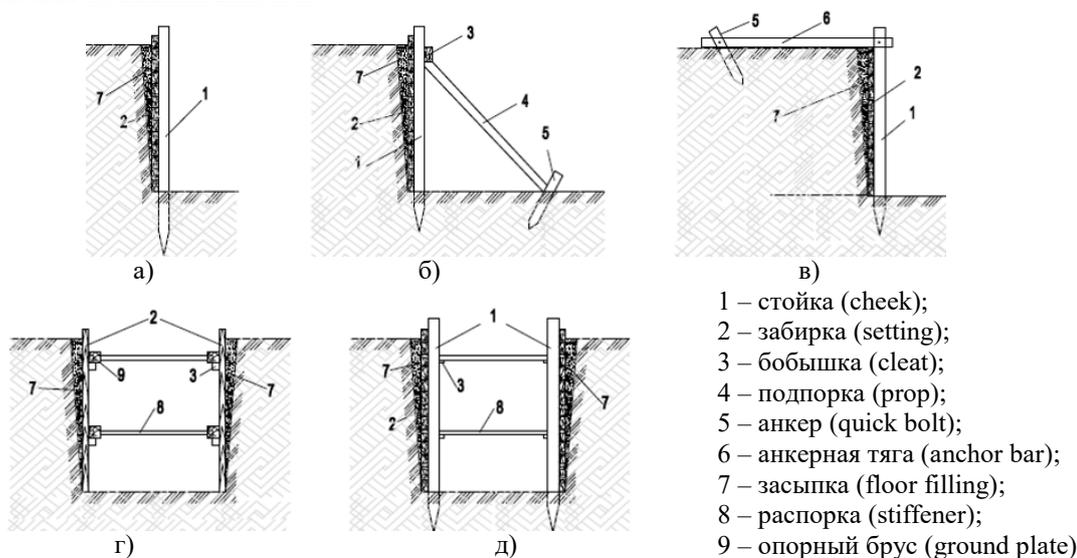


Рис.1. Крепление вертикальных стенок траншей и котлованов для фундаментов мелкого заложения (иллюстрация авторов): а) стоечное; б) опорно-стоечное; в) якорное;

г) распорное с вертикальными досками;

д) распорное с горизонтальными досками

Fig.1. Fixing the vertical walls of trenches and pits for shallow foundations (illustration by the authors): a) post; b) support-post; c) anchoring; d) spacing with vertical boards; e) spacing with horizontal boards.

В документах СП 381.132258800.2018 и «Правила по охране труда при строительстве, реконструкции и ремонте», введенном в действие приказом Минтруда № 883н от 11 декабря 2020 года, разработка котлованов и траншей с вертикальными стенками без креплений в нескальных и незамерзших грунтах выше уровня грунтовых вод и при отсутствии вблизи подземных сооружений (п. 129 Правил) разрешается на глубину не более:

- 1,0 м – в несслежавшихся насыпных и природного сложения песчаных грунтах;
- 1,25 м – в супесях;
- 1,50 – в суглинках и глинах.

Разработка котлованов и траншей с откосами без креплений в нескальных грунтах выше уровня грунтовых вод допускается при строго разрешенных глубинах выемок и крутизне откосов. Для обеспечения устойчивости вертикальных стенок земляных выемок глубиной до 3 м рекомендуется применять инвентарные вертикальные крепления, а также изготовленные по индивидуальным проектам.

При установке крепления его верхняя часть должна быть выше бровки выемки не менее чем на 0,15 м.

Стойки креплений следует устанавливать не реже через каждые 1,5 м.

Распорки креплений следует размещать одну над другой по вертикали на расстоянии не более 1 м, на концы распорок (сверху и снизу) закреплять фиксирующие бобышки.

В грунтах естественной влажности, кроме песчаных, толщина досок забирки должна быть не менее 4 см, а зазоры между досками - не более 0,15 м. В грунтах повышенной влажности и в сыпучих грунтах доски толщиной не менее 5 см следует располагать без зазоров.

Устанавливать крепления необходимо в направлении сверху-вниз по мере разработки выемки на глубину не более 0,5 м.

Разборку креплений следует производить в направлении снизу-вверх по мере обратной засыпки выемки.

Личный практический опыт работы авторов данной статьи на строительной площадке при выполнении работ по укреплению и разборке таких защитных конструкций, а также опыт участия в расследовании несчастных случаев, связанных с обрушением грунта, позволяет отметить следующее:

1. Выполнение строительно-монтажных работ в траншеях и котлованах, защищённых от обрушения грунта способами, представленными на рисунке, обеспечивает их безопасность.

2. Исходя из представленных нормативных технологических требований последовательности разработки и засыпки траншей и котлованов с использованием приведенных на рисунке креплений стенок выемок, практическое следование нормативным требованиям представляется весьма затруднительным.

3. Процесс одновременной засыпки и разборки креплений является трудоемким и потому длительным. К тому же при этом безопасность рабочего процесса в полной мере не гарантируется.

4. На настоящее время у авторов данной статьи имеются определенные наработки по новым конструктивным решениям креплений вертикальных стенок траншей и котлованов при сочетании конструктивных исполнений некоторых из представленных на рисунке вертикальных креплений.

4. Заключение

1. Выполнение строительно-монтажных работ в стесненных условиях плотной городской застройки непосредственно связано с сохранением работоспособного состояния всех существующих на осваиваемой территории зданий, а также с недопущением опасных ситуаций на каждом этапе строительства новых объектов.

Качественно выполненные инженерно-геологические изыскания, оригинальное конструирование и грамотное проектирование фундаментной части новых зданий при их совместной работе с фундаментными конструкциями имеющихся зданий обеспечивают безопасность работ на строительной площадке.

2. Организационные и технологические решения по строительству новых зданий и одновременное производство ремонта и реконструкции имеющихся объектов недвижимости во многом определяются ограниченной возможностью развертывания необходимой по размерам строительной площадки по сравнению с нестесненными условиями, определяемыми нормативными требованиями к новому строительству.

Для обеспечения безопасного строительства новых объектов и производства ремонтно-восстановительных и реконструкционных работ существующих объектов в стесненных условиях современных городских территорий до начала выполнения работ нулевого цикла в обязательном порядке следует укреплять стены и откосы разрабатываемых траншей и котлованов.

3. Конструктивные решения обеспечения устойчивости котлованов для устройства фундаментов глубокого и мелкого заложения позволяют обеспечивать нормативные требования безопасности нового строительства и строительства в условиях плотной городской застройки. Причем при разработке и засыпке грунтовых выемок для фундаментов мелкого заложения соблюдение требований технологических норм, особенно при засыпке, является трудоемким и длительным, что сказывается на выполнении требований безопасности.

4. В современных публикациях широко отображены конструктивные решения по выполнению строительно-монтажных работ по устройству фундаментов глубокого заложения. Устройство фундаментов мелкого заложения не нашло должного представления в научно-технической литературе.

Наиболее распространенные конструктивные методы защиты неглубоких земляных выемок от обрушения, отдельные из которых представлены на рисунке, рассматриваются авторами статьи как отправные для их совершенствования и разработки новых схем конструктивно-технологического применения.

Список литературы/ References

1. Birhane G.E., Yang L., Geng J., Zhu J. Causes of construction injuries: a review // *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*. 2020. Vol. 11. Iss. 1. P. 1-26. DOI: 10.1080/10803548.2020.1761678.
2. Romero Barriuso A., Villena Escribano B.M., Rodríguez Sáiz A. The importance of preventive training actions for the reduction of workplace accidents within the Spanish construction sector // *Safety Science*. 2021. Vol. 134. P. 105090. DOI: 10.1016/j.ssci.2020.105090.
3. Abukhashabah E., Summan A., Balkhyour M. Occupational accidents and injuries in construction industry in Jeddah city // *Saudi Journal of Biological Sciences*. 2020. Vol. 27. Iss. 8. P. 1993-1998. DOI: 10.1016/j.sjbs.2020.06.033.
4. Carrillo-Castrillo J.A., Trillo-Cabello A.F., Rubio-Romero J. Construction accidents: identification of the main associations between causes, mechanisms and stages of the construction process. 2017. Vol. 23. Iss. 2. P. 240-250. DOI: 10.1080/10803548.2016.1245507.
5. Adaku E., Ankra N.A., Ndekugri I.E. Design for occupational safety and health: A theoretical framework for organisational capability // *Safety Science*. 2021. Vol. 133. P. 105005. DOI: 10.1016/j.ssci.2020.105005.
6. Emre Gürçanlı G., Müngen U. An occupational safety risk analysis method at construction sites using fuzzy sets // *International Journal of Industrial Ergonomics*. 2009. Vol. 39. Iss. 2. P. 371-387. DOI: 10.1016/j.ergon.2008.10.006.
7. Martínez-Rojas M., Soto-Hidalgo J.M., Martínez-Aires M.D., Rubio-Romero J.C. An analysis of occupational accidents involving national and international construction workers in Spain using association rule technique // *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*. 2021. P. 1-37. DOI: 10.1080/10803548.2021.1901433.
8. Adetunji K., Razali Adul Hamid, Syamsul Hendra Bin Mahmud. Methods of Improving Reporting of Occupational Accidents in the Nigerian Construction Industry // *Asia Proc. Soc. Sci*. 2021. Vol. 7. Iss. 1. P. 1-4. DOI: 10.31580/apss.v.7i1.1715.

9. Dogan E., Yurdusev M.A., Yildizel S.A., Calis G. Investigation of scaffolding accident in a construction site: A case study analysis // *Engineering Failure Analysis*. 2021. Vol. 120. P. 105108. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2020.105108.
10. Keun Oh T., Jun Kwon Y., Oh B.H., Il Gwon Y., Yoon H. K. Suggestions for safety coordinator's roles at each construction stage (client, designer, supervisor, and contractor) to improve safety and health activities in South Korea // *Safety Science*. 2021. Vol. 133. P. 104994. DOI: 10.1016/j.ssci.2020.104994.
11. Bozzano F., Esposito C., Mazzanti P., Innocca F., Romeo S. Urban engineered slope collapsed in Rome on February 14th, 2018: Results from remote sensing monitoring // *Geosci*. 2020. Vol. 10. № 9. P. 331. DOI: 10.3390/geosciences 10090331.
12. Williams, O.S., Hamid, R.A., Misnan, M.S. Causes of building construction related accident in the south-western states of Nigeria // *International Journal of Built Environment and Sustainability*. 2019. Vol. 6. Iss. 1. P. 14-22. DOI: 10.11113/ijbes.v.6.n1.313.
13. Ivascu L., Sarfraz M., Mohsin M., Naseem S., Ozturk I. The Causes of Occupational Accidents and Injuries in Romanian Firms: An Application of the Johansen Cointegration and Granger Causality Test // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021. Vol. 18. Iss. 14. P. 7634. DOI: 10.3390/ijerph 18147634.
14. Jacazz S., De Matos Y.M.P., Monteiro F.F., Cunha R.P., Ruge J.C., Gassler G. Evaluation of analytical and numerical techniques to simulate curtain pile walls in a tropical soil of the federal district of Brazil // *Geotechnical Engineering*. 2020. Vol. 51. Iss. 2. P. 30-38.
15. Sakhapov R.L., Nikolaeva R.V., Gatiyatullin M.H., Makhmutov M. Risk management model in road transport systems // *Journal of Physics: Conference Series*. 2016. Vol. 738. Iss. 1. P. 012008. DOI: 10.1088/1742-6596/738/1/012008.
16. Sakhapov R.L., Nikolaeva R.V., Gatiyatullin M.H., Makhmutov M. Modeling the process of wheel drive slipping with anti-skid devices // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1391. P. 012117. DOI: 10.1088/1742-6596/1391/1/012117.
17. Sakhapov R.L., Nikolaeva R V., Gatiyatullin M.H., Makhmutov M. Modeling of traction-coupling properties of wheel propulsor // *Journal of Physics: Conference Series*. 2017. Vol. 936. Iss. 1. P. 012033. DOI: 10.1088/1742-6596/936/1/012033.
18. Sakhapov R.L., Nikolaeva R.V., Gatiyatullin M.H., Makhmutov M. Modeling the dynamics of the chassis of construction machines // *Journal of Physics: Conference Series*. 2016. Vol. 738. Iss. 1. P. 012119. DOI: 10.1088/1742-6596/738/1/012119.
19. Mirsayapov Ilizar T., Shakirov M.I. Bearing capacity and settlement of raft-pile foundations under cyclic loading // *Energy Geotechnics*. 2016. P. 423–428. DOI: 10.1201/b21938-67.
20. Mirsayapov Ilizar T., Shakirov M.I. Behavior models of plate-pile foundations under cyclic loading: Proceedings of the baltic piling days' conference: Baltic Piling Days, Estonian Geotechnical Society ISSMGE / Tallin, 2012. P. 31–34.
21. Кузнецов М.В., Маринченко Е.В., Пушкарев М.Д. Проектирование ограждения котлована жилого дома в условиях плотной городской застройки в г. Ростов-на-Дону // *Инженерный вестник Дона*. 2018. Вып. 2. С. 188. [Kuznecov M.V., Marinchenko E.V., Pushkarev M.D. Designing the fence of the foundation pit of a residential building in a dense urban development in Rostov-on-Don // *Inzhenernyj vestnik Dona*. 2018. Iss. 2. P. 188]
22. Трушко О.В., Кутявин Д.В. Устройство котлована в условиях сильнодеформируемых грунтов при строительстве многоэтажного бизнес-центра с учетом обеспечения устойчивости близстоящих зданий и сооружений // *Вестник Евразийской науки*. 2018. Т. 20. Вып. 1. С. 1-16. [Trushko O.V., Kutuyavin D.V. The construction of an excavation in highly deformable soils during the construction of a multistorey business center, taking into account the stability of adjacent buildings and structures // *Vestnik Evrazijskoj nauki*. 2018. Vol. 20. Iss. 1. P. 1-16.]
23. Деменков П.А., Трушко О.В., Комолов В.В. Прогноз оседания поверхности земли при сооружении котлована вблизи застройки // *Известия ТулГУ, Науки о Земле*. 2019. Вып. 2. С. 300–309. [Demenkov P.A., Trushko O.V., Komolov V.V. Prediction of

- land surface subsidence during the construction of the excavation near the building // Izvestiya TulGU, Nauki o Zemle. 2019. Vol. 2. P. 300-309.]
24. Кубецкий В.Л., Калеев Д.И. Влияние анкерного крепления бортов котлована на дополнительные деформации существующих зданий // Вестник МГСУ. 2012. Вып. 4. С. 246–251. [Kubeckij V.L., Kaleev D.I. The influence of anchoring the walls of the excavation on the additional deformations of existing buildings // Vestnik MGSU. 2012. Iss. 4. P. 246-251.]
25. Бугаева Т.Н. Особенности возведения зданий в условиях городской застройки // Вестник ПсковГУ. 2015. Вып. 1. С. 116–120. [Bugaeva T.N. Peculiarities of the erection of buildings in the conditions of urban development // Vestnik PskovGU. 2015. Iss. 1. P. 116-120.]
26. Копотилова А.С. Особенности строительства в условиях плотной городской застройки // Молодой ученый. 2017. Т. 183. Вып. 49. С. 59–61. [Kopotilova A.S. Features of construction in a dense urban development // Young Scientist. 2017. Vol. 183. Iss. 49. P. 59-61.]
27. Ильичев В.А., Знаменский В.В., Морозов Е.Б. Опыт устройства котлованов при возведении зданий и сооружений в стесненных условиях города Москвы // Вестник МГСУ. 2010, Вып. 4-2. С. 222–230. [Ilyichev V.A., Znamensky V.V., Morozov E.B. Experience of excavation in the construction of buildings and structures in the cramped conditions of Moscow // MSCU Bulletin. 2010, Issue. 4-2. P. 222-230.]

Информация об авторах

Хузиахметов Рустам Абдулганеевич, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: hroustam@mail.ru

Хузиахметова Карина Рустамовна, аспирант, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: karina261996@mail.ru

Расулев Фархад Резилович, инженер, ООО «Казанский Инженерный Проект», Казань, Российская Федерация

E-mail: sik96.96@mail.ru

Information about the authors

Rustam A. Khuziakhmetov, candidate of technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: hroustam@mail.ru

Karina R. Khuziakhmetova, post-graduate student, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: karina261996@mail.ru

Farkhad R. Rasulev, engineer, LTD «Kazan Engineering Project», Kazan, Russian Federation

Email: sik96.96@mail.ru



Архитектурное формирование рекреационно-оздоровительной среды в условиях Республики Татарстан

А.В. Коткова¹, Г.Н. Айдарова¹, А.М. Сулейманов¹

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. *Постановка задачи.* Тенденции развития физической активности динамично внедряются в общественную жизнь. Цель исследования – архитектурное формирование рекреационно-оздоровительной среды в условиях Республики Татарстан. Задачи включают: выявление понятийно-терминологического аппарата; определение факторов, влияющих на формирование рекреационно-оздоровительной среды, разработку функциональной и архитектурно-типологической модели рекреационно-оздоровительной среды в пригородной зоне Казани.

Результаты. Выявлены основные понятия, термины, связанные с рекреационно-оздоровительной средой, включающие: «маршруты здоровья», «оздоровительный туризм», «экологические тропы». Определены типы рекреационно-оздоровительных сред: открытые, закрытые и комплексные. Разработаны: четыре маршрута здоровья в пригородной зоне Казани; типологическая таблица объектов архитектурно-пространственного формирования рекреационно-оздоровительной среды открытого типа.

Выводы. Сформулированные принципы и выявленная типология объектов архитектурно-пространственного формирования рекреационно-оздоровительной среды, позволили создать экспериментальную модель маршрутов укрепления здоровья в пригородной зоне Казани. В условиях Татарстана богатые природные ландшафты могут быть использованы для архитектурного формирования круглогодичных маршрутов здоровья.

Ключевые слова: архитектурно-типологические принципы, рекреационно-оздоровительная среда, маршруты здоровья, экологическая тропа, функциональная архитектурно-планировочная модель.

Для цитирования: Коткова А.В., Айдарова Г.Н., Сулейманов А.М. Архитектурное формирование рекреационно-оздоровительной среды в условиях Республики Татарстан // Известия КГАСУ, 2023, № 3(65), с. 185-199, DOI: 10.52409/20731523_2023_3_185, EDN: PBKDAQ

Architectural formation of recreational and health-improving environment in the conditions of the Republic of Tatarstan

A.V. Kotkova¹, G.N. Aidarova¹, A.M. Suleymanov¹

¹Kazan State University of Architecture and Engineering,
Kazan, Russian Federation

Abstract. *Problem statement.* Trends in the development of physical activity are being dynamically introduced into public life. The purpose of the study is the architectural formation of the recreational and health-improving environment in the conditions of the Republic of Tatarstan. The main tasks include identification of the conceptual and terminological framework; determination of the factors influencing the formation of the recreational and health-improving environment, development of a functional and architectural-typological model of the recreational environment in the suburban area of Kazan.

Results. The basic concepts and terms related to the recreational and health-improving environment are identified including: "health routes", "health tourism", "ecological trails". Three types of recreational and health-improving environments are distinguished: open, closed and complex. Four health routes in the suburban area of Kazan and typological table of objects of architectural and spatial formation of recreational and health-improving environment of open type were developed.

Conclusions. The formulated principles and the revealed typology of objects of architectural and spatial formation of recreational and health-improving environment allowed creating an experimental model of health promotion routes in the suburban area of Kazan. Rich natural landscapes can be used for the architectural formation of year-round health routes in the conditions of Tatarstan.

Keywords: architectural and typological principles, recreational and health-improving environment, health routes, ecological path, functional architectural and planning model.

For citation: Kotkova A.V., Aidarova G.N., Suleymanov A.M. Architectural formation of recreational and health-improving environment in the conditions of the Republic of Tatarstan// News KSUAE, 2023, № 3(65), p. 185-199, DOI: 10.52409/20731523_2023_3_185, EDN: PBKDAQ

1. Введение

Современные условия жизни и труда человека истощают человеческий организм, что ведет к преждевременному старению и возникновению хронических и онкологических заболеваний [1,2]. Тенденция развития рекреационно-оздоровительной среды является одним из способов борьбы с массовой заболеваемостью, а также укреплением человеческого организма, путем повышения физической активности.

Часто понятия «спорт» и «физическая культура» объединяют, хотя каждое несет в себе различные функции и возрастные особенности. Идея сохранения здоровья в контексте природно-культурного баланса является неотъемлемой частью здорового образа жизни. Влияние природы вносит необходимое функциональное содержание в формирование рекреационно-оздоровительных сред. Влияние свежего воздуха – наличие кислорода, солнечных лучей благоприятно сказываются на процессе активного отдыха, что в совокупности дает организму максимально укреплять свое здоровье. На удовлетворение психолого-физиологической нормализации здоровья человека оказывает влияние комплекс рекреационной деятельности. В связи с этим очевидна потребность в ландшафтно-планировочной организации и использовании пригородных территорий.

Физическая культура берет свое начало в Древней Греции, когда жизненно важными качествами человека являлись сила, выносливость и ловкость. Развитие личности происходило не только на физическом уровне, но и на духовном. Врачи Аноксимер и Геродик одними из первых совершали попытки обоснования целебных свойств занятий физической активностью. Несмотря на развитие оздоровительных программ во всех странах, физическая культура, как термин, вошло в употребление только после Первой мировой войны. Первые прототипы открытых рекреационно-оздоровительных сооружений можно отнести к XVII-XIX векам, когда в связи с новыми научными открытиями складывалось особое отношение к физическому здоровью человека и важности его активной жизнедеятельности [3].

Важным на сегодняшний день остается оптимизация и модернизация рекреационно-оздоровительных сред для адаптации их под изменяющиеся требования и правила.

Понятийная терминология по теме исследования рассматривалась в трудах специалистов разного профиля.

И.В. Чернышева представляет физическую культуру как «воплощение в самом человеке результатов использования материальных и духовных ценностей, относящихся к физической культуре в ее широком смысле», и выделяет понятие «физическая культура» [4].

Сущность понятия «здоровье-сберегающего пространства» и его организация на примере качественных показателей представления детей о здоровом образе жизни на уровнях: микрорайона и города «...под здоровье-сберегающим пространством образовательной организации мы понимаем совокупность осознанных ресурсов, необходимых для поддержания здоровья детей с ОВЗ и достаточных для формирования у них сберегающего здоровье поведения при личной заинтересованности в ЗОЖ» раскрывается И.М. Новиковой в своей работе [5].

В некоторых исследованиях авторы выделяют принципы формирования ландшафтного комплекса: сохранение существующих природных комплексов и благоустройство территорий, деятельность по обеспечению их эстетичности, доступности, безопасности и приспособленности к использованию в соответствии с функциональным назначением, - с учетом интересов городской общественности, интересов посетителей, потенциальных арендаторов, эффективности использования территории, - на основе сохранения существующих природных комплексов. Концептуальная модель предложена по классификации: возрастной состав отдыхающих, сезонность эксплуатации, вместимость [6].

А.Б.Ажибек и А.Ж.Абилов в своих трудах приводят принципы и закономерности формирования рекреационных систем в крупных городах, а также рассматривают виды туризма, в качестве увеличения туристического потока и развития территорий: спортивный с подразделением его на профессиональный и любительский; экологический туризм, направленный на изучение окружающей природной среды [7].

Исходя из географической логики формирования лечебно-оздоровительной трассы А.Н. Дунец и О.С. Акимов, выделяют простые типы маршрутов для применения их в пространстве: оседлый маршрут; кольцевой, который может включать радиальные и петлевые выходы; линейный с возможными радиальными или петлевыми выходами [8].

Сформулированные рекомендации для формирования рекреационных сред, с учетом природных и историко-культурных образований: создание опорных центров с ведущей функцией, формирование туристического коридора регионального значения, улучшение транспортной доступности опорных центров описаны в статье [9].

В своей статье Т.А.Бурменко анализирует терминологию «медицинский туризм», «туризм», «лечебный туризм», «велнес-туризм», «спа», «рекреационный туризм», «лечебно-оздоровительный туризм», и выявляет схожесть между понятиями по типу целей – отдых, оздоровление. Отмечает отсутствие определений, характеризующих оздоровительный туризм в законодательстве РФ. Автор статьи поднимает вопрос о необходимости разделения терминов: лечебный, медицинский и оздоровительный туризм, велнес- и спа-туризм [10].

В статье [11] выявляются основные цели создания экотроп: эко-просветительские, природоохранные. Указывают необходимость соблюдения критерий: привлекательность, доступность и информативность. На примере национальных парков Республики Бурятия рассматривают развитие системы экотроп. Авторами выявлен учет большого количества показателей. Набор показателей может претерпевать изменения, в зависимости от конкретных условий природной среды.

Статья [12] посвящена экологическим тропам и развитию эколого-просветительскому туризму. Автор рассматривает Усть-Качкинскую курортно-рекреационную зону, выявляет в ней восемь экологических троп, которые объединяются в три экологических маршрута. Анализ маршрутов привел к необходимости применения благоустройства зон, с целью создания комфортной среды для отдыхающих, с учетом лесохозяйственных интересов.

Закирова Ю.А., Дембич А.А., Хуснутдинова С.Р. изучают вопрос формирования полицентричной структуры города Казань в сложившихся границах административных районов города. В [13] выявляются возможности и ограничения развития административных районов. Рассматриваются функции отдыха и рекреации, кемпингов, организация туристских слетов, с целью решения проблемы запущенности общественных зеленых пространств.

Проблема формирования архитектурно-ландшафтной среды на рельефе рассмотрена [14]. Авторы уделяют большое внимание вопросам здоровья нации,

пропаганды здорового образа жизни. Авторы отмечают необходимость создания многопрофильных оздоровительных сооружений, направленных на повышение качества жизни населения. Предлагают разработку методики «предпроектных исследований исходной территории участка с геопластикой рельефа, обеспечивающей эстетические качества и комфортность проектируемой среды».

Andrew L. Dannenberg и Heather Burpee отмечают влияние аспектов архитектурных пространств на здоровье человека, вопросы решения проблем экологии, безопасности. Рассматривают контакт с природой как целый ряд преимуществ, который заключается в благоприятном воздействии на организм [15].

Рекомендации формирования и использования концептуальной модели функционального зонирования представлены в [16]. Для разработки модели авторы используют наработки древнего градостроительства и рассматривают влияние на них таких проблем общества как: религиозных, политических, социально-экономических.

Следует отметить, что в рассмотренных трудах основной уклон делается на различные виды экотуризма, лечебно-оздоровительного туризма, историко-культурного туризма, а также спортивно-оздоровительным рекреациям, при этом меньше внимания уделено архитектурному формированию рекреационно-оздоровительных пространств в природной среде.

Цель исследования - архитектурное формирование рекреационно-оздоровительной среды в условиях Республики Татарстан. Задачи включают: выявление понятийно-терминологического аппарата; определение факторов, влияющих на формирование рекреационно-оздоровительной среды; разработку функциональной и архитектурно-типологической модели рекреационно-оздоровительной среды в пригороде Казани.

2. Материалы и методы

Методика исследования основана на анализе литературных источников, графических и проектных материалов. При исследовании применен комплексный подход, включающий общенаучные (классификация, систематизация, наблюдения) и специальные (архитектурно-типологический, архитектурно-градостроительный, функциональный) методы исследования. Метод классификации, систематизации применен при изучении литературных источников для выявления понятийно-терминологического аппарата, выявления принципов формирования и опыта проектирования рекреационно-оздоровительной среды. При разработке модели рекреационно-оздоровительной среды применены методы архитектурно-градостроительного, типологического, функционального анализа, метод моделирования, а также метод натурного анализа при выборе и изучении ландшафтной среды для разработки экспериментальных маршрутов здоровья.

При исследовании функциональной оснащенности 28-ми существующих троп здоровья, занесенных в «реестр здоровья Российской Федерации», разработке архитектурно-типологической модели формирования маршрутов здоровья в рекреационно-ландшафтной среде и модели 4-х маршрутов здоровья в окрестности Казани применены табличный и графический методы анализа.

3. Результаты и обсуждение

В результате решения поставленных задач в данном исследовании выявлен понятийно-терминологический аппарат.

Двигательная или физическая рекреация — это отдых, восстановление физических и психических сил человека после выполнения различных видов деятельности (трудовой, учебной, бытовой, спортивной, научной, творческой) с помощью средств физической культуры и спорта [17];

Рекреационное пространство — часть социального пространства, используемая для рекреационной деятельности. Это может быть природный объект (лес, парк, морское побережье и т. д.), спортивное сооружение (бассейн, фитнес-зал), relax-зона на производстве и т. д. [18].

«Оздоровительный туризм» - рассматривается как схожесть оздоровительного и рекреационного туризма.

Выявлены факторы, влияющие на формирование рекреационно-оздоровительной среды: *природные факторы* (климат, рельеф, ландшафт), *историко-культурные* (культурные традиции, памятные исторические места и др.), социальные (возрастные и другие предпочтения, а также возможности).

Выявлены типы рекреационно-оздоровительных центров: *открытые, закрытые и комплексные*. На данном этапе исследования в данной статье рассматриваются и изучаются открытые рекреационно-оздоровительные пространства. Такие среды обычно предназначены для отдыха и релаксации, а также могут быть использованы для занятий физической культурой, проведения культурных мероприятий и других видов активности.

К открытому типу относятся спортивно-оздоровительные площадки на свежем воздухе. Положительная динамика развития физической активности в обществе ведет к строительству сооружений открытого типа для массовых занятий оздоровительной физкультурой. Чаще всего они представлены в виде теннисных кортов, футбольных полей, волейбольных и баскетбольных площадок. Однако, изучение опыта проектирования показало, что открытые площадки претерпели трансформацию и получили расширенное использование. Начинают появляться зоны для проведения йоги, цигун, пилатеса под открытым небом. К открытым типам рекреационно-оздоровительной среды (РОС) как разновидность маршрутов здоровья можно отнести эко-тропы. Также к открытому типу можно отнести маршруты для проведения пеших прогулок, которые имеют сходство с такой методикой оздоровления как – терренкур. В настоящее время существующие архитектурно-пространственные сооружения открытого типа требуют нового функционального наполнения и архитектурно-пространственной модернизации.

Рекреационно-оздоровительная среда (РОС) – это место, которое предназначено для отдыха, восстановления сил и здоровья человека. Включает в себя различные элементы, такие как пляжи, парки, спортивные комплексы, бассейны, спа-центры и т.д. РОС среда классифицируется по различным критериям: 1. По типу местности (городская, сельская, природная); 2. По типу активности (оздоровительная, развлекательная, культурная); 3. По доступности (для всех, для инвалидов, только для местных жителей); 4. По времени использования (круглогодичная, сезонная, временная); 5. По размеру (большая, средняя, малая); 6. По уровню комфорта (комфортная, средней комфортности, вызывающая дискомфорт).

Экологическая тропа – это обустроенный, чаще пешеходный маршрут, охватывающий различные биоценозы, ландшафты и места, представляющие культурно-историческую ценность, на котором посетители получают информацию об окружающем мире. Основной задачей является укрепление жизненно необходимых двигательных процессов, а также улучшение психически-эмоциональное состояние. Экологические тропы классифицируются по категориям: формирование конфигурации, трудность прохождения. Экологические тропы- маршруты здоровья разделяют по назначению: познавательного-прогулочные, познавательного-туристические и учебные экологические тропы [19].

Выявлен опыт лечебно-укрепляющего назначения экологических троп в зарубежной практике. Создание тропы закаливания на Рейне в Швейцарии основано на пяти основополагающих методах лечения немецкого священника Себастьян Кнейпп (нем. Sebastian Kneipp) (1821-1897), включающих различные стимулирующие эффекты, в том числе водные процедуры, хождение по снегу и др. На пути имеется возможность посетить «Парк уединения» с игровой площадкой и большим шалашом. Тропа предлагает увидеть красивую часть города Базель, «...воспользоваться ванночкой для рук в Брунне, ... Также по пути можно посетить музей Тингели и Швейцарский музей бумаги» [20].

Мангровая тропа в Индонезии расположена среди уникальных мангровых лесов. Она создана в 2003 году и составляет около 2 км. На всем протяжении тропа представляет из себя деревянные конструкции приподнятые над уровнем воды на 1-1,5 метра. Тропа оснащена информационными стендами, хижинами, лавочками для отдыха, площадкой для наблюдения за птицами, лодочными причалами [21].

Природная тропа закаливания в Блитцингене считается одной из самых длинных троп, основанных на методе водолечения С. Кнейпа. Продолжительность прохождения

составляет 2-4 часа и подходит для разных возрастных категорий. Посетителям предлагают пройти по холодным горным ручьям, попрактиковаться в распиливании бревен и узнать о лечебных свойствах природы. Есть несколько мест, где можно охладиться, например, в водоеме или в тени деревьев; найти скамейки и места для отдыха [22].

Тропы здоровья перспективно развиваются в Швейцарии. Насчитывается около 19 основных оздоровительных маршрутов, которые проходят не только по суше, но и по воде. Основаны они также на методе С. Кнейпа – гидротерапии (лечение водой). На сегодняшний день его метод модернизировался и активно используется в санаториях и клиниках. На своем примере автор доказал, что вода способна оказать положительное влияние на организм, при правильном применении [23].

Тропа Гелькберри, расположенная в Блэксбурге, штат Вирджиния, обладает зеленой инфраструктурой, которая является важным аспектом благополучия и здоровья человека. Тропа составляет почти 24.14 км и соединяет города Блэксбург и Кристианбург, уровень сложности - умеренный. На всем протяжении тропы имеет асфальтовое покрытие, используется не только для пеших прогулок, но и для велосипедных. Тропа состоит из трех частей – основной, южной и северной. Первый участок тропы Гелькберри (13.36 км) начинается в библиотеке, огибает кампус института Вирджинии и заканчивается в Кристиансбурге – центре отдыха. Северная тропа берет начало на кольцевой развязке на западе и заканчивается в парке Наследия – расстояние 8 км. Южная составляет 2.78 км и проходит через жилые кварталы [24].

Пример эко-тропы, сформированной Кемерским болотом – эко-тропа в национальном парке в Риге. Удивительные локации находятся на местном болоте, которое функционально оборудовано для треккинга. Посетителям предлагается два маршрута: малый круг, который составляет 1,4 км и большой – 3,4 км. Преодолей выбранный путь, участникам предоставляется возможность побывать на смотровой вышке с видом на пейзажи болота [25].

В отечественной практике есть ряд примеров организации эко-троп. Примером круглогодичной эко-тропы является эко-тропа «Красная поляна» в городе Сочи, протяженностью в пределах 1,7-19 км. Прохождение маршрута подойдет не для всех. Для преодоления пути понадобится не только физическая подготовка, но и специальная обувь. На протяжении всего пути посетителей сопровождают информационные указатели, а также на определенных участках можно остановиться и посидеть на лавочках или в беседках. Данная тропа рассчитана на прохождение не только в летнее, но и в зимнее время [26].

В рамках понятий «маршруты здоровья» и «тропы здоровья» рассматривается «лечебно-оздоровительный туризм» направленный на лечебно-профилактические цели и «оздоровительный туризм», который направлен на удовлетворение социальных и духовных потребностей. В основе этих понятий лежит забота жизненной ценности – здоровье.

Примером многофункционального транспортно-пешеходного маршрута здоровья является «Псковская кольцевая тропа» в Пскове, маршрут которой составляет 170 км. Предназначена для прохода не только в качестве пешехода, но и автомобилиста или велосипедиста. На преодоление всего кольца понадобится в среднем 6-8 дней. По пути можно остановиться на стоянках, где располагаются отели, кафе и магазины, различные достопримечательности данной местности. Также есть возможность пройтись среди леса, пересечь водоемы и посетить источники с питьевой водой [27].

В качестве примера внедрения троп здоровья в Республике Татарстан рассмотрен проект маршрута здоровья в Рыбно-Слободском муниципальном районе. Протяженность составляет 6,9 км и простирается через парки, лесопарки, городские улицы и набережные. Маршруту присвоены 3 категории сложности, где 25% составляют ровную поверхность земли, а 75% - подъем. На пути можно остановиться на спортивных площадках, устроить перевал в местах отдыха, посетить места с достопримечательностями. Также есть пункты для питья, медицинской помощи, общественный санузел.

В результате исследования теоретических, проектных и натуральных материалов с последующей корреляцией, можно заключить, что понятия «оздоровительный туризм» «маршруты здоровья», «экологическая тропа», имеют как общие признаки, так и отличия. В частности, маршруты здоровья могут включать кроме пешеходных и другие виды передвижения (велосипедный, автомобильный и автобусный); кроме оздоровительно-туристических могут включаться культурно-познавательные, культурно-образовательные и спортивные программы. Экологическая тропа включает только пешеходно-оздоровительные виды передвижения и может быть частью маршрута здоровья.

Таким образом, структура маршрута здоровья может включать: оздоровительный туризм, культурно-познавательный туризм, экологические тропы. Выявлены принципы организации маршрутов здоровья в рекреационно-ландшафтной среде:

1) Доступность для людей любого возраста и физической подготовки; 2) Возможность пройти самостоятельно, либо с инструктором; 3) Выбор протяженности маршрута; 4) Насыщенность природного ландшафта; 5) Оборудованность информационными стендами; 6) Организация оздоровительного квеста по маршрутам для взрослых и детей; 7) Оборудованные пункты остановочных перевалов (торговые и развлекательные павильоны, медицинские пункты, мини-отели, парковки; 8) Безопасность маршрута.

Лигой здоровья нации Общероссийского конгресса муниципальных образований ОКМО разработан проект «Каждому муниципалитету – маршрут здоровья». Проект направлен на развитие и поддержку функционирования активной жизни населения. Для маршрутов здоровья организована паспортизация, которая учитывает обеспечение необходимой инфраструктуры и соответствие требованиям к проектированию [28].

Для анализа функциональной оснащённости было рассмотрено 28 существующих маршрутов здоровья, занесенных в реестр Российской Федерации. В Республике Татарстан включены в реестр маршруты здоровья: Рыбно-Слободский муниципальный район, Нижнекамский муниципальный район, г. Казань, Атнинский муниципальный район. В других областях вошли в реестр маршруты здоровья: «Сокол» Алтайский МР; Архангельская область, г. Архангельск; Большой камень, Приморский край; Дальнегорский ГО, Приморский край; Абинское ГП, Краснодарский край; г. Искитим, Новосибирская область; Приобье, Ханты-Мансийский АО; Соликамский ГО, Пермский край; Ольгинский ГО, Магаданская область; Уинский МО, Пермский край; Шуя, Ивановская область; Южно-Сахалинск 2, Сахалинская область; г. Нефтекамск, Республика Башкортостан; Новокуйбышевск, Самарская область; Новоселовский район, Красноярский край; Обнинск, Калужская область; Родниковский район, Ивановская область; Ростов-на-Дону 1, Ростовская область; Рубцовск, Алтайский край; Сергиев Посад, Московская область; г. Сочи, Лазаревское; Старый Оскол, Белгородская область; Торжок, Тверская область; Тутаев, Левый берег, Ярославская область.

На основе данных из реестра маршрутов здоровья РФ были выявлены следующие функциональные параметры (Рис. 1):

- Установленная навигация по всему маршруту;
- Спортивные площадки по ходу маршрута;
- Водные объекты по ходу маршрута;
- Места отдыха;
- Помещения для функциональной диагностики;
- Наличие достопримечательностей;
- Пункты для питья;
- Пункты медицинской помощи;
- Санузлы;
- Информационные стенды;
- Наличие центров оздоровления;
- Конфигурация маршрута: кольцевой, линейный;
- Категория сложности: 1-3.

	Установленная навигация по всему маршруту	Спортивные площадки по ходу маршрута	Водные объекты по ходу маршрута	Места отдыха	Помещения для функц. диагностики	Наличие достопримечательностей	Пункты для питья	Пункты медицинской помощи	Санузлы	Информационные стенды	Наличие центров оздоровления	Конфигурация маршрута		Категория сложности		
												Кольцевой	Линейный	1	2	3
РТ, Рыбно-Слободский муниципальный район	нст	да	да	да	да	да	да	да	да	да	да	Кольцевой	Линейный	1	2	3
РТ, Нижнекамский муниципальный район	да	да	нст	да	да	да	да	да	да	да	да	Кольцевой	Линейный	1	2	3
РТ, Казань	нст	да	да	да	нст	да	нст	да	да	да	да	Кольцевой	Линейный	1	2	3
РТ, Атинский муниципальный район	нст	нст	да	да	нст	да	нст	да	да	да	да	Кольцевой	Линейный	1	2	3
«Сокол» Алтайский МР	да	да	да	да	нст	да	да	да	да	да	да	Кольцевой	Линейный	1	2	3
Архангельская область г. Архангельск	нст	да	да	да	да	да	да	да	да	да	да	Кольцевой	Линейный	1	2	3
Большой камень Приморский край	нст	нст	да	да	нст	да	да	да	да	да	да	Кольцевой	Линейный	1	2	3
Дальнегорский ГО Приморский край	нст	да	да	да	да	да	да	да	да	да	да	Кольцевой	Линейный	1	2	3
Абинское ГП Краснодарский край	нст	да	да	да	нст	да	нст	да	да	да	да	Кольцевой	Линейный	1	2	3
г. Искитим Новосибирская обл.	да	да	да	да	да	да	да	да	да	да	да	Кольцевой	Линейный	1	2	3
Приобье Ханты-Мансийский АО	да	да	да	да	да	да	да	да	да	да	да	Кольцевой	Линейный	1	2	3
Соликамский ГО Пермский край	нст	да	да	да	да	да	да	да	да	да	да	Кольцевой	Линейный	1	2	3
Ольский ГО Магаданская область	нст	да	да	да	да	да	да	да	да	да	да	Кольцевой	Линейный	1	2	3
Уинский МО Пермский край	нст	да	да	да	да	да	да	да	да	да	да	Кольцевой	Линейный	1	2	3
Шуя Ивановская область	нст	нст	да	да	да	да	нст	да	да	да	да	Кольцевой	Линейный	1	2	3
Южно-Сахалинск 2 Сахалинская область	нст	да	да	да	да	да	да	да	да	да	да	Кольцевой	Линейный	1	2	3
Нефтекамск Респуб. Башкортостан	да	да	да	да	да	да	да	да	да	да	да	Кольцевой	Линейный	1	2	3
Новокуйбышевск Самарская область	нст	да	да	да	да	да	да	да	да	да	да	Кольцевой	Линейный	1	2	3
Новоселовский район Красноярский край	нст	да	да	да	да	да	да	да	да	да	да	Кольцевой	Линейный	1	2	3
Обнинск Калужская область	нст	да	нст	да	да	да	да	да	да	да	да	Кольцевой	Линейный	1	2	3
Родниковский район Ивановская область	нст	да	да	да	да	да	да	да	да	да	да	Кольцевой	Линейный	1	2	3
Ростов-на-Дону 1 Ростовская область	нст	да	да	да	да	да	да	да	да	да	да	Кольцевой	Линейный	1	2	3
Рубцовск Алтайский край	да	да	да	да	да	да	да	да	да	да	да	Кольцевой	Линейный	1	2	3
Сергиев Посад Московская область	нст	да	да	да	да	да	да	да	да	да	да	Кольцевой	Линейный	1	2	3
Сочи Лазаревское	да	да	да	да	да	да	да	да	да	да	да	Кольцевой	Линейный	1	2	3
Старый Оскол Белгородская область	нст	да	да	да	да	да	да	да	да	да	да	Кольцевой	Линейный	1	2	3
Торжок Тверская область	нст	да	да	да	да	да	да	да	да	да	да	Кольцевой	Линейный	1	2	3
Тутаев Левый берег Ярославская область	нст	да	да	да	да	да	да	да	да	да	да	Кольцевой	Линейный	1	2	3

Рис.1. Анализ функциональной оснащённости 28 существующих троп здоровья, занесенных в реестр здоровья Российской Федерации (иллюстрация авторов)
 Fig.1. Analysis of the equipment of 28 existing health trails listed in the Health Register of the Russian Federation (illustration by the authors)

Данные тропы здоровья подлежат освоению и развитию. Выявлены как их положительные, так и отрицательные стороны. К положительным аспектам существующих маршрутов следует отнести высокие показатели: спортивные площадки по ходу маршрута – 89%; водные объекты по ходу маршрута – 92%; места отдыха – 92%; наличие достопримечательностей – 96%; пункты для питья – 71%; санузлы – 96%.

К отрицательным: установлена недостаточная навигация по всему маршруту (25%); недостаточность помещений для функциональной диагностики оборудования (54%); недостаточность пунктов медицинской помощи (53%); недостаточность информационных установок (32%); недостаточность оздоровительных функций (39%). Также выявлено полное отсутствие специальных эко-оздоровительных и эко-закаливающих троп («босых троп») с различными видами оздоровительного покрытия.

Исходя из проведенного анализа, на основе таблицы был выявлен высокий процент линейной конфигурации маршрута (86%), кольцевой формируется реже и составляет 14%, часто применяемые категории сложности – 1-я (86%), – 2-я (14%). Третья категория сложности в рассматриваемых тропах не используется.

Выявлено отсутствие *обеспеченности маршрутных связей*, которые образуют «маршрут здоровья», что могло бы облегчить посещение «троп здоровья» для посетителей с ограниченными возможностями, а также для людей с маленькими детьми. Требуется оснастить информационными стендами все участки маршрута и обеспечить безопасность мероприятий. *Время прохождения* направлено на удовлетворение желаний людей с возможностью остановок, ночлегах в мини-отелях, благодаря чему обеспечивается непрерывность прохождения маршрута. *Требуется обеспечить круглогодичность* функционирования маршрутов здоровья, что будет являться положительным фактором, так как посетители смогут ознакомиться с оздоровительными мероприятиями как зимой, так и летом. *Наличие экскурсоводов* на разных участках маршрута позволит не только отдохнуть, провести время, уделив внимание своему организму, но и узнать информацию о данном месте.

С целью апробации аналитической модели проведено натурное исследование рекреационной территории в окрестностях Казани. Определены 6 основных точек маршрута здоровья для организации троп здоровья (Рис.2). Началом маршрута определено озеро Лебяжье в Кировском районе, которое находится близ озера Глубокое, выбранное в качестве второй точки. Изумрудное озеро рассматривается третьей точкой маршрута. Озеро Осиново определено четвертым пунктом и предусматривает максимальное освоение территории. За пятую и шестую - взяты «Местечко Раифа» и «Голубое озеро», соответственно.

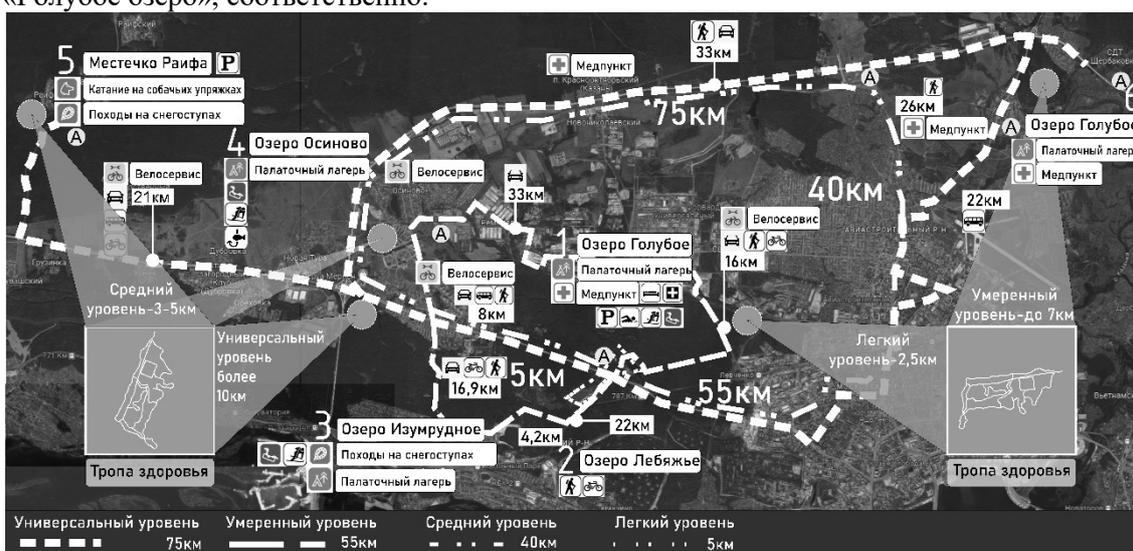


Рис.2. Модель формирования 4-х маршрутов здоровья в окрестности Казани (иллюстрация авторов)

Fig.2. Model of formation of 4 health routes in the vicinity of Kazan (illustration by the authors)

Данная территория, как рекреационная среда для организации «маршрута здоровья» требует оценки факторов, выявления природного потенциала, анализа рекреационных потребностей населения, дифференцированных по социальным, гендерным и возрастным группам.

В качестве рабочего варианта понятия (РОС) - можно допускать, что оно включает такие составляющие как: природные *обеспечения высокого качества оздоровительного пребывания в природном окружении*. Определены два вида маршрутного движения по местам рекреационно-оздоровительной среды: 1) *активный индивидуальный*; 2) *активный групповой*.

Исследование предполагает объединение отдаленных точек маршрута, каждая из которых является достопримечательным местом с благоустроенной территорией. Пункты с разной направленностью оздоровительных программ, а именно прохождение маршрутов здоровья, будут привлекать внимание жителей и гостей Республики Татарстан.

Маршруты рассчитаны на любую возрастную категорию. Семьи, друзья и другие группы людей совершают путешествия с выбором плана маршрута. Весь маршрут и точки перевалов оснащены и оборудованы необходимыми объектами безопасности, с возможностью устройства ночлега, пунктом питания и другими условиями комфорта.

Каждый вид подразумевает такие способы передвижения как: ходьба, бег, велосипедное движение, самокаты, ролики – в летнее время, а в зимнее возможное передвижение на лыжах или санях (в специально оборудованных участках маршрута). Для преодоления протяженных маршрутов, например, «местечко Раифа» и «Голубое озеро», предусматривается использование туристических автобусов между удаленными точками тропы. Автобусы будут использоваться в качестве вспомогательного транспорта для людей, желающих посетить отдаленные пункты тропы. При прибытии на местность, посетители смогут продолжить свой маршрут в следующей точке тропы здоровья.

Удобство достигается с помощью предложенных вариантов маршрута, которые создаются путем образования путей разной протяженности, с соблюдением условий безопасности. Каждый участок маршрута, вне зависимости от километража, прокладывается с учетом особо привлекательных природных объектов.

Создание безопасного маршрута требует обеспеченности оборудованием «маршрута здоровья», который зависит от уровня сложности. Составлена функционально-типологическая модель архитектурного формирования маршрутов здоровья в рекреационно-ландшафтной среде (Рис. 3). Определено 4 класса маршрута по уровням:

- 1 класс – легкий, протяженностью до 2,5 км;
- 2 класс – средний, протяженностью 3-5 км;
- 3 класс – умеренный, протяженностью до 7 км;
- 4 класс – сложный, протяженностью более 10 км.

По способам прохождения:

- Пешее движение;
- Велосипедное;
- Передвижение на лыжах;
- Использование автобусных путей;
- Передвижение на личном автотранспорте.

Класс маршрута	1 класс	2 класс	3 класс	4 класс
Уровень	Легкий	Средний	Умеренный	Сложный (универс.)
Протяженность	до 2,5 км	3-5 км	до 7 км	более 10 км
Способы прохода				
Опорные ориентиры	точечные 	линейные 	площадные 	площадные
Босые тропы				
Информационные будки				
Указатели				
Скрипип-облед. (каб. здоровья)				
Площадки для физ. упражнений				
Виды сезонных оздоровительных мероприятий				
Места отдыха				
Достопримечательности				
Пункты проката				
Ночлег				
Наличие главного центра	не требуется	+	+	+
Пункты для питья	+	+	+	+
Обществ. сапузлы	+	+	+	+
Покрытие маршрута	преим. асфальт	преим. асфальт	преим. грунт	смешанный
Пункты питания				

Рис.3. Функционально-типологическая модель архитектурного формирования маршрутов здоровья в рекреационно-ландшафтной среде (иллюстрация авторов)
 Fig.3. Functional and typological model of architectural formation of health routes in a recreational landscape environment (illustration by the authors)

При разработке экспериментальной архитектурно-пространственной модели маршрутов здоровья с включением экологических троп были учтены сезонные принципы. На их основе предложены варианты летнего и зимнего функционирования.

Расширенная программа оздоровления, включающая в себя: катание на велосипедах, роликах, открытые занятия йогой и цигун на оборудованных площадках, массовые оздоровительные занятия физической культурой, суставная гимнастика с музыкальным сопровождением, «босые тропы» на основе оздоровительного влияния различных видов природных покрытий – вода, мелкий камень, песок, грунт, плавание, применение солнечных ванн и др. Такие виды отдыха, как рыбалка станут доступными в специально оборудованных водоемах.

Благодаря климатическим особенностям у посетителей троп здоровья есть возможность попробовать зимние виды оздоровительных программ: прогулки на лыжах, катание на собачьих упряжках; обливание (закаливание), зимнее купание, «босая зимняя тропа», зимняя дыхательная гимнастика. Известный в России метод Порфирия Иванова, основанный на лечении холодом, в условиях маршрутов здоровья приобретает новую актуальность. При этом наличие теплых раздевалок, душевых, пунктов питания и мини-отелей является важным условием для комфортного оздоровительного отдыха зимой. В качестве оборудования зимних типов рекреационно-оздоровительных сред могут использоваться: для лыжных путей- специальное снежное покрытие; для санок и снегоходов – использование специальных трасс, которые будут обеспечивать безопасность при катании.

При архитектурно-пространственном формировании маршрутов здоровья, включающих тропы здоровья, необходимо учитывать: экологичность, функциональность, эстетичность, экономичность, а также инновационность - постоянное обновление и модернизация, с целью соответствия современным требованиям и тенденциям. Для оборудования маршрутов здоровья архитектурными объектами круглогодичного использования можно применять различные, преимущественно натуральные материалы и конструкции, специальные виды оздоровительных покрытий для площадок и троп здоровья

Новизна разработанной функциональной и архитектурно-типологической модели заключается в круглогодичном использовании рекреационно-оздоровительных комплексов открытого типа соответствующей типологией архитектурных объектов. Предлагаемая модель РОС в виде маршрутов здоровья направлена на организацию семейных оздоровительных мероприятий и совместного проведения досуга, благодаря чему решаются проблемы экологического равновесия и выбора альтернативных видов отдыха с оздоровительными функциями.

4. Заключение

1. Выявлены понятия: *рекреационно-оздоровительная среда (РОС), оздоровительный туризм, маршруты здоровья, экологическая тропа.*

2. Выявлены факторы, влияющие на формирование рекреационно-оздоровительной среды: *природные, историко-культурные, социальные.*

3. Выявлены типы рекреационно-оздоровительных центров: *открытые, закрытые, комплексные.*

4. Выявлены принципы организации рекреационно-оздоровительной среды.

5. Произведен анализ функциональной оснащенности 28-ми существующих троп здоровья, занесенных в реестр здоровья Российской Федерации.

6. Проанализированы универсальные типы архитектурно-пространственного формирования «маршрута здоровья».

7. Разработана универсальная функциональная модель рекреационно-оздоровительной среды, апробированная в условиях пригорода Казани: предложено 4 класса маршрутов здоровья.

Список литературы / References

1. Tomatis L. How much of the human disease burden is attributable to environmental chemicals? *Toxicol Lett.* 1995 May;77(1-3):1-8. DOI: 10.1016/0378-4274(95)03264-9. PMID: 7618122.

2. Thomas Götschi, Tracy Hadden Loh. Advancing project-scale health impact modeling for active transportation: A user survey and health impact calculation of 14 US trails. *Journal of Transport & Health*. 2017. Pages 334-347. DOI: 10.1016/j.jth.2017.01.005
3. М.А. Соломченко, Т.А. Пеленицина. История физической культуры и спорта. Орел: ФГБОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК», 2012. – 84 с. [M.A. Solomchenko, T.A. Pelenitsina. History of physical culture and sports. Orel: FGBOU VPO "Gosuniversitet-UNPK", 2012. – 84 p.]
4. Чернышева И.В., Шлемова М.В., Егорычева Е.В., Мусина С.В. Роль физической культуры в воспитании всесторонне развитой личности // Известия ВолгГТУ. Серия «Новые образовательные системы и технологии обучения в вузе». Вып. 12: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. Волгоград, 2014. № 15 (142). С. 63-65. [Chernysheva I.V. Shlemova M.V., Egorycheva E.V., Musina S.V. The role of physical culture in the education of a comprehensively developed personality // Izvestiya VolgSTU. The series "New educational systems and technologies of higher education". Issue 12: mezhvuz. sat. scientific. art. / VolgSTU. Volgograd, 2014. No. 15 (142). P. 63-65.]
5. Новикова Ирина Маратовна Здоровьесберегающее пространство: структура и опыт организации // Наука о человеке: гуманитарные исследования. 2015. №4 (22). [Novikova Irina Maratovna Health-saving space: structure and experience of the organization // Science of man: humanitarian studies. 2015. №4 (22).]
6. Кругляк В.В., Гурьева Е.И. Принципы формирования ландшафтного тематического комплекса в Центральном Черноземье // Лесной вестник / ForestryBulletin, 2022. Т. 26. № 2. С. 59-68. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-2-59-68. [Kruglyak V.V., Guryeva E.I. Principles of the formation of a landscape thematic complex in the Central Chernozem region // Forest Bulletin / Forestry Bulletin, 2022. Vol. 26. No. 2. P. 59-68. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-2-59-68.]
7. Ажибек Акерке Боранбайкызы, Абилов Алексей Жаилханович Принципы архитектурно-планировочной организации массового отдыха и туризма в пригородных зонах крупных городов // Наука и образование сегодня. 2019. №11 (46). [Azhibek Akerke Boranbaykyzy, Abilov Alexey Zhailkhanovich Principles of architectural and planning organization of mass recreation and tourism in suburban areas of large cities // Science and Education today. 2019. №11 (46).]
8. Дунец А.Н., Акимов О.С. Маршруты лечебно-оздоровительного туризма в пространственной структуре курортных территорий Алтайского края // Современные проблемы сервиса и туризма. 2021. Т.15. №1. С. 81-92. DOI: 10.24412/1995-0411-2021-1-81-92. [Dunets A.N., Akimov O.S. Routes of medical and health tourism in the spatial structure of the resort territories of the Altai Territory // Modern problems of service and tourism. 2021. Vol.15. No. 1. P. 81-92. DOI: 10.24412/1995-0411-2021-1-81-92.]
9. Ладик Е.И., Перькова М.В. Принципы и методы архитектурно-планировочной организации рекреационных территорий с учетом региональных особенностей Белгородской области // Вестник БГТУ имени В. Г. Шухова. 2017. №7. DOI: 10.12737/article_5940f0187760c0.79965719. [Ladik E.I., Perkova M.V. Principles and methods of architectural and planning organization of recreational territories taking into account regional peculiarities of the Belgorod region // Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov. 2017. №7. DOI: 10.12737/article_5940f0187760c0.79965719.]
10. Бурменко Т. А. К вопросу о содержании понятия «оздоровительный туризм» / Т. А. Бурменко // Известия Иркутской государственной экономической академии. — 2016. — № 1. — С. 42-49. — DOI: 10.17150/1993-3541.2016.26(1).42-49. [Burmenko T. A. On the subject of the health tourism concept. Izvestiya Irkutskoy gosudarstvennoy ekonomicheskoy akademii = Izvestiya of Irkutsk State Economics Academy, 2016, vol. 26, no. 1, P. 42-49. DOI: 10.17150/1993-3541.2016.26(1).42-49.]
11. Цекина, М.В. Экотропа как основа развития экологического туризма в национальных парках Бурятии / М.В. Цекина, М.С. Батуев // Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса. - 2016. -№ 1. - С.248-255. [Tsekina, M.V. Ecotrail as the basis of ecological tourism development in national parks in Buryatia / M.V. Tsekina, M.S.

- Batuev // The Territory of New Opportunities. The Herald of Vladivostok State University of Economics and Service. - 2016. - № 1. - P. 248-255.]
12. Оборин Матвей Сергеевич Формирование системы экологических троп для развития местного эколого-просветительского туризма // Вестник Удмуртского университета. Серия «Биология. Науки о Земле». 2010. №4. [Oborin Matvey Sergeevich Formation of a system of ecological trails for the development of local ecological and educational tourism // Bulletin of the Udmurt University. Series "Biology. Earth Sciences. 2010. №. 4.]
 13. Закирова Юлия Александровна, Хуснутдинова Светлана Рустемовна, Дембич Александр Алексеевич Полицентричность города Казань: возможности и ограничения развития административных районов // Географический вестник. 2018. №2 (45). [Zakirova Yulia Aleksandrovna, Khusnutdinova Svetlana Rustemovna, Dembich Alexander Alekseevich Polycentricity of the city of Kazan: opportunities and limitations of the development of administrative districts // Geographical Bulletin. 2018. №2 (45).]
 14. Захарочкина А.А., Скопинцев А.В. Архитектурно- ландшафтное формирование спортивно-оздоровительных центров на рельефе в Ростове-на-Дону // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2019. №3 (29). [Zakharochkina A.A., Skopintsev A.V. Architectural and landscape design of sports and recreation centers on the landscape in Rostov-on-Don // Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Sea. 2019. No. 3 (29).]
 15. A.L. Dannenberg, Heather Burpee. Architecture for Health Is Not Just for Healthcare Architects. HERD Health Environments Research & Design Journal 11(2):193758671877295. DOI:10.1177/1937586718772955.
 16. Токарев Алексей Евгеньевич Концептуальная модель функционального зонирования модуля временного проживания для арктических районов России // Вестник ТГАСУ. 2019. №4. [Tokarev Alexey Evgenievich Conceptual model of functional zoning of the temporary residence module for the Arctic regions of Russia // Bulletin of TSASU. 2019. No.4.]
 17. Л.К. Караулова. Физиология физкультурно-оздоровительной деятельности. М.: ИНФРА-М, 2017. — 336 с. [L.K. Karaulova. Physiology of physical culture and recreational activity. Moscow: INFRA-M, 2017. — 336 p.]
 18. Л. А. Боярская. Теоретические основы двигательной рекреации. М-вонауки и высшего образования РФ. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2021. — 152 с. [L. A. Boyarskaya. Theoretical foundations of motor recreation. Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation. — Yekaterinburg: Publishing House. un-ta, 2021. — 152 p.]
 19. Прокопьев А.С., Чернова О. Д. Экологическая тропа: обустройство и назначение. Национальный исследовательский томский государственный университет. Томск. Издательский дом Томского Государственного Университета. 2018. [Prokopyev A.S., Chernova O. D. Ecological path: arrangement and purpose. National Research Tomsk State University. Tomsk. Publishing House of Tomsk State University. 2018.]
 20. Kneipp fitness circuit in the Rhine in Basel // Swiss tourism. URL: <https://www.myswitzerland.com/ru/experiences/kneipp-fitness-circuit-in-the-rhine-in-basel/> (reference date: 05.16.2023).
 21. Mangrove Trail. URL: <https://floridahikes.com/pennekamp> (reference date: 15.07.2023)
 22. Natural Kneipp path in Blitzingen. URL: <https://www.outdooractive.com/en/route/nature-trail/goms/natural-kneipp-path-in-blitzingen/19116837/> (reference date: 15.07.2023)
 23. Schulte K, Blakeslee SB, Stritter W, Eidenschink C, Gündling PW, Baumann A, Seifert G. The effect of Kneipp treatment hydrotherapy on secretory IgA in young children: A controlled, non-randomized clinical pilot study. Complement Ther Med. 2021 Mar;57:102637. DOI: 10.1016/j.ctim.2020.102637. Epub 2020 Nov 28. PMID: 33259910.
 24. Gunwoo Kim, Patrick A. Miller. The impact of green infrastructure on human health and well-being: The example of the Huckleberry Trail and the Heritage Community Park and

- Natural Area in Blacksburg, Virginia. Sustainable Cities and Society. 2019. DOI: 10.1016/j.scs.2019.101562LIVEJOURNAL.
25. Latvia | Antinciems: Hike from Lapmezhiems to Kemerī. URL: <https://mova.livejournal.com/243731.html> (reference date: 02.05.2023)
26. Красная поляна // Официальный сайт Курорта Красная Поляна. URL: <https://krasnayapolyanaresort.ru/ecotrail/> (дата обращения: 02.05.2023). [Krasnaya Polyana // Official website of Krasnaya Polyana Resort. URL: <https://krasnayapolyanaresort.ru/ecotrail/> (reference date: 02.05.2023).]
27. Псковская тропа // Схема маршрута. URL: <https://pskovtrail.ru/route#rec544566030> (дата обращения: 02.05.2023). [Pskov trail // Route diagram. URL: <https://pskovtrail.ru/route#rec544566030> (reference date: 02.05.2023).]
28. Маршрутыздоровья.рф. URL: <https://xn--80aeflxpamads17d3bv2c.xn--p1ai/> (дата обращения: 10.05.2023) [March of health.rf. URL: <https://xn--80aeflxpamads17d3bv2c.xn--p1ai/> (reference date: 10.05.2023)]

Информация об авторах

Коткова Анастасия Викторовна, студент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация.

E-mail: kotkovanastasia1@gmail.com

Айдарова Галина Николаевна, доктор архитектуры, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация.

E-mail: aidagalnik@mail.ru

Сулейманов Альфред Мидхатович, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: sulejmanov@kgasu.ru

Information about the authors

Anastasia V. Kotkova, student, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.

Email: kotkovanastasia1@gmail.com

Galina N. Aidarova, doctor of architecture, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.

Email: aidagalnik@mail.ru

Alfred M. Suleymanov, doctor of technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: sulejmanov@kgasu.ru

УДК: 711.42, 711.58, 72.03
DOI: 10.52409/20731523_2023_3_200
EDN: PFQLWY



О типологии формирования столичной градостроительной среды Санкт-Петербурга – Петрограда – Ленинграда

С.В.Семенцов¹, Т.А.Славина¹

¹Российская академия архитектурных и строительных наук, г. Санкт-Петербург,
Российская Федерация

Аннотация. *Целью* статьи является анализ появления и развития во времени наиболее масштабных характеристик создаваемой рукотворной среды Санкт-Петербурга и Санкт-Петербургской агломерации – типов среды (включающих, в свою очередь, большое разнообразие морфотипов). *Актуальность* такого взгляда объясняется не только сугубо научными идеями и жадной познания. Но, в первую очередь требованиями создания целостной, комфортной для человека среды обитания. Для поиска ответов часто применяют различные варианты анализа рукотворной среды, рассматривая историко-хронологические параметры, стилистические, морфологические, экологические и т.д. особенности. Представляется, что можно выявить и более масштабные межсистемные, межобъектные, объективно существующие и воспринимаемые однородности, которые целесообразно называть типами среды. И в значительной мере «ответственные» за формирование среды, комфортной для человека. при изучении исторического Санкт-Петербурга и его агломерации такой уровень обобщенностей присутствует, следовательно его можно выявить и провести исследование). Поэтому *среди задач* данной статьи можно выделить выявление и описание выявленных рукотворных типов сформированной усилиями создателей Санкт-Петербурга среды.

Результатами исследования стало подтверждение изначальной гипотезы, что Санкт-Петербург и агломерация формировались с 1712 г. по 2004 г. последовательно через особые градостроительные указы и в системе всей практики реализации именно на основе развития типов среды как главных обобщенных элементов композиционного градостроительно - архитектурного построения – от ядра (центра) города до периферийных сельских зон.

Выводы исследования позволяют более внимательно отнестись ко всей современной практике создания среды обитания, руководствуясь необходимостью последовательного формирования типов среды, комфортных для проживания людей и деятельности сообществ, а не на основе отдельных морфологических фрагментов и элементов.

Ключевые слова: Санкт-Петербург, морфология градостроительного каркаса, кварталов застройки и участков, разные типы градостроительной среды.

Для цитирования: Семенцов С.В., Славина Т.А. О типологии формирования столичной градостроительной среды Санкт-Петербурга – Петрограда – Ленинграда // Известия КГАСУ, 2023, № 3(65), с.200-213, DOI: 10.52409/20731523_2023_3_200, EDN: PFQLWY

On the typology of the formation of the metropolitan urban planning environment of St. Petersburg - Petrograd - Leningrad

S.V. Sementsov¹, T.A. Slavina¹

¹Russian Academy of Architecture and Construction Sciences,
Saint Petersburg, Russia

Abstract. The purpose of this article is to consider the genesis and development over time of the most large-scale characteristics of the created man-made environment of St. Petersburg and the St. Petersburg agglomeration - types of environment (including a wide variety of morphotypes).

The relevance of the topic is explained not only by purely scientific ideas and a thirst for knowledge, but, first of all, the requirements for creating a holistic living environment that is comfortable for human being. What's the highlight here? To find answers, various options for analyzing the man-made environment itself are often used, considering historical and chronological parameters, stylistic, morphological, environmental features and others. It is possible to identify larger-scale intersystem, interobject, objectively existing and perceived homogeneities, which it is advisable to call types of environment and to a large extent "responsible" for creating an environment comfortable for humans. Moreover, when studying historical St. Petersburg and its agglomeration, such a level of generalization is present, it can be identified and a study (or a series of studies) conducted. Therefore, among the main objectives of this article we can highlight the identification and description (brief) of the identified man-made types of the environment formed by the efforts of the creators of St. Petersburg.

The results of the *research* confirmed the initial hypothesis that St. Petersburg and the agglomeration were formed from 1712 to 2004 consistently through special urban planning decrees and in the system of all implementation practices precisely on the basis of the development of environmental types - from the core (center) of the city to peripheral rural areas. The findings of the study allow us to take a more careful look at all modern practices of creating habitats, guided by the need to consistently create types of environments that are comfortable for people to live in and communities to operate, but not on the basis of individual morphological fragments and elements.

Keywords: St. Petersburg, morphology of the urban planning framework, building blocks and plots, different types of urban planning environment.

For citation: Sementsov S.V., Slavina T.A. On the typology of the formation of the metropolitan urban planning environment of St. Petersburg - Petrograd – Leningrad // News KSUAE, 2023, № 3(65), p.200-213, DOI: 10.52409/20731523_2023_3_200, EDN: PFQLWY

1. Введение

Исследование градостроительства и архитектуры Санкт-Петербурга традиционно осуществляется в системе изучения истории (общекультурной и строительной) и бытования зданий, сооружений, ансамблей и территорий, истории многих сфер жизни людей в Санкт-Петербурге. Отечественная и иностранная библиография таких описаний, мемуаров и исследований безгранична, здесь могут быть отмечены лишь некоторые из изданий, в том числе о: Санкт-Петербурге и его пригородах в целом [1-3], фрагментах территорий и застройки, известнейших зданиях, сооружениях и их авторах [4, 5], культурно-социальном бытовании Санкт-Петербурга [6, 7], художественно-искусствоведческих качествах рукотворной среды [8], довоенной и послевоенной охране реставрации наследия [9, 10]. Исследования архитектурных и художественных качеств исторической среды, в основном, ограничивались историческими, функциональными особенностями, типологией (морфологией) зданий, сооружений и их фрагментов,

например – в описаниях архитектурного облика (деталей, фрагментов, штукатурных, кованых, каменных изделий, цветового решения и т.д.) реставрируемых зданий – Зимнего дворца и других дворцов города и пригородов, набережных, мостов и т.д. [11, 12], а также - по восприятию зданий, ансамблей и панорам [13], по символично-семантической тематике и тематике восприятия архитектуры и городской среды как текста [14]. Известны также исследования морфологии (типологии) кварталов и участков.

Данная статья посвящена теме, которая прежде не входила в пространство традиционного изучения - пока практически нет аналитических работ о крупнейших характеристиках Санкт-Петербурга и Санкт-Петербургской агломерации, показывающих не только традиционную «средовую типологию», но, как представляется - иерархию главных типов рукотворных «средовых зон» с их особыми типами от наиболее сложной и комплексной зоны ядра центра Санкт-Петербурга до наиболее упрощенной зоны вокруг Санкт-Петербурга – до пояса сельских поселений и ландшафтов. Причем, каждый из типов этих зон включает спектр морфологического разнообразия более мелких составляющих среды – от фрагментов территорий, до мельчайших элементов архитектуры. Такая иерархия по зонам рукотворно и осознанно вводилась со времен Петра Первого, с 1712 г. Такие самые укрупненные «средовые» подходы существовали в Санкт-петербургском проектно градостроительстве вплоть до 2000-х гг. (вплоть до ТЭО генерального плана Санкт-Петербурга 2004-2005 гг.). Данная тема об иерархии типов среды опиралась на проектные проработки концепции генеральных планов Ленинграда – Санкт-Петербурга и разрабатывалась с 1980-х гг., возможно, в настоящее время такой подход является одним из первых в России в этой области.

Целью данной статьи является рассмотрение появления и развития во времени наиболее масштабных характеристик создаваемой рукотворной среды Санкт-Петербурга и Санкт-Петербургской агломерации – типов среды (включающих, в свою очередь, большое разнообразие морфотипов). Задачами исследования являются выявление на разных этапах создания Санкт-Петербурга и Санкт-Петербургской агломерации феномена формирования его градостроительного поля в рамках образования системы типов градостроительной среды, хронологической устойчивости этого градостроительного феномена, его особенностей на разных этапах развития Санкт-Петербурга и агломерации в целом.

2. Материалы и методы

Данная статья опирается на комплексную методику параллельного изучения объекта исследования на основе историко-архивных, историко-градостроительных, картографических, морфологических методов.

3. Результаты и обсуждение

Как показывают архивные данные, до 1712 г. прикрепостное поселение Санкт-Петербург, стремительно ставшее к 1710 г. губернским городом, затем, к 1712 г. – столицей Российского государства, имело явно нестоличный, непрезентативный вид с кривыми улочками, стихийной и в подавляющем большинстве деревянной разновеликой неупорядоченной, нерегулярной застройкой, и совершенно не соответствовала «свалившемуся» на него (поселение) столичного статуса. Но с 1712 г. под напором Петра I и усилиями, сначала Д. Трезини (с 1712 г.), затем Ж.-Б.-А. Леблон (с 1717 г.), Н. Гербеля (с 1719 г.) начала формироваться единая система пространственно-средовой унификации планировочных элементов и градостроительной ткани города и его окрестностей. Эта программа формулировалась в планах урегулирования отдельных территорий (совр. – генеральные планы), в проектах прокладки улиц с формированием кварталов, с правил разбивки кварталов на участки, в проектах застройки участков конкретными типами зданий и сооружений. При этом царь, чиновники, профессионалы безжалостно относились к существовавшей уже иррегулярной застройке и планировочной системе, добиваясь ее полного сноса и замены на новый тип планировки, застройки, всей формируемой среды. Каждому застройщику официально с 1712 г. – гвардейскими офицерами, отвечавшими за застройку будущего города, а с 1718 г. - от имени Главной Полицеймейстерской канцелярии выдавали чертежи («образцовые

проекты») с требованиями застроить переданный им участок именно определенными типами зданий (по этажности, по применению особых строительных материалов – кирпичных или деревянных конструкций, по обязательности строительства лицевого корпуса на красной линии (в городе), или с возможным отступом от красной линии в предместьях и пригородах) и т.д. И все – для обеспечения градостроительного эффекта создания разных типов формируемой среды и особого типа прокладки улиц и переулков и архитектурного решения каждого участка. С 1712 г. начала формироваться иерархия таких типов среды, раскрывавшая их особую шкалу центральности в рамках города, его пригородов, всей Санкт-Петербургской агломерации. Последовательно в системе Царских (до 1721 г.), Императорских (с 1721 г.) указов Петра I, Анны Иоанновны, Елизаветы Петровны, Екатерины II, Александра I, Николая I, Александра II, Александра III, Николая II, и вслед за ними уже в советское время с 1919 г., на словах очень громко отрицая «ужасный опыт императорского царизма», но на деле последовательно продолжая линию такого средового формирования застройки города и всей пригородной зоны вплоть до 2000-х гг. В Санкт-Петербурге постепенно к 1750-м гг. была рукотворно сформирована иерархия формируемых зон и ландшафтов (в зависимости от центральности их композиций и значимости в структуре города и агломерации):

1. Центр Санкт-Петербурга
2. Окраины (периферия) центра Санкт-Петербурга
3. Периферия Санкт-Петербурга
4. Пригороды
5. Сельские пригородные территории.

Такая иерархия типов среды проявлялась в конкретной (для каждого типа на каждом историческом этапе) морфологии градостроительного каркаса и градостроительной ткани: зонирование территорий по конкретным типам пространственной композиции, обязательная для Санкт-Петербурга и пригородов геометричность (чаще всего - прямолинейность) градостроительного каркаса (с 3-4 типами магистралей, с обязательной ориентацией на вертикальные доминанты), геометричность площадей, кварталов и участков (безусловно обеспечивая прямоугольность, иногда - иную геометричность в условиях сложностей ландшафтов) с подавляющим числом прямоугольных кварталов и участков, равновысотность застройки («под единый карниз», с нормируемой разной высотностью в разных зонах, но повсеместно не выше высоты верхней линии карниза императорского Зимнего дворца, т.е. – не выше 11 саженей, 23.43 м), математически выверенное размещение разных типов высотных доминант в ткани города и во всей пригородной зоне, соблюдение установленных указами правил застройки участков в разных средовых зонах относительно красных линий. Причем все это - не только в самом городе, но и на обширных пространствах его пригородов, даже в сельских поселениях - на территориях, размерами более 100х100 км.

Конечно, в эту градостроительно-архитектурно-композиционную иерархию зачастую «добавляли» и функциональные составляющие, но всегда основой таких проектных и реализационных подходов оставалась именно композиционное совершенство (завершенности) территорий и застройки.

Первый такой «пробный» проект выявления и градостроительной фиксации столичности был предложен Д. Трезини для создания российской столицы нового «регулярного» типа на о. Ретусаари (совр. – Котлин остров, Кронштадт) [15] (Рис. 1), общими размерами застройки в 9,4х3,0 км (для сравнения, в Европе самые крупные «регулярные» - «идеальные» города максимально достигали габаритов в 1,0х0,5 км), с 226 прямоугольными кварталами на 7278 прямоугольных участка и 26 прямоугольными площадями для размещения храмов. Проектом предложены в центре города прямоугольные кварталы размерами в 100х470 м (площадь в средний европейский город!), в прибрежных зонах длина кварталов была, естественно, меньше и зависела от линии берега, во всех кварталах предусмотрено создание стандартизированных прямоугольных участков, размерами в 20-24х50 м (площадь в европейский городской квартал!). Планировочная система проектируемой столицы должна была включить 3 типа городских магистралей: главные улицы («прошпективы») с каналами по их оси

(шириною «прошпектов» в 80 м.), поперечные улицы с каналами по одну сторону улицы (шириною в 60 м.), набережные улицы по берегам залива (шириною в 50 м).



Рис. 1. «Мера Котлину острову коналом идворам». 1712 г. НИОР. Библиотеки РАН. Собрание рукописных карт. Основная опись. № 754

Fig 1. «Measure of Kotlin Island canals and courtyards.» 1712 NIOR Library of the Russian Academy of Sciences. Collection of handwritten maps. Basic description. No. 754.

Именно к этому проекту Д. Трезини разработал в 1712-1714 гг. известный альбом «образцовых проектов» деревянных городских зданий (в 1 этаж, часто с мансардами), которые обязательно должны возводиться по красным улицам, длина которых должна быть меньше ширины участков и с обоих боков до границ межевания предложено сооружать ворота и заборы. И именно проекты этого альбома И.Э. Грабарь ошибочно называл «дома для бедных», «дома для средних», «дома для зажиточных».

Несмотря на то, что Правительствующий Сенат искал по всей России 7278 семей для обязательного их переезда на о. Ретусаари, и на протяжении нескольких лет все-таки нашел их, проект не был осуществлен. Вместо него постепенно вплоть до конца 1715 г. были предложены для строительства по канонам проекта на о. Ретусаари: проект создания города на Московской стороне (в 1712 г., частично реализован, сейчас сохранилась его часть в зоне Кировской, Захарьевской и других улиц); проект создания города на Выборгской стороне (в 1715 г., не осуществлен); проекты реконструкции существующего поселения на Городском острове (Санкт-Петербургском острове, 1714-1715 гг., не осуществлены); затем - главный осуществленный проект создания города на всем Васильевском острове (утвержден 1 января 1716 г., реализован лишь частично). Именно этот проект стал самым любимым проектом для Петра I, взяв эти подписанные материалы, царь отправился в двухлетнее путешествие по Европе. Во время путешествия данные проектные материалы по грандиозному (по площади равному всей Венеции – это одна из линий формирования в общественном сознании темы «Северной Венеции») преобразованию Васильевского острова были гравированы известнейшими европейскими граверами И.Б. Хоманном (Рис. 2), Г.П. Бушем. Н. де Фером.



Рис. 2. Топографическое изображение новой русской столичной резиденции и морского города Ст.Петербург вместе с его изначально возведенной крепостью, основанного Их Царским Величеством Петром Алексеевичем Государем всех Русских и прочая и прочая и прочая. С 1703 построенного на краю Восточного моря на нескольких островах при устье Невы и ставшего для русской нации с мощным флотом вместилищем торговли и судоходства. Издано Иог. Баптистом Хоманном, Римского Императорского Величества географом в Нюрнберге». Нюрнберг, 1716-1718 (?). РНБ К 1-Пб/ 27-2.

Fig. 2. Topographic image of the new Russian capital residence and sea city of St. Petersburg, together with its originally erected fortress, founded by Their Royal Majesty Peter Alekseevich Sovereign of all Russians and so on and so forth and so on. Since 1703, it was built on the edge of the Eastern Sea on several islands at the mouth of the Neva and became for the Russian nation, with a powerful fleet, a container for trade and shipping. Published by Yog. Baptist Homann, the Roman Imperial Majesty's geographer at Nuremberg." Nuremberg, 1716-1718 (?). RNB K 1-Pb/ 27 - 2.

Можно представить, как был вдохновлен Д. Трезини своими работами над проектами в разных зонах Приневья и достижениями. Но, на его беду в середине 1716 г. в Санкт-Петербург приехал из Франции Жан-Батист Александр Левблон, стал генерал-архитектором, очень «въедливо» присматривался ко всем ведущимся работам в столице и вокруг нее и 8 (19) января 1717 г. представил на дальнейшее царское рассмотрение свой проект Санкт-Петербурга (Рис. 3). В нем был разработан совершенно иной вариант развития столичного города, причем, как показали исследования – на основе сохранения и использования уже проложенных по проекту Д. Трезини систем красных линий проектируемых главных проспектов и поперечных улиц на Васильевском острове. При этом, Левблон также проникся идеями создания гигантской столицы, его проектный ансамблевый и регулярный овал «идеального» города объединял небывалые по тем временам территории в 5100x6450 м, а с сопутствующими функционально вспомогательными зонами – 5400x7200 м.



Рис 3. «Генеральной чертеж Санктпитебурху» Ж.-Б.-А Леблона. 8 января 1717 года. СПб филиал архива РАН, р. 1X, оп.1. №627.

Fig 3. "General drawing of St. Petersburg" by J.-B.-A Leblond. January 8, 1717. St. Petersburg branch of the RAS archive, r. 1X, op.1. No. 627

Но к 1718 г. реальное развитие Санкт-Петербурга, указом объединившего застройку и территории Васильевского острова, Городского острова, Адмиралтейской стороны. Московской стороны, Выборгской стороны, уже простиралось на пространствах в 5300x8700 м. Эти размеры абсолютно превышали все существовавшие тогда идеальные города Европы, например – Гетеборг (700x700 м), Пальманова (1500x1500 м), Христиания (400x500 м), оказавшись сравнимыми с самыми крупными и древними столичными городами: Римом, Парижем, Мадридом, Лондоном.

Для этого проекта он предложил свою систему «образцовых проектов» - двухэтажных кирпичных зданий французского типа, брандмауэрных с высоким цоколем, ломаной кровлей, но без ворот для въезда во двор (въезд предусмотрен со стороны специально прокладываемых малых улиц, которые должны организовать в серединах создаваемых кварталов).

Для осуществления в натуре этой идеи Леблон предложил также разделить стандартные участки Д. Трезини по длине на 2 равных участка (на выходящих торцевых границах участка). Так в Санкт-Петербурге появились 2 типа застройки: на главных улицах, на парадных набережных царским указом определено застраивать только по «образцовым проектам» Леблona (создавая застройку сплошного «брандмауэрного» типа в 2 этажа), а на второстепенных улицах и на периферии застройки – по «образцовым проектам» Д. Трезини, (формируя застройку «пунктирного», «строчного» типа в 1 этаж) (Рис. 4).

«Проектный» Санкт-Петербург. 1719-1721
Формирование градостроительной ткани
Градостроительная регламентация планировки и застройки
(По материалам проектов и градозаконодательства)
 (реконструкция - архитектор С.В. Семенов)

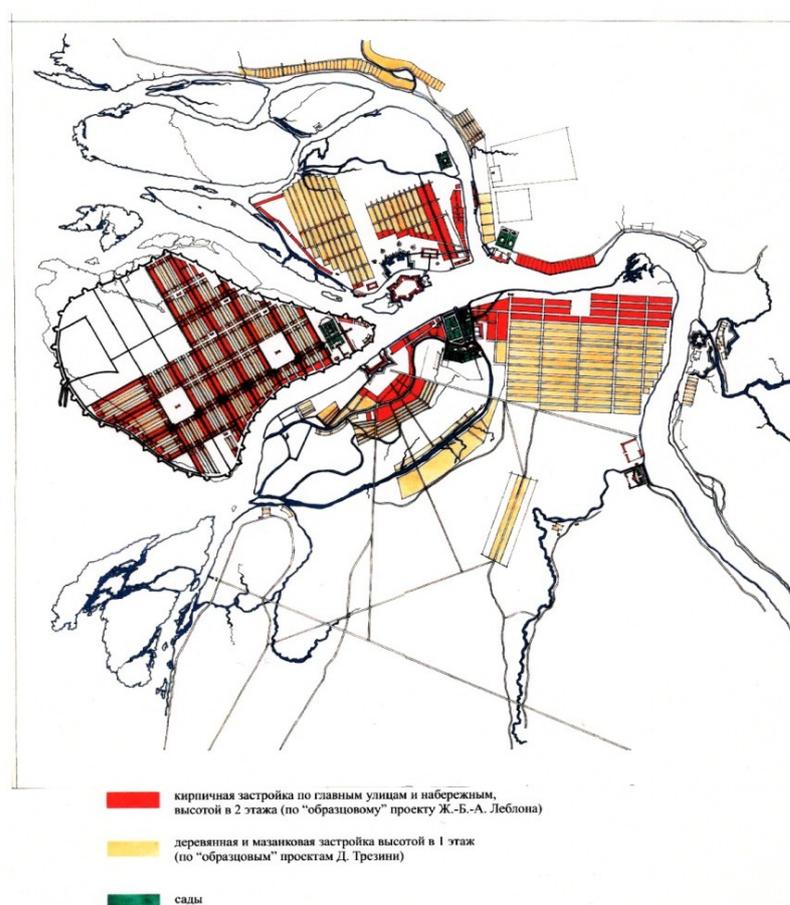


Рис. 4. «Проектный» Санкт-Петербург. Проектирование градостроительной ткани. Формирование разных типов среды. 1719-1721 гг. (Аналитическая схема).
 Fig. 4. «Project» St. Petersburg. Design of urban fabric. Formation of different types of environment. 1719-1721 (Analytical scheme)

В точном соответствии с общим градостроительным решением всей городской и предместной территории (определенной указом 1718 г.), с 1722 г. велась нарезка участков (целыми и половинным участками) и выдача всем застройщикам «образцовых проектов» именно этих двух типов застройки участков: для кирпичного строительства лицевых корпусов и деревянного строительства дворовых флигелей, для деревянного строительства лицевых корпусов и дворовых флигелей.

Для каждой из уже формировавшихся зон в соответствии с их центральностью уже при Петре I разрабатывали серию нормативов, «образцовых проектов», параметров планировки и застройки. В этом смысле показательны даже правила разбивки осваиваемых территорий на участки. Практически одновременно в предместьях и окрестностях Санкт-Петербурга реализовывались «образцовые проекты» Д. Трезини для пригородных усадеб (с 1714 г.), с выделением под застройку участков других размеров и требованиями застраивать по иным правилам, чем в зоне будущего города. Например, для пригородных усадеб на Выборгской стороне по Черной речке были «нарезаны» участки размерами в 50 x 200 сажен (106,5 x 426,0 м) (1716-1717 гг.), а вдоль Петергофской дороги предложены к освоению загородные участки под «забавные дома» (по-современному – дачи, пригородные усадьбы) в 100 x 1000 сажен (213,0 x 2130,0 м) (с 1714-1716 гг.). При переселении в Санкт-петербургскую губернии переведенцев (в соответствии с Именным указом от 6(17) июня 1712 г.) в окрестности создаваемого

города, для их размещения под руководством «*Канцелярии отъ Строений*» нарезали прямоугольные участки сельского типа: под дворы и огороды – по десятине на двор, под пашню – по 10 четвертей на двор. С разрешением строить по традиционным принципам русского деревянного сельского строительства, без соблюдения правила застройки по красной линии, с возможностью сооружать деревянные строения на любой фрагменте участка [16].

Таким образом, с 1712 г. законодательно, в проектах и фактически при создании Санкт-Петербурга осуществлялся переход от традиционной русской нерегулярной деревянной застройки кварталов к кирпичной-мазанковой-деревянной четко регламентированной застройке на прямоугольных («регулярных») участках в соответствии с разными типами формируемой среды (городской, предместной, пригородной, сельской) с лицевыми корпусами по красным линиям, ставшей основой всего петербургского зодчества. С сохранением традиций сельского русского нерегулярного строительства только в слободах переведенцев в Санкт-петербургской Губернии.

Елизавета Петровна в 1747 г. Высочайшим указом образовала Императорскую Академию художеств при Императорской Академии Наук. В благодарность академики создали «для славы и чести Российской Империи» в течение 1748-1753 гг. в честь Елизаветы Петровны представительский «Альбом», объединивший проектный план Санкт-Петербурга (на 12 листах), 12 проектных изображений Санкт-Петербурга (в соответствии с этим Проектным планом), проектную Роспись всех улиц, переулков, площадей, каналов Санкт-Петербурга. Этот альбом был закончен в 1753 г. и распространялся по всем столицам Европы и в коллекции виднейших собраний. Проектный план был подготовлен группой специалистов под руководством адъютанта И.Ф. Трускота в 1748-1749 гг., а проектные рисунки выполнил мастер М.И. Махаев. Сам план был осуществлен по аналогии с созданными в начале XVIII в. столь же грандиозными планами Лондона, Мадрида, Парижа, Рима [17, 18] (Рис. 5).



Рис. 5 [«План И.Ф.Трускота». 1748-1749]. Санкт-Петербург. РГА ВМФ. Ф. 1331. Оп. 4. Д. 991.

Fig. 5. «I.F. Truscott's Plan». 1748-1749]. Saint Petersburg. Russian State Administration of the Navy. F. 1331. Op. 4. D. 991.

На этом, втором сводном проектном плане Санкт-Петербурга уже тогда были показаны разные типы проектируемой и реализуемой среды:

1. Плотная брандмауэрная кирпичная застройка в 2-3 этажа центра Санкт-Петербурга.
2. «Строчная» в 1-2 этажа каменная (кирпичная) застройка периферии города.
3. «Светлицы» - деревянная (рубленая и брандмауэрная) «строчная» застройка в 1 этаж для лейб-гвардии полков за границами города в зонах предместий.

4. Внегородская усадебная застройка с усадебными домами и обширными сельскими ландшафтами.

5. Внегородская застройка загородных рядовых поселений. Все эти типы среды в процессе разработки проектов, проведения работ по застройке, дальнейшего функционирования уже имели комплекты «образцовых проектов», систему контроля за выполнением работ и контроля за функционированием.

Такая иерархическая система на примере столичного Санкт-Петербурга была уже отшлифована к 1762 г. Восшествие на престол Екатерины II расширило эту практику на все города (существующие и проектируемые) в Российской Империи, ведь, как известно, усилиями архитекторов созданной по ее Высочайшему указу «Коммиссии о каменном строении Санкт-Петербурга и Москвы» было поручено с 1763 г. создать проекты урегулирования других российских городов. И вплоть до 1796 г., до смерти Екатерины Великой архитекторы Комиссии выполнили проекты урегулирования и комплектные к ним альбомы «образцовых проектов» для 306 городов России. Во многих губерниях губернаторы получали на руки Высочайше утвержденные (конфирмованные) уточненные по Генеральному межеванию Атласы губерний, приложенные к ним проектные Планы урегулирования всех городов губернии (губернского города, всех уездных городов, всех безъездных городов данной Губернии), «образцовые проекты» в соответствии с утвержденными зонами и типами формирования городских и предместных территорий для каждого города, а также, часто и их губернские и городские гербы. Как и для всей обеспеченных планами урегулирования городов России для Санкт-Петербурга также с определенной периодичностью были разработаны такие планы, например, среди выявленных в коллекциях проектные планы урегулирования: на 1760-е гг., 1776 г., 1792-1793 гг., 1796 г. На каждом таком Высочайше конфирмованном плане (Высочайше указом утвержденном и подписанном) показывали особыми графическими знаками разные типы среды, разные системы планировки и застройки, разные системы особых градостроительных регламентов (разрешенное строительство каменных или деревянных строений, особых высот до карниза и т.д.). Любопытно здесь процитировать систему существовавших в 1792 г. требований по застройке (по этажности, высоте, применю каменных или деревянных конструкций): «Конфирмація Ея Императорс: Величества: аименно въ 1й Адмиралтейской Части Подворцовой Набережной сплошное Каменное строение вышиною въ 10 Сажень, а въ протчихъ Улицахъ строение въ 8 Саж: во 2й и 3й Адмирал: Частяхъ по большимъ Улицамъ въ 3 Этажа, а по короткимъ въ 2 Этажа: въ Литейной и Московской Частяхъ на Улицу Деревянное на Каменныхъ Погребяхъ, а во Дворъ Деревянное, въ Рожественской Части Деревянное: въ Васильевской Части по 12ю Линію въ 2й и 1й Этажъ Каменное, а въ протчихъ Линіяхъ Деревянное на Каменныхъ Фундаментахъ: въ Петербургской Части Деревянные» (Рис. 6).

Уже в советское время, в годы метаний от сохранения исторических императорских тенденций развития Санкт-Петербурга – Петрограда и его агломерации к явному повороту к социалистическому градоуправлению, сохранялась, как ни покажется странным в условиях громогласных объявлений о безоговорочно переходе на социалистическое новое градостроительство, традиция соблюдать дореволюционных принципов. В архивах выявлены проектные планы и документы по развитию Петрограда-Ленинграда 1919, 1923, 1927, 1930-х, 1940-х, 1950-х и т.д. годов, подтверждающие опору градостроителей социалистических десятилетий при разработке основных правил развития Петрограда-Ленинграда (но уже на уровне областного города) императорским традициям.

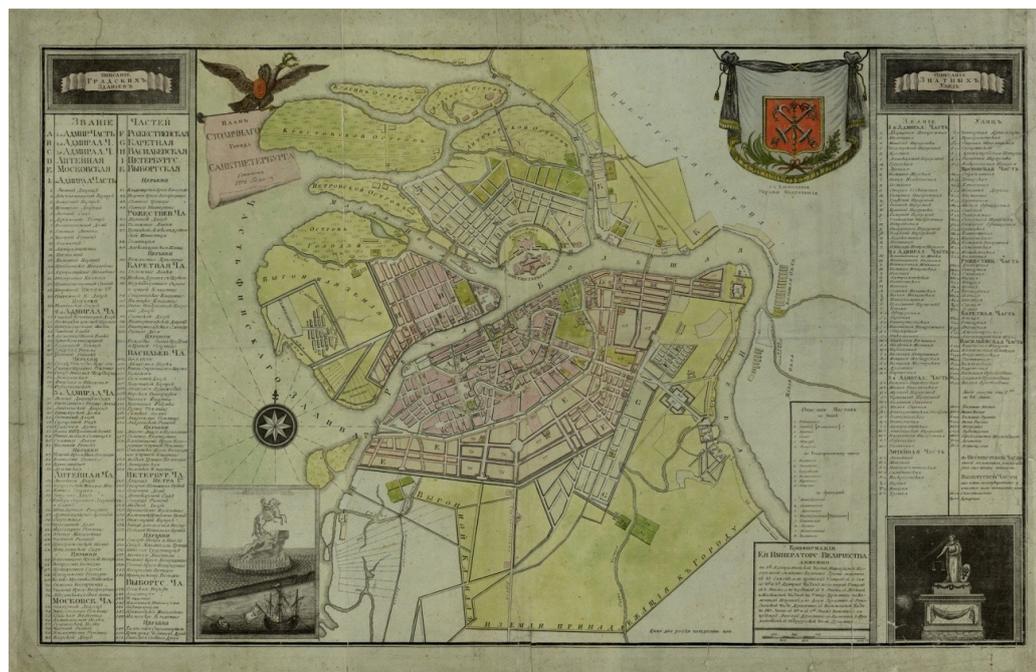


Рис. 6. «Планъ СТОЛИЧНАГО Города САНКТПЕТЕРБУРГА Сочинень 1792 Года».
РНБ К 1-Пб/14-4

Fig. 6. «Plan of the Capital City of SAINTPETERSBURG Composed in 1792.» RNB K 1-Pb/14-4

Например, в созданной при Петрогубисполкоме в структуре «Совета по урегулированию плана Петрограда и его окраин» в мае 1919 г. особой Архитектурной мастерской (рук. арх. И.А. Фомин), занимавшейся разработкой проектного плана урегулирования Петрограда и в которой силами ее ведущих архитекторов была создана в том же году важная схема дальнейшего развития Петрограда (эта схема выявлена в черновом варианте, но сохраняет важнейшие моменты такого рассматриваемого нами подхода) (Рис. 7) были выделены три особые по статусу и пространственно-композиционным качествам зоны, различающиеся по обобщенным градостроительно-визуальным и композиционным показателям, по особенностям застройки участков и кварталов, по этажности, по использованию строительных материалов и т.д.

1 зона: застройка в центральных районах города на основе правил и требований исторического центра Санкт-Петербурга: брандмауэрная, высотой в 5-6 этажей, по красным линиям кварталов, с сохранением принципов «единого карниза».

2 зона: застройка в периферийных районах, на основе принципов создания периферийной «строчной» застройки среди массивов придомовой зелени, в 4-5 этажа.

3 зона: застройка пригородного типа, с размещением среди зелени зданий малоэтажных квартирных или даже коттеджных вариантов в 2-3 этажа.

Наконец, тогда же был предложен новый, 4-й тип городской и пригородной среды: создание единого благоустроенного садово-паркового зеленого пояса. Для каждой из этих зон должны были разработать особые (зональные) правила застройки, разработать особые планировочные, архитектурно-образные, конструктивные, типы зданий, сооружений, комплексов. Как известно из архивных документов, такие работы начали проводить, даже организовывали на эти темы особые конкурсы.

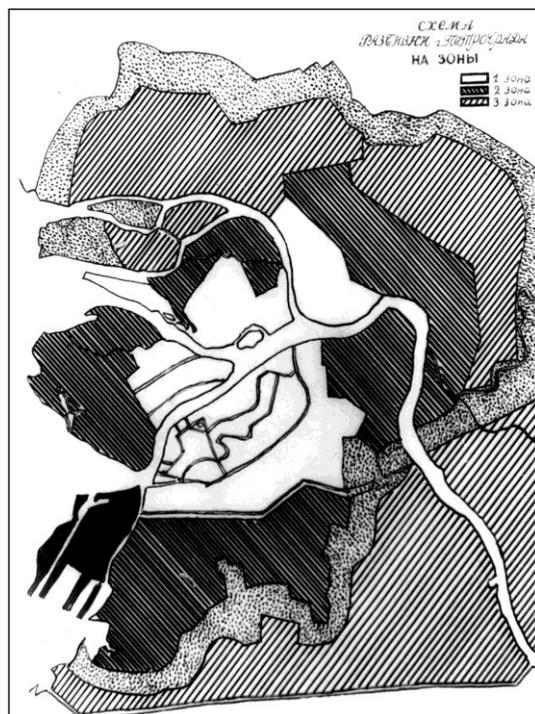


Рис. 7. «Схема разбивки г. Петрограда на зоны». 1919 г. Архитектурная мастерская при Совете по урегулированию плана Петрограда и его окраин, (Рук. арх. И.А. Фомин, исп. арх. М.И. Рославлев, гражд. инж. Л.М. Тверской). Из коллекции Г.К. Григорьевой.

Fig. 7. «Scheme for dividing the city of Petrograd into zones». 1919 Architectural workshop at the Council for the Settlement of the Plan of Petrograd and its Outskirts, (Headed by architect I.A. Fomin.

Прошел почти век после этих целенаправленных градостроительно-проектных работ, и в 2004 г. при разработке Концепции Генерального плана Санкт-Петербурга (на период до 2025 г.) уже новое поколение санкт-петербургских градостроителей вспомнили об этом историческом и традиционном для Санкт-Петербурга подходе. В документах Концепции был представлен раздел (с текстом и чертежами), который включил следующие средовые зоны Большого Санкт-Петербурга:

1. Центральное ядро Санкт-Петербурга («Императорский центр Санкт-Петербурга»).
2. Промышленно-селитебный пояс Санкт-Петербурга.
3. Селитебный пояс Санкт-Петербурга («Социалистические селитебные районы Ленинграда»).
4. Зоны индивидуального жилищного строительства.
5. Охраняемые свободные пространства и Курортная зона на северном побережье Финского залива.
6. Исторические пригороды, заповедные зоны (Кронштадт, Ломоносов, Петродворец, Стрельна, Пушкин-Павловск) [19].

В настоящее время градостроительные и историко-композиционные исследования в основном определяются системой историко-стилистических, визуальных, композиционных, морфологических... и т.д. изучений. В предложенной статье намечены исследования более обобщающего уровня – на уровне особых типов формируемой среды, определяемой особенностями центральности и особыми градостроительно-средовыми параметрами. Проведенные исследования показали, что в Санкт-Петербурге и Санкт-Петербургской агломерации с 1712 г. целенаправленно формировались такие типы среды, охватывающие все градостроительно-ландшафтные ситуации: от центра (ядра) города до сельских окрестностей. Пространственных.

4. Заключение

Каждый из таких выявленных типов среды (средовых типозон) имел свою систему морфологических типов и параметров (даже в рамках одних шкал параметров, например

– высотность и этажность; размерности кварталов, участков, зданий, сооружений; система детализация архитектурных объектов и т.д.), которые и позволяли выделить конкретный тип (типозону) в особый, четко осознаваемых («считываемый») тип среды. Начиная с 1712 г. в системе Санкт-Петербурга и его агломерации формировалась следующая система таких средовых типозон: ядро центра – периферия центра – периферия города – пригороды – сельские местности. И в каждой из них шла кристаллизация особых параметров и морфологии формирующих их элементов.

Предложенная статья может привлечь внимание исследователей по истории градостроительства и архитектуры, а также для современных урбанистов, градостроителей, архитекторов и дизайнеров.

Список литературы /References

1. Исторический центр Санкт-Петербурга и связанные с ним группы памятников. Культурные маршруты Санкт-Петербурга. СПб.: «Папирус», 2019. – 136 с., ил. [The historical center of St. Petersburg and related groups of monuments. Cultural routes of St. Petersburg. St. Petersburg: “Papyrus”, 2019. – 136 p.].
2. Изабель де Мадариага. Россия в эпоху Екатерины Великой / Перевод с английского яз. Н.Л. Лужецкой. М.: Новое литературное обозрение, 2002. – 976 с. – ил. [Isabel de Madariaga. Russia in the era of Catherine the Great / Translation from English by N.L. Luzhetskaya. M.: New Literary Review, 2002. – 976 p.].
3. Масси С. Павловск. Жизнь русского двора / Пер. с английского яз. 3-е изд. СПб.: «Лики России», 1990. – 480 с., ил. [Massie S. Pavlovsk. Life of the Russian court / Trans. from English 3rd ed. St. Petersburg: “Faces of Russia”, 1990. – 480 p.].
4. Ханковска Р. Храм Святой Екатерины в Санкт-Петербурге. / Перевод с польского яз. / Подготовка текста у публикации Т.И. Николаевой. СПб.: «Чистый лист», 2001. – 239 с., ил. [Hankovska R. Church of St. Catherine in St. Petersburg. / Translation from Polish. / Preparation of text for the publication of T.I. Nikolaeva. St. Petersburg: “Clean Sheet”, 2001. – 239 p.].
5. Norman, Geraldine. The Hermitage. The Biography of a Great Museum. New York: Fromm international Publishing, 1998. [Norman, Geraldine. The Hermitage. The Biography of a Great Museum. New York: Fromm international Publishing, 1998].
6. Massie, Robert K. Peter the Great. His Live and World. New York: Balantine Books, 1981. [Massie, Robert K. Peter the Great. His Live and World. New York: Balantine Books, 1981.].
7. Жизнь во дворце. Взгляд изнутри. XXVIII Царскосельская научная конференция. СПб.; ГМИ «Царское село», Изд. «Русская коллекция». 2022. – 688 с., ил. [Life in the palace. A look from the inside. XXVIII Tsarskoye Selo scientific conference. St. Petersburg; State Historical Museum “Tsarskoye Selo”, Publishing house “Russian Collection”. 2022. – 688 p.].
8. Лисовский В.Г. Три века архитектуры Санкт-Петербурга. Тт. 1-2. СПб.: Изд. «Коло», 2021-2022. – 528, 544 с., ил. [Lisovsky V.G. Three centuries of architecture in St. Petersburg. Vol. 1-2. SPb.: Publishing house “Kolo”, 2021-2022. – 528 p., 544 p.].
9. Сто страниц из истории охраны памятников Ленинграда – Санкт-Петербурга. 1918-2018. СПб.: КГИОП, «Фаворит», 2018. – 240 с., ил. [One hundred pages from the history of the protection of monuments of Leningrad - St. Petersburg. 1918-2018. St. Petersburg: KGIOP, “Favorite”, 2018. – 240 p.].
10. Ходасевич Г.Д. Агатые комнаты Екатерины II в Царском Селе / Послесловие Д.О. Швидковского. М.: Фонд «Связь эпох», «Кучково поле Музеон», 2019. – 192 с., ил. [Khodasevich G.D. Agate rooms of Catherine II in Tsarskoe Selo / Afterword by D.O. Shvidkovsky. M.: Foundation “Link of Epochs”, “Kuchkovo Pole Muzeon”, 2019. – 192 p.].
11. Reconstruction and Restoration of Architectural Heritage 2020 / Edited by Sergey Sementsov, Alexandr Leontyev, Santiago Huerta Et Ignacio Menendez Pidal de Navascues. 2020. Taylor & Francis Group, London. -270 p.

12. Кириков Б.М. Памятники архитектуры Санкт-Петербурга. СПб.: Изд. «Коло», 2019. – 464 с., ил. [Kirikov B.M. Architectural monuments of St. Petersburg. SPb.: Publishing house “Kolo”, 2019. – 464 p.].
13. Утраченные храмы Санкт-Петербурга. Опыт архитектурной реконструкции / Автор-составитель С.В. Семенцов. СПб.: Изд. Е.А. Петелина, 2012. – 200 с., ил. [Lost churches of St. Petersburg. Experience in architectural reconstruction / Compiled by S.V. Sementsov. SPb.: Publishing house E.A. Petelina, 2012. – 200 p.].
14. Анциферов Н.П. Душа Петербурга: Петербург Достоевского. Быль и миф Петербурга. Л.: Агентство «ЛИРА», 1990. – 249 с., ил. (Репринт. изд. 1921 г.). [Antsiferov N.P. Soul of St. Petersburg: Dostoevsky's Petersburg. True story and myth of St. Petersburg. L.: Agency "LIRA", 1990. - 249 p.].
15. Семенцов С.В. Проект города на о. Котлин (1712 г.) как начало регулярного зодчества Санкт-Петербурга и России // Третьи Лупповские чтения. Доклады и сообщения. Санкт-Петербург, 12 мая 2010 г. СПб.: Библиотека РАН, 2011. С. 16-37. [Sementsov S.V. City project on the island. Kotlin (1712) as the beginning of regular architecture in St. Petersburg and Russia // Third Luppov Readings. Reports and messages. St. Petersburg, May 12, 2010. St. Petersburg: Library of the Russian Academy of Sciences, 2011. P. 16-37.].
16. Семенцов С.В. Этапы формирования пространственной среды Санкт-Петербурга. Ч. 1. Историческое развитие кварталов и их регламентация // «Вестник гражданских инженеров». 2006. 2 (7). Июнь. С. 15-20; Ч. 2. Историческое развитие участков (система разбивки и застройки участков) и их регламентация // «Вестник гражданских инженеров». 2006. 3 (8). Сентябрь. С. 21-26. [Sementsov S.V. Stages of formation of the spatial environment of St. Petersburg. Part 1. Historical development of neighborhoods and their regulation // “Bulletin of Civil Engineers”. 2006. 2 (7). June. P. 15-20; Part 2. Historical development of sites (system of layout and development of sites) and their regulation // “Bulletin of Civil Engineers”. 2006. 3 (8). September. P. 21-26.].
17. Алексеева М.А. Михайло Махаев – мастер видового рисунка XVIII века. СПб.: Изд. «Журнал «Нева», 2003. – 448 с., ил. [Alekseeva M.A. Mikhailo Makhaev is a master of landscape drawing of the 18th century. SPb.: Publishing house “Magazine “Neva”, 2003. – 448 p.].
18. Семенцов С.В., Красникова О.А., Мазур Т.П., Шрадер Т.А. Санкт-Петербург на картах и планах первой половины XVIII века. СПб.: Туристический и культурный центр «ЭКЛЕКТИКА», 2004. С. 182-398, ил. [Sementsov S.V., Krasnikova O.A., Mazur T.P., Schrader T.A. St. Petersburg on maps and plans of the first half of the 18th century. SPb.: Tourist and cultural center "ELECTICA", 2004. P. 182-398.].
19. Семенцов С.В., Марголис А.Д. Санкт-Петербург. Планы и карты. СПб.: ЗАО «Карта» ЛТД, 2004. С. 116-117. [Sementsov S.V., Margolis A.D. Saint Petersburg. Plans and maps. St. Petersburg: ЗАО "Karta" LTD, 2004. P. 116-117.].

Информация об авторах

Семенцов Сергей Владимирович, доктор архитектуры, профессор, советник РААСН, Российская академия архитектуры и строительных наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

E mail: s.sementsov@mail.ru

Славина Татьяна Андреевна, доктор архитектуры, профессор, академик РААСН, Российская академия архитектуры и строительных наук, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

E mail: slavina.t@list.ru

Information about the authors

Sergey V. Sementsov, Doctor of Architecture, Professor, adviser of RAACS, Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Saint Petersburg, Russian Federation.

Email: s.sementsov@mail.ru

Tatyana A. Slavina, doctor of Architecture, professor, academician of RAACS, Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Saint Petersburg, Russian Federation.

Email: slavina.t@list.ru

УДК: 72.03

DOI: 10.52409/20731523_2023_3_214

EDN: SPMYCE



Проблема эрозии фасадов исторических зданий от воздействий косого дождя

А.М. Сулейманов¹, А.Г. Хабибулина¹, А.С. Петров¹

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. *Постановка задачи.* Эрозия поверхности строительных материалов является распространенным явлением, наблюдаемым на фасадах исторических зданий. Климатические изменения могут привести к увеличению частоты и интенсивности экстремальных осадков, что может усилить эрозионные эффекты на фасадах зданий из-за воздействия косого дождя. Целью исследования является сравнение экспериментальных методов оценки степени эрозии поверхности исторических строительных материалов под воздействием косых дождей. Задачами исследования являются обзор современных методов измерения влияния дождя с ветром на поверхностную эрозию и снижение прочности кирпича и известняка; анализ наиболее известных методов оценки степени эрозии поверхности строительных материалов; предложение рекомендаций по защите и реставрации поврежденных фасадов объектов культурного наследия из-за воздействия косого дождя.

Результат. На основе анализа современных исследований, предложены рекомендации по защите и реставрации поврежденных фасадов объектов культурного наследия из-за воздействий косого дождя. В Казанском государственном архитектурно-строительном университете создан испытательный комплекс «Герметичная камера» позволяющий, с учётом передового зарубежного опыта, проводить дальнейшие экспериментальные исследования по оценке влияния воздействий косого дождя на эрозию поверхности и снижения прочности строительных материалов.

Выводы. Значимость полученных результатов для архитекторов и проектировщиков состоит в том, что использование методов оценки степени повреждения фасадов памятников архитектуры из-за воздействий косых дождей позволяют осуществлять мониторинг и выработать меры по защите объектов культурного наследия.

Ключевые слова: косой дождь, эрозия каменной кладки, защита фасадов памятников архитектуры.

Для цитирования: Сулейманов А.М., Хабибулина А.Г., Петров А.С. Проблема эрозии фасадов исторических зданий от воздействий косого дождя // Известия КГАСУ, 2023, № 3(65), с. 214-224, DOI: 10.52409/20731523_2023_3_214, EDN: SPMYCE

The problem of erosion of facades of historic buildings from wind impact of rain

A.M. Suleymanov¹, A.G. Khabibulina¹, A.S. Petrov¹

¹ Kazan State University of Architecture and Engineering
Kazan, Russian Federation

Abstract. Problem statement. The relevance of the study is due to the fact that surface erosion of building materials is a common phenomenon observed on the facades of historic buildings. Climatic changes may lead to an increase in the frequency and intensity of extreme precipitation events, which may increase erosion effects on building facades due to the impact of oblique rainfall. The aim of the study is to compare experimental methods for assessing the degree of surface erosion of historic building materials under the influence of oblique rainfall. The objectives of the study are to review modern methods of measuring the effect of rain with wind on surface erosion and strength reduction of bricks and limestone; to analyze the most known methods of assessing the degree of erosion of the surface of building materials; to propose recommendations for the protection and restoration of damaged facades of cultural heritage objects due to the impact of oblique rain.

Results. Based on the analysis of modern research, recommendations for the protection and restoration of damaged facades of cultural heritage objects due to the effects of oblique rain are proposed. Kazan State University of Architecture and Engineering has created a testing complex «Sealed chamber», which allows conducting further experimental research to assess the impact of oblique rain on surface erosion and strength reduction of building materials taking into account the advanced foreign experience.

Conclusions. The significance of the results obtained for architects and designers is that the use of the methods for assessing the degree of damage to the facades of architectural monuments due to the effects of oblique rainfall allow monitoring and developing measures to protect cultural heritage sites.

Keywords: wind-driven rain, erosion of masonry, protection of facades of monuments.

For citation: Suleymanov A.M., Khabibulina A.G., Petrov A.S. The problem of erosion of facades of historic buildings from wind impact of rain // News KSUAE, 2023, № 3(65), p. 214-224, DOI: 10.52409/20731523_2023_3_214, EDN: SPMYCE

1. Введение

Эрозия исторических строительных материалов, вызванная ветром и дождем, является глобальной проблемой. Эрозия разрушает материалы, повреждает поверхности объектов культурного наследия (ОКН), повышает риск проникновения воды в пористые материалы [1-3]. Большое количество осадков, особенно в более теплом климате, увеличивает коррозию металлов и стекловидных материалов и отслаивание поверхности карбонатных камней, например известняка и мрамора [4]. Коррозия вызывает постепенное ухудшение свойств материалов под действием воды, обычно вместе с отложением солей (обычно хлоридов), что более распространено в присутствии кислотных дождей, и более высоких атмосферных концентраций углекислого газа (CO₂) для карбонатных камней.

Кислотные дожди встречаются во многих странах мира, но наиболее подвержены им те регионы, где высокий уровень промышленного загрязнения воздуха. Среди таких стран можно назвать Соединенные Штаты и Канаду, Восточную Европу, включая Польшу, Германию, Чехию, Швецию, Норвегию и Финляндию, а также Китай и Индию. Кислотные дожди причиняют серьезный ущерб окружающей среде и культурному наследию этих стран. Для фасадов зданий в странах, где ожидается увеличение количества осадков (например, в северной Европе), существует риск того, что это вызовет еще большую коррозию каменных поверхностей зданий из портового известняка и низкопористых карбонатных пород, таких как мрамор и плотный известняк.

«Чистые» осадки имеют рН около 5,6 (слегка кислые из-за углекислого газа в атмосфере) и вызывают деградацию карбонатных камней – явление, известное как карстовый эффект. Поскольку атмосферная концентрация CO_2 увеличивается из-за деятельности человека, ученые предсказывают увеличение регрессии карста карбонатных камней из-за дальнейшего окисления осадков. Коррозию каменных поверхностей исторических зданий часто связывают с загрязнением окружающего воздуха. Загрязнение воздуха включает диоксид серы (SO_2) и оксиды азота (NO_x), которые реагируют с водой и образуют серную и азотную кислоты. Их присутствие может еще больше снизить рН дождевой воды, вызывая кислотные осадки [5-7].

Изменения влажности влияют на рост микроорганизмов на каменных и деревянных материалах памятников архитектуры. Ряд исследований показывают, что увеличение относительной влажности в более теплом климате усугубляет биологическую деградацию ОКН. Длительные периоды влажности вместе с повышением температуры создают условия, благоприятные для увеличения биологической активности, способствующих разрушению деревянных исторических зданий из-за накопления и разложения биомассы грибами, водорослями, плесенью и лишайниками, а также насекомыми. Исследователи определяют температуру, влажность воздуха и содержание влаги в древесине в качестве трех основных переменных, ведущих к биологическому износу из-за грибов, плесени и насекомых, при этом на содержание влаги в древесине влияют увеличение количества осадков, ветро-дождевая нагрузка и наводнения [8-10].

Когда стены намокают под осадками или из-за подсоса влаги из грунта, вода проникает в поры кирпича и раствора. Растворимые соли могут растворяться и рекристаллизоваться при изменении температуры и влажности, создавая циклы кристаллизации соли. Соли будут выходить из пор на поверхность стены и образовывать белый или цветной налет – высолы. Некоторые соли могут изменять свою структуру во время цикла гидратации и дегидратации, например, сульфат натрия (тенардит) и декагидрат сульфата натрия (мирабилит). Фаза мирабилита может оказывать очень высокое кристаллизационное давление на поры в камне, такие повторяющиеся циклы могут вызвать стресс и, в конечном итоге, разрушение. Колебания осадков и температуры при наличии растворимых солей в каменных материалах приведут к увеличению числа циклов кристаллизации солей и, следовательно, к большему ущербу ОКН. Содержание солей в строительном материале или конструкции также может увеличиваться за счет увеличения количества осадков, что приводит к насыщению почв в сочетании с капиллярным действием. Даже небольшие колебания относительной влажности могут оказать существенное влияние на количество циклов кристаллизации вредных солей. Когда относительная влажность падает ниже точки растворения некоторых растворимых солей, они переходят из раствора в кристаллическую фазу. Механизм повреждения заключается в том, что при кристаллизации солей изменение объема оказывает механическое воздействие на исторические строительные материалы (например, субфлуоресценция) [11, 12].

Эрозия поверхности является обычным явлением, наблюдаемым на фасадах исторических зданий. В последнее время исследования изменения климата и его возможного влияния на увеличение количества экстремальных осадков возродили научный интерес к определению риска ускоренных эрозионных эффектов. В зарубежных исследованиях воздействие косого дождя (ВКД или WDR – Wind-driven rain), рассматривается как один из важных факторов при проектировании прочных и устойчивых к изменению климата зданий. Согласно классификации ГОСТ Р 53613-2009, косой дождь является сочетанием дождя и ветра. Негативные последствия проникновения влаги, вызванные ВКД, включают деградацию материала поверхности, повреждение от мороза, выцветание от солей, структурное растрескивание, внутренние повреждения и т.д. Нагрузки из-за ВКД на фасады зданий пропорциональны осадкам и представляют собой основной источник влаги и эрозионное физическое воздействие на фасады зданий. Исходя из этого, исследование методов оценки, которые количественно определяют серьезность эрозии, является важным шагом для разработки рекомендаций по защите и реставрации поврежденных фасадов ОКН [13, 14].

На сегодняшний день для измерения и моделирования ВКД на фасады зданий исследователями предлагаются следующие методы: экспериментальные, полуэмпирические и численные с помощью вычислительной гидродинамики (ВГД или CFD – Computational Fluid Dynamics) [15, 16]. Основное преимущество экспериментальных методов в том, что они позволяют проводить исследования влияния ВКД на объект в реальных условиях (что повышает достоверность результатов) и проверять полуэмпирические и численные методы [17, 18]. Авторами в рамках данной работы, на основе анализа исследований последних лет, рассматриваются наиболее известные и общепризнанные за рубежом экспериментальные методы оценки ВКД на поверхности фасадов ОКН.

Актуальность исследования обусловлена тем, что эрозия поверхности строительных материалов является распространенным явлением, наблюдаемым на фасадах памятников архитектуры. Деструктивное воздействие внешней среды приводит к ухудшению внешнего вида, снижению прочности и долговечности материалов, а также к повышению риска развития плесени и повышения влажности внутри помещений. Климатические изменения могут привести к увеличению частоты и интенсивности экстремальных осадков, что может усилить эрозионные эффекты на фасадах зданий из-за ВКД.

Целью исследования является сравнение экспериментальных методов оценки степени эрозии поверхности строительных материалов из-за ВКД.

Задачами исследования являются:

- обзор современных методов измерения влияния ВКД на поверхностную эрозию и снижение прочности кирпича и известняка;
- анализ наиболее известных методов оценки степени эрозии поверхности строительных материалов из-за ВКД;
- предложение рекомендаций по защите и реставрации поврежденных фасадов объектов культурного наследия из-за ВКД.

2. Материалы и методы

На основе анализа исследований последних лет, можно выделить следующие наиболее известные и признанные экспериментальные методы оценки степени эрозии поверхности исторических строительных материалов из-за ВКД:

1. Натурное измерение ВКД в определенных местах на фасаде здания позволяющее оценить воздействие ВКД на поверхность и риски эрозии. Для этого используются специальное оборудование для сбора метеорологических данных, датчики и коллекторы дождя [18]. На следующем этапе, для проверки данных полевых измерений и прогнозирования ВКД предлагается использование численного моделирования с помощью программного комплекса ВГД [19].

2. Использование в лабораторных условиях системы имитирующей ВКД для образцов строительных материалов на испытательном стенде, позволяющее проводить контролируемые эксперименты с разными типами покрытий фасадов. Для имитации ВКД применяются специальные насосы и форсунки. Фиксации данных производится с помощью высокоскоростной камеры, цифрового и компьютерного оборудования. После испытания образцы диагностируются на степень деградации поверхностной структуры и определяется остаточная прочность материалов [20].

На основании результатов, полученных с применением натуральных измерений ВКД можно сделать следующие выводы [18]:

- неравномерность эрозии, степень загрязнения поверхности фасадов здания связана с неоднородностью распределения, направлений ВКД из-за объёмно-планировочных особенностей строения;
- влияние ВКД зависит от локальных полей потока воздуха, связанных с геометрией здания, окружающей топографией и близости других препятствий;
- наибольшее количество дождя попадает на стену, обращенную против ветра, увеличивается с высотой здания и больше на угловых секциях, чем центральных;
- интенсивность ВКД, может быть лучшим индикатором эрозии поверхности здания, чем объем выпавших осадков.

В рамках исследования, дополнительно было проведено численное моделирование влияния ВКД с использованием ВГД, включающее следующие вычисления: расчет поля воздушного потока вокруг здания, определение траекторий капель дождя и оценку общего ВКД на основе метеорологических данных [19]. Данные численного моделирования согласуются с результатами полевых испытаний.

Измерения ВКД на различные материалы каменной кладки в лабораторных условиях демонстрируют следующее [20]:

- степень воздействия капель воды определенного диаметра, скорости и угла удара. Это помогает понять тенденцию высвобождения энергии капель воды на поверхности материалов;

- количество воды, удерживаемое поверхностью образца после удара капли. Во время дождя не все капли прилипают к поверхности и представляют собой источник влаги для стены. Часть капель после удара о поверхность отскакивают или разбрызгиваются;

- увеличение размера капли воды приводит к большему разбрызгиванию и стеканию после удара о поверхность;

- влияние шероховатости поверхности материала на поглощение влаги при ударе капель дождя. Чем шероховатее поверхность, тем больше происходит разбрызгивание капель;

- максимальный выброс кинетической энергии, инициирующий потенциальное истощение поверхности материала, происходит при угле воздействия капли 90° (перпендикулярно стене);

- интенсивность эрозии поверхности и снижения прочности материала в зависимости от параметров дождя и свойств материалов.

3. Результаты и обсуждение

Мониторинг метеорологических данных является важным инструментом для оценки ВКД на фасад здания, имеющего историческую ценность. Данный мониторинг позволяет определить частоту, интенсивность и продолжительность ВКД для данной местности. Это может помочь инженерам, архитекторам и реставраторам спрогнозировать возможные негативные ситуации и определить требуемые первоочередные меры защиты для сохранения ОКН от ВКД (рис. 1).



Рис. 1 – Метеорологических данные для оценки ВКД на здание – г. Казань, Россия (иллюстрация авторов)

Fig. 1. Meteorological data for the assessment of WDR on the building – Kazan, Russia (Illustration by the authors)

На рисунке 1 представлены метеорологических данные для оценки ВКД на здание

на примере г. Казани¹. Расположение метеорологической станции: широта – 55.73, долгота – 49.20, высота над уровнем моря – 119 м. Для оценки ВКД приняты данные периода с положительными средними месячными температурами (апрель-октябрь). На комбинированном графике представлены максимальные суточные суммы выпавших осадков (мм) и количество дождливых дней. Также при расчетах ВКД необходимо учитывать повторяемость и скорость ветра при различных его направлениях.

На линейчатой диаграмме отражены повторяемость (%) и скорость ветра (м/с, данные указаны в скобках) при различных направлениях ветра.

Регулярный мониторинг, обслуживание и реставрация являются неотъемлемым основанием для сохранения ОКН. Разработка мер по защите фасадов памятников историко-архитектурного наследия от ВКД – это сложный и многогранный процесс, который требует тщательных исследований и учета множества факторов:

- историческое значение памятника и его уникальность, так как некоторые методы консервации могут негативно влиять на оригинальность и аутентичность ОКН;
- климатические условия региона, интенсивность атмосферных воздействий;
- конструктивные особенности объекта, которые могут повлиять на выбор технических решений при реставрации;
- тип исторических строительных материалов, от которых зависит уровень сопротивления атмосферным воздействиям, долговечность и определение подходов к консервации;
- степень повреждения объекта – например для фасадов с небольшими повреждениями достаточно применять методы профилактики и регулярного ухода, в то время как при серьезных дефектах может потребоваться капитальный ремонт;
- финансовые затраты – технически сложные методы консервации могут быть слишком дорогостоящими.

Авторами предлагаются следующие основные способы по защите фасадов зданий ОКН от ВКД.

В последние десятилетия интерес к разработке защитных покрытий для ОКН значительно возрос. В основном это вызвано повышением требований к сохранению ОКН, что, соответственно, определило разработку новых защитных продуктов, с использованием научно-технических достижений. В настоящее время, результаты исследований в области защитных покрытий для фасадов памятников архитектуры сделали большой шаг вперед – от акриловых смол, использовавшихся в конце прошлого века, до применения биоматериалов и наночастиц [21].

Защитные покрытия для фасадов ОКН должны соответствовать следующим основным критериям:

- эффективно предохранять от воздействия окружающей среды;
- быть совместимыми с аутентичным материалом;
- сохранять первоначальный внешний вид, цвет, прочность и долговечность исторического материала; минимизировать риск повреждения и коррозии;
- предоставлять возможность легкой очистки и ухода за поверхностью здания;
- исключать токсичность состава; обладать длительным сроком службы.

На сегодняшний день можно выделить следующие инновационные защитные покрытия для фасадов зданий от деструктивных воздействий окружающей среды [22]:

- гибридные органо-неорганические золь-гели, обладающие прозрачностью, водоотталкивающими свойствами, оптимальной степенью эластичности и стабильностью при тестах на износ и коррозию;
- силиконовые соединения, демонстрирующие хорошие антикоррозийные свойства;
- биопленки и биополимеры, применяемые для защиты строительных материалов от загрязнений, которые при необходимости легко удаляются;
- наночастицы используемые для улучшения защитных свойств покрытий.

Перспективным направлением является применение защитных покрытий фасадов от ВКД, созданных с использованием нанотехнологий. Преимущество нанопокрывтий, в

¹ Научно-прикладной справочник «Климат России». ВНИИГМИ-МЦД. URL: <http://aisori-m.meteo.ru/climsprn> (дата обращения: 01.01.2023).

том, что их применение содействует приобретению строительным материалам ряда важных свойств: устойчивости к атмосферным воздействиям, ультрафиолетовому излучению, механическим повреждениям; воздействию экстремальных температур; водо- и грязеотталкиванию; воздухопроницаемости и экологичности; препятствию распространения плесени, грибка, микроорганизмов. Например, исследования подтверждают эффективность использования гидрофобных покрытий на основе полимеров и наночастиц оксидов TiO_2 (диоксид титана) или SiO_2 (диоксид кремния) для защиты фасадов памятников архитектуры из камня от воздействия негативных факторов внешней среды [23]. Применение нанопокровов, на сегодняшний день, ограничено их высокой стоимостью, сложностью производства и требованиями дополнительной экспертной оценки.

При принятии решения о том, какое защитное покрытие для защиты фасада исторического здания от ВКД использовать, реставратору необходимо учитывать следующие основные факторы: климатические условия региона; возраст, состояние, строительный материал, характерные особенности фасада, декоративных деталей; ожидаемый срок службы покрытия и др. Сравнительный анализ различных покрытий может помочь выбрать оптимальный вариант исходя из конкретных требований проекта реставрации.

ВКД как значительный источник влаги способствует эрозии растворных швов и приводит к увеличению влагопереноса в толщу каменной кладки. Соответственно, в качестве меры по уменьшению проникновения влаги/воды, связанного с ВКД, эффективен способ, заключающийся в реставрации швов эродированного раствора [24]. При этом важно учитывать состав и историческую технологию изготовления заменяемых материалов. Включение в конструкцию новых составов, принципиально различающихся по физико-механическим и химическим свойствам, может привести к деструкции исторического строительного материала. При анализе состава оригинального раствора необходимо использовать химические или петрографические методы. Некоторые исторические растворы, особенно, в зданиях, построенных в 19 веке, были окрашены, чтобы соответствовать цвету кирпича, камня или контрастировать с ними. Наиболее используемые в прошлом пигменты молотый кирпич и уголь. При реставрации в составе пигментов, чтобы предотвратить выцветание и блеклость, возможно использовать синтетические минеральные оксиды, которые устойчивы к щелочам и солнечному свету. Реставрация швов кладки, является трудоемкой и дорогостоящей мерой, но оправданной для ОКН [25].

Одним из способов эффективной защиты фасадов исторических памятников от ВКД является поддержание в надлежащем состоянии карнизных свесов кровли здания. При этом необходимо учитывать климатические условия района строительства, такие как интенсивность осадков, преобладающая скорость, направление и угол воздействия ветра. Свес особенно эффективен и значительно снижает воздействие ВКД на верхнюю часть фасада строения. Большой свес обеспечивает лучшую защиту. Защитная зона может распространяться до 25 % высоты здания от линии крыши при вылете 0,6-1,2 м. Учитывая, что более 50 % общего количества осадков, падающих на фасад, приходится на верхние 15 % поверхности стены, свесы, которые могут укрыть до 30 % строения, являются лучшей защитой от ВКД. Эффективность возрастает при косых ветрах, но снижается с увеличением скорости ветра [26].

Деревья, как естественные барьеры, причем не затрагивающие аутентичность ОКН, могут иметь важное значение при защите фасадов зданий от ВКД. Однако, для эффективного использования деревьев в качестве барьера от ВКД необходимо учитывать следующие факторы:

- климатические условия региона – метеорологические данные и особенности местности. Например, если местность характеризуется частыми дождями или сильными ветрами, то необходимо подобрать наиболее подходящие деревья, которые могут выдерживать такие условия;

- скорость и направление ветра – растения, размещенные вблизи зданий, могут оказывать влияние на скорость и направление ветра вокруг зданий. Деревья должны быть размещены таким образом, чтобы создавать наиболее эффективный барьер от ВКД.

Также, необходимо учитывать характеристики конкретных видов растений, такие как высота, ширина кроны, густота листвы и т.д.;

- интенсивность дождя – определенные виды растений могут лучше защищать здание от сильных ливней. Например, деревья с плотной листвой и кроной могут обеспечить более эффективную защиту, чем деревья с разреженной листвой;

- ориентация и геометрия здания – при посадке деревьев необходимо учитывать конфигурацию здания, ориентацию фасадов по сторонам света и повторяемость различных направлений ветра для данной местности.

В Казанском государственном архитектурно-строительном университете (КГАСУ), на базе научно-исследовательской лаборатории «Архитектурной физики», в соответствии с ГОСТ 26602.2-99, спроектирован и смонтирован стационарный испытательный комплекс «Герметичная камера». Комплекс предназначен для создания, поддержания и изменения давления воздуха до 700 Па во временном интервале от 1 с до 10 мин., а также создания процесса дождевания и обеспечивает абсолютную герметичность. Комплекс состоит из следующего технического оборудования: компрессоров, воздушных насосов, регуляторов давления, перепадов давления, расхода воздуха, запорной арматуры. Испытательный комплекс оснащен единым пультом управления с системой компьютерной обработки данных, позволяющим обеспечить автоматическое управление процессом испытания и предоставления результатов в виде протокола (рис. 2). Оснащение испытательного комплекса «Герметичная камера» позволяет, с учётом передового зарубежного опыта, проводить дальнейшие экспериментальные исследования по оценке влияния ВКД на эрозию поверхности и снижения прочности строительных материалов.



Рис. 2. Испытательный комплекс «Герметичная камера» – КГАСУ, г. Казань, Россия
(иллюстрация авторов)

Fig. 2. «Hermetic chamber» test facility – KSUAE, Kazan, Russia (Illustration by the authors)

4. Заключение

По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

1. На основе анализа современных исследований, были выделены наиболее известные методы оценки степени эрозии поверхности строительных материалов из-за ВКД.
2. Проведён критический анализ рассмотренных методов с учётом репрезентативности получаемых результатов.
3. Предложены рекомендации по защите и реставрации поврежденных фасадов объектов культурного наследия из-за ВКД.
4. Данная работа может послужить основой для дальнейшей апробации методов учета ВКД при реконструкции и реставрации ОКН.

Список литературы/ References

1. Xavier R., Chiara B. Risk protection for cultural heritage and historic centres: Current knowledge and further research needs // *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2021. Vol. 67. 102652. DOI: 10.1016/j.ijdr.2021.102652.
2. Bonazza A., Sardella A., Kaiser A., Cacciotti R., De Nuntiis P., Hanus C., Maxwell I., Drdácý T., Drdácý M. Safeguarding cultural heritage from climate change related hydrometeorological hazards in Central Europe // *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2021. Vol. 63. 102455. DOI: 10.1016/j.ijdr.2021.102455.
3. Sesana E., Gagnon A., Ciantelli C., Cassar J., Hughes J. Climate change impacts on cultural heritage: A literature review // *WIREs Climate Change*. 2021. No 12 (1). 29 p. DOI: 10.1002/wcc.710.
4. Camuffo D. Climate change, human factor, and risk assessment // *Microclimate for cultural heritage*. 2019. P. 303–340. Elsevier.
5. Spezzano P. Mapping the susceptibility of UNESCO World Cultural Heritage sites in Europe to ambient (outdoor) air pollution // *Science of The Total Environment*. 2021. Vol. 754. 142345. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142345.
6. Berdnikov V., Stroganov V., Vdovin E., Stroganov I., Gasilov V. Corrosion Processes in Building Materials, Products and Structures // *Proceedings of STCCE 2022. STCCE 2022. Lecture Notes in Civil Engineering*. 2023. Vol. 291. Springer, Cham. P. 465–481. DOI: 10.1007/978-3-031-14623-7_40.
7. Vidović K., Hočevar S., Menart E., Drventić I., Grgić I., Kroflič A. Impact of air pollution on outdoor cultural heritage objects and decoding the role of particulate matter: a critical review // *Environmental Science and Pollution Research*. 2022. Vol. 29. P. 46405–46437. DOI: 10.1007/s11356-022-20309-8.
8. Sterflinger K., Little B., Pinar G., Pinzari F., de los Rios A., Gu J.-D. Future directions and challenges in biodeterioration research on historic materials and cultural properties // *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2018. Vol. 129. P. 10–12. DOI: 10.1016/j.ibiod.2017.12.007.
9. Строганов В.Ф., Сагадеев Е.В., Савичева К.В., Шаехов Р.А., Бикмухаметова А.Р., Хайрутдинова Д.Р., Нигматзянова Р.Р., Нигматуллина Г.Р. Использование модельных сред для оценки процессов биоповреждения строительных материалов // *Химия и инженерная экология : XVII Международная научная конференция*. 2017. Казань: Изд-во «Бриг». С. 168-171 [Stroganov V.F., Sagadeev E.V., Savicheva K.V., Shayekhov R.A., Bismukhametova A.R., Khairutdinova D.R., Nigmatzyanova R.R., Nigmatullina G.R. Use of model environments to assess the processes of biodegradation of construction materials // *Chemistry and Engineering Ecology: XVII International Scientific Conference*. 2017. Kazan: Brig Publishing House. P. 168-171].
10. Prieto B., Vázquez-Nion D., Fuentes E., Durán-Román A.G. Response of subaerial biofilms growing on stone-built cultural heritage to changing water regime and CO2 conditions // *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2020. Vol. 148. 104882. DOI: 10.1016/j.ibiod.2019.104882.
11. Stryzewska T., Kańka S. The Effects of Salt Crystallization in Ceramic Bricks in Terms of Line Deformations // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 193. P. 120–127. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.06.194.
12. Menéndez B. Estimators of the impact of climate change in salt weathering of cultural heritage // *Geosciences*. 2018. No 8 (11). 401. DOI: 10.3390/geosciences8110401.
13. Никитин В.И., Кофанов В.А. Об учете косо́го дождя и капиллярных свойств материалов при оценке влагосодержания ограждающих конструкций // *Вестник БрГТУ. Строительство и архитектура*. 2013. № 1 (79). С. 91–95 [Nikitin V.I., Kofanov V.A. Consideration of driving rain and capillary properties of materials when assessing moisture enclosing structures // *Vestnik of BrSTU. Construction and architecture*. 2013. No 1 (79). P. 91–95].
14. Куприянов В.Н., Петров А.С., Чебышева Д.Г. Влияние дождей на процесс старения и разрушения материалов наружных стен. расчет количества дождей // *Эксперт: теория и практика*. 2020. № 1 (4). С. 28–32 [Kupriyanov V.N., Petrov A.S., Chebysheva D.G.

- Rain impact on aging and destruction of external walls materials. the amount of rain calculation // *Expert: theory and practice*. 2020. No 1 (4). P. 28–32].
15. Lu B., Fang J., Li Y., Zhang H., Gao Y., Feng C. Accuracy of semi-empirical models for wind-driven rain using different data processing methods for wind velocity and direction // *Building and Environment*. 2023. Vol. 237. 110300. DOI: 10.1016/j.buildenv.2023.110300.
 16. Gholamalipour P., Ge H., Stathopoulos T. Wind-driven rain (WDR) loading on building facades: A state-of-the-art review // *Building and Environment*. 2022. Vol. 221. 109314. DOI: 10.1016/j.buildenv.2022.109314.
 17. Van Linden S., Van Den Bossche N. Review of rainwater infiltration rates in wall assemblies // *Building and Environment*. 2022. Vol. 219. 109213. DOI: 10.1016/j.buildenv.2022.109213.
 18. Tang W., Davidson C.I., Finger S., Vance K. Erosion of limestone building surfaces caused by wind-driven rain: 1. Field measurements // *Atmospheric Environment*. 2004. Vol. 38. Issue 33. Pp. 5589–5599. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2004.06.030.
 19. Tang W., Davidson C.I. Erosion of limestone building surfaces caused by wind-driven rain: 2. Numerical modeling // *Atmospheric Environment*. 2004. Vol. 38, Issue 33. P. 5601–5609. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2004.06.014.
 20. Erkal A., D'Ayala D., Sequeira L. Assessment of wind-driven rain impact, related surface erosion and surface strength reduction of historic building materials // *Building and Environment*. 2012. Vol. 57. Pp. 336–348. DOI: 10.1016/j.buildenv.2012.05.004.
 21. Stroganov V.F., Amel'chenko M.O., Mukhametrakhimov R.K., Vdovin E.A., Tabaeva R.K. Increasing the Adhesion of Styrene-Acrylic Coatings Modified by Schungite Filler in Protection of Building Materials // *Polymer Science, Series D*. 2022. Vol. 15, No. 2. P. 162–165. DOI: 10.1134/S1995421222020277.
 22. Artesani A., Di Turo F., Zucchelli M., Traviglia A. Recent Advances in Protective Coatings for Cultural Heritage – An Overview // *Coatings*. 2020; No 10 (3). 217. DOI: 10.3390/coatings10030217.
 23. Pino F., Fermo P., Russa M.L., Ruffolo S., Comite V., Baghdachi J., Pecchioni E., Fratini F., Cappelletti G. Advanced mortar coatings for cultural heritage protection. Durability towards prolonged UV and outdoor exposure // *Environmental Science and Pollution Research*. 2016. No 24 (14). Pp. 12608–12617. DOI: 10.1007/S11356-016-7611-3.
 24. Kahangi Shahreza S., Niklewski J., Molnár M. Experimental investigation of water absorption and penetration in clay brick masonry under simulated uniform water spray exposure // *Journal of Building Engineering*. 2021. Vol. 43. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.102583.
 25. Apostolopoulou M., Aggelakopoulou E., Bakolas A., Moropoulou A. Compatible mortars for the sustainable conservation of stone in masonries // *Advanced Materials for the Conservation of Stone*. 2018. Pp. 97–123. Springer. DOI: 10.1007/978-3-319-72260-3_5.
 26. Ge H., Chiu V., Stathopoulos T. Effect of overhang on wind-driven rain wetting of facades on a mid-rise building: Field measurements // *Building and Environment*. 2017. Vol. 118. Pp. 234–250. DOI: 10.1016/j.buildenv.2017.03.034.

Информация об авторах

Сулейманов Альфред Мидхатович, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: sulejmanov@kgasu.ru

Хабибулина Альбина Гомеровна, кандидат экономических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация.

E-mail: albgomer@mail.ru

Петров Артем Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: ruarty@mail.ru

Information about the authors

Alfred M. Suleymanov, doctor of technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: sulejmanov@kgasu.ru

Albina G. Khabibulina, candidate of economical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.

Email: albgomer@mail.ru

Artem S. Petrov, candidate of technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.

Email: ruarty@mail.ru

УДК: 721.05

DOI: 10.52409/20731523_2023_3_225

EDN: SZOHSA



Мансарда. История и современность

Л.М. Кулеева¹, А.М. Сулейманов¹, Т.Ю.Бурова¹, Л.В. Листовская¹

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация: *Постановка задачи.* Актуальность рассматриваемой в данной статье темы определена спецификой современного подхода к рассмотрению комплекса профессиональных вопросов, связанных с проектированием мансард. *Цель исследования-* систематизация трансформаций конструктивных, функционально-планировочных и архитектурных решений объемов мансард в условиях современного строительства. Задачами исследования являются: выделение основных этапов истории развития мансарды в архитектурной практике; выявление вопросов, определяющих формирование мансарды, как архитектурного объема; определение влияния новых материалов и технологий на конструктивное и функционально-планировочное решения мансард. *Результаты.* Исследование показало, что мансарда в процессе своего развития, претерпев объективные изменения в конструктивном и функционально-планировочном решениях, остается актуальной темой архитектурно-дизайнерской практики, раскрываясь в новых вариантах, используя возможности новейших материалов, технологий и конструктивных обоснований.

Выводы. Полученные результаты способствуют формированию алгоритма решения задач в условиях современного проектирования мансард, включая вопросы поиска и обоснования новых архитектурных предложений, но и вопросы реконструктивных мероприятий, связанных с восстановлением исторического наследия.

Ключевые слова: мансарда, конструктивные особенности, разновидности функционального использования, особенности планировочной организации мансард, функционально-технологические элементы мансард

Для цитирования: Кулеева Л.М., Сулейманов А.М., Бурова Т.Ю., Листовская Л.В. Мансарда. История и современность // Известия КГАСУ, 2023, № 3(65), с. 225-233, DOI: 10.52409/20731523_2023_3_225, EDN: SZOHSA

Attic. History and modernity

L.M. Kuleeva¹, A.M. Suleymanov¹, T.Y. Burova¹, L.V. Listovskaya¹

¹Kazan State University of Architecture and Engineering
Kazan, Russian Federation

Abstract: *Statement of the problem.* The relevance of the topic considered in this article is determined not so much by its novelty - the attic, as a space-planning architectural element, has been known since the XVI century, but by the specifics of the modern consideration of a complex of professional issues related to the design of attics. *The purpose* of the study is the systematization of transformations of structural, functional, planning and architectural solutions for the volume of attics in the conditions of modern construction. The objectives of the study are highlighting the main stages of the history of the development of the attic in architectural practice; identification of issues that determine the formation of the attic as an architectural volume; determination of the impact of new materials and technologies on the design and functional planning solutions of attics. *Outcomes.* The study showed that the attic in the process of its development, having undergone objective changes in constructive and functional-planning

solutions, remains a relevant topic of architectural and design practice, revealing itself in new versions, using the capabilities of the latest materials, technologies and design justifications. *Findings.* The results obtained contribute to the formation of an algorithm for solving problems in the conditions of modern design of attics, including issues not only of finding and justifying new architectural proposals and considering the elements of the superstructure of attic floors, but also issues of reconstruction measures related to the restoration of historical heritage.

Keywords: attic, design features, varieties of functional use, features of the planning organization of attics, functional and technological elements of attics.

For citation: Kuleeva L.M., Suleymanov A.M., Burova T.Yu., Listovskaya L.V. Attic. History and modernity// News KSUAE, , 2023, № 3(65), p. 225-233, DOI: 10.52409/20731523_2023_3_225, EDN: SZOHSA

1. Введение

Мансарда является почти обязательным элементом капитального городского строительства со времен Средних веков в городах Западной Европы. При этом, она рассматривалась как форма освоения уже существующего пространства зданий - чердака.

Название *мансарда* впервые было использовано французским архитектором Никола Франсуа Мансара (Nicolas François Mansart, 1598—1666), который решил функционально организовать пространство под крышей замка королевской свиты в Блуа (рис.1), и которое впоследствии было названо в его честь «мансардой»[1]. Проект реконструкции замка был разработан Ф. Мансаром 1635 году. Кроме того, Ф. Мансар считается автором проекта строительства дворца Мезон-Лаффит. Этот дворец дошел до наших дней — в его конструкции используется покатая крыша, которую принято считать первым мансардным перекрытием. Заслуга Ф. Мансара состоит в том, что он придумал и внедрил в строительную сферу крыши ломаной формы. Таким образом, увеличивалась не только высота крыши, но и площадь чердачного помещения.

Мансардное перекрытие изменило традиционный подход к проектированию крыш, принятых в те времена - готических и плоских конструкций итальянского типа. Решение, предложенное Ф. Мансаром, позволило по-новому взглянуть на процесс возведения конструкций крыш и их последующую отделку. В 1664 году король Людовик XIV пригласил Ф. Мансара для проектирования восточного крыла Лувра, однако его участие ограничилось лишь составлением проекта здания.

За всю историю своего становления и развития мансарда не только менялась конструктивно и функционально, как подкровельное пространство, но и значительно расширила границы использования с точки зрения пространственного насыщения[2-4].

Если в начале своего появления пространства мансард в большинстве случаев использовались в качестве жилья представителей не очень состоятельных сословий, то современная палитра решений, представленная практически теми характеристиками, что и пространство обычного этажа, позволяет значительно расширить спектр возможностей эксплуатации мансарды и не рассматривать это пространство как исключительно малобюджетный вариант. Более того, проектирование мансарды в объеме здания рассматривается в некоторых случаях, как приоритетная проектная разработка всего здания.

Разумеется, что мансардные объемы имеют свои особенности конструирования и организации подкровельного пространства[5-7]. Некоторые из них рассмотрены авторами в рамках данной статьи.



Рис. 1. Королевский замок в Блуа, Франция.
(Источник: https://www.tourister.ru/responses/id_10436)
Fig. 1. The Royal Castle in Blois, France.
(Source: https://www.tourister.ru/responses/id_10436)

В конце XIX-начале XX веков мансарды переживают второе рождение в процессе реконструкции европейских столиц - Вены, Берлина и особенно Парижа, что становится характерным элементом капитальной многоэтажной, многоквартирной застройки столичных центров доходными домами.

Позже мансардные крыши стали применяться и во многих российских городах, где получило свое развитие строительство доходных домов. Это Москва, Санкт-Петербург (рис.2), Ростов-на-Дону, Казань и некоторые другие. Однако опыт их строительства был кратковременным и не вполне удачным: эксплуатационные качества мансард в климатических условиях многих российских городов оказались не достаточно удовлетворительными[8-10].



Рис.2 Доходный дом Вега. 1914 г. Санкт-Петербург, архитекторы Овсянников и Ставицкий.
(Источник: https://dzen.ru/a/Xc7MFJ8e1i386kIL?utm_referer=www.yandex.ru)
Fig.2 Vega apartment building. 1914 St. Petersburg, architects Ovsyannikov and Stavitsky.
(Source: https://dzen.ru/a/Xc7MFJ8e1i386kIL?utm_referer=www.yandex.ru)

Конец XX в. был обусловлен очередным всплеском интереса к мансардам, но первоначально в качестве этажа надстройки существующих зданий с целью увеличения полезного объема за счет малобюджетного с точки зрения затрат решения. Однако, опыт внедрения в процесс проектирования подобных решений не дал ожидаемых результатов по многим причинам, среди которых можно выделить отсутствие прогрессивных строительных материалов, разработок в области конструктивных решений и технологий возведения мансардных конструкций в заданных условиях существующего здания и многое другое.

Изменилось положение в начале XXI в., в связи с началом проектирования и строительства новых жилых и общественных зданий, активно применяющих в своих решениях мансардные объемы. Своеобразным толчком к возвращению интереса к мансардам послужило появление значительного количества новых материалов и технологий, позволивших сформировать новый подход к проектированию мансард и включению их в структуру архитектурных объектов [11-13]. Так, гибкие кровельные материалы позволили создавать интересные и сложные композиции конструкций крыш, новые конструктивные материалы дали возможность увеличивать размеры перекрываемых мансардных пространств, новый класс тепло и гидроизоляционных материалов позволил решать вопросы более свободного функционального использования мансардных пространств. Идеи «пассивного дома» также наложили свой отпечаток на развитие пространства жилых и общественных зданий [14-16].

Кроме того, значительно обогатился спектр конструирования оконных проемов мансардных крыш, используя не только уже известные решения, но в большей степени новые технологии и материалы. Все перечисленное раскрывает новые возможности конструирования мансард и их активного включения в архитектурную практику.

Целью исследования является систематизация трансформаций конструктивных, функционально-планировочных и архитектурных решений объемов мансард в условиях современного строительства. Авторами поставлены следующие задачи: выделение основных этапов истории развития мансарды в архитектурной практике; выявление вопросов, определяющих формирование мансарды, как архитектурного объема; определение влияния новых материалов и технологий на конструктивное и функционально-планировочное решения мансард.

2. Материалы и методы

В статье использован метод контент-анализа статей современных авторов, метод структурного анализа, позволяющий выделить взаимосвязи исследуемого объекта с другими элементами проектной модели. Кроме того, для получения данных, связанных с изучением исторического опыта проектирования, исследовательской базой явились проектные наработки в области проектирования мансард. Выбранная направленность исследований: выявление основных элементов проектной деятельности архитекторов при изучении архитектурной идентичности. Основная методика данного исследования - поиск, анализ, систематизация и обобщение результатов полученной и изученной информации.

3. Результаты и обсуждения

Изучение условий становления и развития проектирования и строительства мансардных крыш позволило выделить группы факторов, влияние которых определяет выбор проектного решения. К ним можно отнести:

- конструктивные возможности и особенности архитектурного решения;
- функционально-планировочные характеристики;
- историко-стилевые особенности места строительства;
- климатические характеристики местности;
- технологические показатели, включающие нормативные требования проектирования конструкций покрытия;
- особенности применения архитектурно-функциональных элементов;

Исторически сложились несколько разновидностей конфигурации мансарды в зависимости от конструктивных особенностей кровли, под которой она

находится: *односкатной, двускатной, четырехскатной и ломаной* (рис.3). В некоторых проектных предложениях встречается и криволинейное решение конструкции покрытия.

По мнению авторов представленные примеры конструктивных решений наиболее часто встречаются в современной архитектурной практике, имея при этом некоторые разновидности. Так, например, четырехскатная крыша может быть решена в виде вальмовой, двускатная может быть как традиционной в своем исполнении, но может иметь и дополнительные объемы в своей конструкции - мезонины.



Рис.3 Примеры конструкций скатных крыш

(Источники: <https://stroim-domik.org/stroitelstvo/krysha/skatnaya/mansardnaya/kakie-est-vidy->

<https://idei.club/41216-chetyrehskatnaja-krysha-s-mansardoj-93-foto.html>)

Fig.3 Examples of pitched roof designs

(Sources: <https://stroim-domik.org/stroitelstvo/krysha/skatnaya/mansardnaya/kakie-est-vidy->
<https://idei.club/41216-chetyrehskatnaja-krysha-s-mansardoj-93-foto.html>)

Выбор конкретного решения обусловлен целями последующей эксплуатации мансарды, с учетом плюсов и минусов каждого из них [17-19]. Так, например, односкатные мансардные крыши могут быть использованы для тех пространств мансардного этажа, где допустим, исходя из условий эксплуатации, значительный перепад высот в формировании внутреннего объема.

Двускатная кровля рассматривается как наиболее традиционное решение, имеющее в силу разнообразия конструктивных решений стропильных систем (висячие или наслонные стропильные конструкции) большое количество функционально-планировочных вариантов. Двускатный вариант чаще находит применение для индивидуальных жилых домов, но вполне возможно использование подобных мансардных пространств и для общественных зданий.

В силу конструктивных особенностей четырехскатные мансардные покрытия, скаты которых одинаковы, наиболее характерны для индивидуального строительства в силу необходимого ограничения объема внутреннего пространства. Для достижения приемлемого объема мансардного этажа необходимо значительное увеличение высоты, что влечет за собой усиление опорного узла стропильных систем, излишний расход кровельного материала и теплоизоляционного слоя. Кроме того, завышенная высота влечет за собой большие теплопотери объема мансарды. Несколько экономичнее решение мансардного этажа в условиях вальмовой кровли.

Конструкции мансард ломаного и криволинейного типа отличаются большим внутренним пространством, образованным крутыми нижними частями. С точки зрения необходимости для определенного функционально-планировочного решения, требующего больших площадей и максимального использования объема без так называемых, «мёртвых зон», такая схема наиболее применима, в большей степени для общественных зданий.

Особое внимание при решении конструкций мансардных этажей уделялось решению таких архитектурно-функциональных элементов, как окна. На сегодняшний день строительной практикой разработано значительное количество решений оконных проемов и по конструкции, и по особенностям их заполнения (рис.4). Это и окна, расположенные в одной плоскости с крышей, применение которых более обосновано



Рис.4. Варианты решения окон мансардных крыш
(Источники: <https://stroy-podskazka.ru/mansarda/krysha/>
<https://m-strana.ru/articles/5-raznovidnostey-okon-v-kryshe/>)

Fig.4. Solutions for skylight windows
(Sources: <https://stroy-podskazka.ru/mansarda/krysha/>
<https://m-strana.ru/articles/5-raznovidnostey-okon-v-kryshe/>)

Перемещение мансардных конструкций покрытия в более восточные районы строительства, поставили перед проектировщиками задачу совершенствования уже известных конструкций решения оконных проемов и разработку новых технологий и материалов, позволяющих решать задачи естественного освещения мансардных этажей. Представленные примеры подобных решений являются лишь частью современной палитры конструкций мансардных окон. В систем определяется факторами удобства эксплуатации окон, климатическими условиями региона строительства, функциональными особенностями помещения. Немаловажную роль играет и нормативный показатель необходимой освещенности объема мансардного этажа. При расчете общей площади для мансарды достаточно 1 м^2 остекления на 10 м^2 площади пола, что определено требованиями САНПИН¹

В идеале мансарда и её строительство должно быть запланировано еще на первоначальных стадиях разработки плана дома. Однако, современная строительная и архитектурная практика предусматривает возведение мансардных этажей для существующих зданий, не предусмотренных изначально. Этот опыт проектирования и строительства не рассматривается в рамках данного исследования, являясь, по мнению авторов, самостоятельной темой изучения.

Появление в практике архитектурного проектирования в странах Восточной Европы и России мансардных покрытий, а также появление новых материалов,

¹ САНПИН 2.1.2.2645-10. Санитарно-эпидемиологические требования к условиям проживания в жилых зданиях и помещениях

решающих задачи теплоизоляции, во многом расширили возможности включения мансард в число активно используемых в индивидуальном и массовом строительстве элементов домостроения[21,22].

4. Заключение

1. Были выделены основные этапы истории развития мансарды: подкровельное пространство для жилья несостоятельных сословий; второе рождение мансард внутри доходных домов в конце XIX-начале XX веков мансарды в процессе реконструкции европейских столиц - Вены, Берлина и особенно Парижа; конец XX в. был обусловлен очередным всплеском интереса к мансардам в качестве этажа надстройки существующих зданий с целью увеличения полезного объема; XXI век активное включение мансард в архитектурную практику в составе жилых и общественных зданий за счет использования современных материалов и новых конструкций оконных проемов.

2. Формирование архитектурного объема мансарды происходит за счет скатности крыш, создания дополнительных объемов в своей конструкции- мезонинов, окон.

3. Современный спектр материалов решающих задачи теплоизоляции, во многом расширили возможности включения мансард в число активно используемых в индивидуальном и массовом строительстве элементов домостроения.

Список литературы/References

1. Маклакова Т.Г., Нанасова С. М. Конструкции гражданских зданий: Учебник. – М.: Издательство АСВ, 2012- 296 с. [Maklakova T.G., Nanasova S. M. Constructions of civil buildings: Textbook. – М.: Publishing House DIA, 2012- 296 p.]
2. Kristian Fabbria, Barbara Brunettia. The attic and its effect on the energy performance of historic buildings//Energy Procedia 78 (2015) 1281 – 1286. – doi:10.1016/j.egypro.2015.11.141
3. Stefan Jakscha, Angelika Frankea, Doris Österreicherb, Martin Treberspurgb. A systematic approach to sustainable urban densification using prefabricated timber-based attic extension modules//Energy Procedia 96 (2016) 638 – 649.– doi:10.1016/j.egypro.2016.09.121
4. Сидоркович, С. В. Виды мансардных этажей при реконструкции жилых зданий. Их достоинства и недостатки // Вестник науки и образования. – 2020. – № 6-1(84). – С. 95-97.[Sidorkovich, S. V. Types of attic floors during the reconstruction of residential buildings. Their advantages and disadvantages // Bulletin of Science and Education. – 2020. – № 6-1(84). – P. 95-97] – DOI 10.24411/2312-8089-2020-10604. – EDN ZNTEU.
5. Абелешев В. И. Исследование некоторых теплотехнических аспектов эффективного устройства мансард // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2012. – № 10(104). – С. 57-63. [Abeleshev, V. I. Investigation of some heat engineering aspects of the effective arrangement of attics // Energy saving. Energy. Energy audit. – 2012. – № 10(104). – P. 57-63.]– EDN SHDTKH
6. Жигулина, А. Ю. Возможности и варианты повышения уровня комфорта жилых домов типовых серий, построенных в Самаре / А. Ю. Жигулина, Н. Г. Чумаченко, К. П. Шистеров // Градостроительство. – 2019. – № 1(59). – С. 23-28. [Zhigulina, A. Yu. Opportunities and options for improving the comfort level of residential houses of standard series built in Samara / A. Yu. Zhigulina, N. G. Chumachenko, K. P. Shisterov // Urban planning. – 2019. – № 1(59). – P. 23-28.]– EDNYXPZJB.
7. Бадян Г. М., Сычев С. А., Казаков Ю. Н., Смирнова Д. В. Технология надстройки здания из высокотехнологичных модульных систем повышенной заводской готовности// Вестник гражданских инженеров. – 2018. – № 4(69). – С. 78-85. [Badin G. M., Sychev S. A., Kazakov Yu. N., Smirnova D. V. Technology of building superstructure from high-tech modular systems of increased factory readiness// Bulletin of Civil Engineers. – 2018. – № 4(69). – P. 78-85.] – DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-4-78-85. – EDN YLHKQX.

8. Ларина Н. А. Экономические проблемы реконструкции и восстановления жилищного фонда различных форм собственности на примере исторического центра Санкт-Петербурга // Проблемы современной экономики. – 2013. – № 3(47). – С. 336-339. [Larina N. A. Economic problems of reconstruction and restoration of housing stock of various forms of ownership on the example of the historical center of St. Petersburg // Problems of modern economics. – 2013. – № 3(47). – P. 336-339.]– EDNRSVADP.
9. Шестопалов А. М. Реконструкция жилищного фонда в рамках существующего законодательства как один из возможных путей практической реализации приоритетного национального проекта "Комфортное и доступное жилье - гражданам России" // Имущественные отношения в Российской Федерации. – 2007. – № 7(70). – С. 51-59. [Shestopalov A.M. Reconstruction of the housing stock within the framework of existing legislation as one of the possible ways of practical implementation of the priority national project "Comfortable and affordable housing for citizens of Russia" // Property relations in the Russian Federation. – 2007. – № 7(70). – P. 51-59.]– EDNJXAEKD.
10. Мустакимов, В. Р. Реновация с передвижкой зданий // Евразийское Научное Объединение. – 2019. – № 3-1(49). – С. 35-45. [Mustakimov, V. R. Renovation with the movement of buildings // Eurasian Scientific Association. – 2019. – № 3-1(49). – P. 35-45.]– DOI 10.5281/zenodo.2632954. – EDN ZDXUPR.
11. Thor Hansena, Eva B. Møllera. Field measurements of moisture variation in cold ventilated attics with different ceiling constructions// Energy Procedia 132 (2017) 801–806. – DOI 10.1016/j.egypro.2017.10.023
12. Сычев С. А. Ускоренный монтаж мансард из унифицированных сэндвич панелей // Жилищное строительство. – 2008. – № 6. – С. 6-8. [Sychev S. A. Accelerated installation of attics from unified sandwich panels // Housing construction. – 2008. – No. 6. – P. 6-8.]– EDNJWCFTC.
13. Розанцева, Н. В. Разработка ресурсосберегающей технологии устройства фальцевой кровли // Промышленное и гражданское строительство. – 2014. – № 9. – С. 59-62. [Rozantseva, N. V. Development of resource-saving technology for the device of a seam roof // Industrial and civil construction. – 2014. – No. 9. - P. 59-62.]– EDN SNJVET.
14. Improving energy efficiency of rental housing / E. Shagiakhmetova, D. Burkeev, S. Fedorova, D. Shaikhutdinova // E3S Web of Conferences Volume 274 (2021): 2nd International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering (STCCE - 2021), Kazan, 21–28 апреля 2021 года. Vol. 274. – France: EDP Sciences, 2021. – P. 5001. – DOI 10.1051/e3sconf/202127405001. – EDN LMHYVB.
15. Jenny von Platten Mikael Mangold, Kristina Mjörnell. A matter of metrics? How analyzing per capita energy use changes the face of energy efficient housing in Sweden and reveals injustices in the energy transition// Energy Research & Social Science 70 (2020) 101807. – <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101807>
16. Елохов, А. Е. Особенности проектирования пассивного дома в России / А. Е. Елохов // Вестник МГСУ. – 2009. – № 4. – С. 313-316. [Elokhov, A. E. Features of designing a passive house in Russia / A. E. Elokhov // Vestnik MGSU. – 2009. – No. 4. – P. 313-316.]– EDN KZHCFF.
17. Kimmo Kurkinen. Case Study of a Cold Attic in a Pitched Roof with Minimal Ventilation//Energy Procedia 132 (2017) 466–471. – doi 10.1016/j.egypro.2017.09.667
18. Petrov A. Design and calculation of the internal roof drain system structure in terms of thermal protection and moisture condensation / A. Petrov, A. Ivantsov // IOP conference series: Materials Science and Engineering, Kazan, April 29, 2020. Vol. 890. – Kazan, Russia: IOP Science, 2020. – P. 012141. – DOI 10.1088/1757-899X/890/1/012141. – EDN ZBWCMР.
19. Anker Nielsena, Martin Morelli. Measured temperature and moisture conditions in the roof attic of a one-and-a-half story house//Energy Procedia 132 (2017) 789–794. – doi 10.1016/j.egypro.2017.10.028

20. Гукетлов Х. М., Карданов Л. Т. Особенности расчета естественного освещения помещений через мансардные окна Velux при ясном небе МКО// Academia. Архитектураи строительство. – 2010. – № 3. – С. 483-485. [Guketlov Kh. M., Kardanov L. T. Features of calculating natural lighting of rooms through Velux skylights with a clear sky МКО// Academia. Architectureandconstruction. – 2010. – No. 3. – P. 483-485.]– EDN NTLCIB.
21. Лундышев И. А. История работы с монолитным пенобетоном в жилищном строительстве. Решения, проблемыиособенности // Жилищноестроительство. – 2014. – № 5. – С. 67. [Lundyshev, I. A. The history of work with monolithic foam concrete in housing construction. Solutions, problems and features // Housing construction. – 2014. – No. 5. – P. 67.]– EDN SFMQVH.
22. Carl-Eric Hagentoft, Angela S Kalagasidis. Drying potential of cold attic using natural and controlled ventilation in different Swedish climates// Procedia Engineering 146 (2016) 2 – 7/ –doi:10.1016/j.proeng.2016.06.345

Информация об авторах

Кулеева Ляйля Муратовна, кандидат архитектуры, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: la_mur@rambler.ru

Бурова Татьяна Юрьевна, кандидат архитектуры, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: tadrik@yandex.ru

Сулейманов Альфред Мидхатович, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: sulejmanov@kgasu.ru

Листовская Людмила Викторовна, старший преподаватель, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: llistovskaya@gmail.com

Information about the authors

Lyayla M. Kuleeva, candidate of architecture, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: la_mur@rambler.ru

Tatyana Y. Burova, candidate of architecture, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: tadrik@yandex.ru

Alfred M. Suleymanov, doctor of technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: sulejmanov@kgasu.ru

Lyudmila V. Listovskaya, senior lecturer, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: llistovskaya@gmail.com

УДК: 725

DOI: 10.52409/20731523_2023_3_248

EDN: TWZAEЕ



Условия для развития городской застройки, ориентированной на общественный транспорт

К. А. Шаймарданова¹, Е. И. Прокофьев², А. М. Сулейманов²

¹ООО «Проектно-конструкторская мастерская», ²Казанский государственный
архитектурно-строительный университет
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация: *Постановка задачи.* Положения концепции транзитно-ориентированного развития территорий позволяют организовать городскую застройку, комфортную для населения.

Целью исследования является определение принципов формирования транзитно-ориентированных территорий в жилой застройке с ориентацией на общественный транспорт. Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

1. анализ международного опыта проектирования и реализаций проектов формирования жилой застройки с учетом транзитно-ориентированных территорий;
2. определение характерных особенностей формирования транзитно-ориентированных территорий, с ориентацией на общественный транспорт.

Результаты. В результате исследования был рассмотрен опыт проектирования, освоения и застройки земель по условиям транзитно-ориентированного развития на примере городов Малайзии, Франции, Дании, Великобритании. Изучение зарубежного опыта, применения транзитно-ориентированных территорий в жилой застройке с ориентацией на общественный транспорт, позволило сформулировать основные принципы формирования транзитно-ориентированных территорий: принцип концентрации высокоинтенсивного развития; принцип наполненности общественными функциями; принцип совмещения жилых, рабочих, торговых и развлекательных объектов; принцип формирования городских пешеходных пространств на базе переулков; принцип адаптации городской среды под велосипедную инфраструктуру; принципы экологичности на базе финансового стимулирования.

Выводы. Значимость полученных результатов для градостроителей и архитекторов заключается в возможности учитывать в своей работе принципы формирования транзитно-ориентированных территорий, что позволит обеспечить легкий доступ к общественному транспорту, создать условия, делающие зону привлекательной для транзитных пассажиров.

Ключевые слова: транзитно-ориентированная территория, городская застройка, жилая застройка, транспортная сеть, общественный транспорт.

Для цитирования: Шаймарданова К. А., Прокофьев Е. И., Сулейманов А.М. Условия для развития городской застройки, ориентированной на общественный транспорт. Международный опыт// Известия КГАСУ, 2023, № 3(65), с. 234-242, DOI: 10.52409/20731523_2023_3_248, EDN: TWZAEЕ

Integration of transport hubs into the urban environment

C.A. Shaimardanova¹, E.I. Prokofiev², A. M. Suleimanov²

¹LLC «PKM», ²Kazan State University of Architecture and Engineering
Kazan, Russian Federation

Abstract: Statement of the problem. The provisions of the conception of transit-oriented development of territories make it possible to organize urban development that is comfortable for the population. The purpose of the study is to determine the principles for the formation of transit-oriented territories in residential development with a focus on public transport. To achieve this goal, the following objectives were identified: 1. the study of international experience in the design and implementation of projects for the formation of residential development with respect to transit-oriented territories; 2. determination of the characteristic features of the formation of transit-oriented territories, with a focus on public transport.

Results. As a result of the study, the experience of design, development and housing development of land under the conditions of transit-oriented approach was reviewed using the example of cities in Malaysia, France, Denmark, and Great Britain. Principles for the formation of transit-oriented territories were identified, such as: concentration of high-intensity development, fullness of public functions; combination of residential, work, shopping and entertainment facilities; formation of urban pedestrian spaces based on alleys; adaptation of the urban environment to bicycle infrastructure; environmental friendliness based upon financial incentives.

Conclusions. The significance of the results obtained for urban planners and architects lies in the opportunity to take into account in their work the principles of the formation of transit-oriented territories, which will provide easy access to public transport and create conditions that make the area attractive for transit passengers.

Keywords: transit-oriented territory; urban development; residential development; urban transport network; public transport.

For citation: Shaimardanova C. A., Prokofiev E. I., Suleimanov A. M. Integration of transport hubs into the urban environment // News KSUAE, 2023, № 3(65), p. 234-242, DOI: 10.52409/20731523_2023_3_248, EDN: TWZAE

1. Введение

Городской общественный транспорт является важным элементов социально-экономической инфраструктуры страны. Устойчивое и эффективное функционирование транспорта – одна из необходимых предпосылок улучшения условий жизни населения. Чтобы сегодня обеспечить доступность общественного транспорта необходимо большое внимание уделять градостроительству при планировке и застройки новых территорий городов.

Одним из популярных направлений градостроительного проектирования, по оптимизации использования земли, является «Transit-Oriented Development», что в переводе означает «Транзитно-ориентированное развитие». Этот термин впервые использовал градостроитель Питер Калтрон в своей книге «The Next American Metropolis Ecology, Community and the American dream» [1]. Питер Калтрон описывает значение данного термина, как смешение функций землепользования и с формированием пешеходных кварталов вокруг транспортных узлов, автобусных остановок и коридоров. Со временем к значению термина была добавлена идея организации пешеходных улиц и кварталов, не исключая автомобильный транспорт, но с ориентацией на общественный транспорт.

Концепция градостроительного планирования «Транзитно-ориентированное развитие» (ТОР) стала основной для развития [2]:

– концепции «компактного развития» (smart growth), которая включает в себя некоторые принципы ТОР;

– направлений «транзитная деревня» (transit village), «развитие, поддерживающее транзит» (transit-supportive development), «благоприятный для транзита дизайн» (transit-friendly design).

В целом ТОР является решением по землепользованию, которое фокусируется на повышении доступности жилых и общество-административных объектов, акцентируется на компактности, высокой плотности и разнообразном использовании территорий [3-5]. Типичный жилой район, спроектированный по системе ТОР, обеспечивает пешеходную доступность (400м-800м) к объектам тяготения, что составляет 5-10 минут ходьбы. ТОР, помимо решения проблем городского транспорта, также решает другие вопросы, включающие как интенсивный неконтролируемый рост городов, так и их деградацию, жизнеспособность населения (здоровье и безопасность) [6]. ТОР уделяет внимание вопросам экологии: сокращение выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, потребление энергии. Применение ТОР позволяет осуществлять разработку более устойчивой схемы землепользования и городской инфраструктуры [7].

Обеспечить высокий уровень интеграции общественного транспорта в развитие городского пространства возможно путем сосредоточения деятельности населения вокруг транзитных станций [8, 9]. Интеграция транзитных станций в планировочную структуру городов позволит предоставлять пассажиру общественного транспорта качественные услуги и оптимизировать в городе территориальные ресурсы для развития транспортной инфраструктуры [10,11]. Строительство транзитных станций, так же позволит повысить инвестиционную привлекательность территорий вокруг них [12,13].

В последние десятилетия архитекторы создали модель «узел-место» для изучения связи между транзитными станциями и окружающей городской застройкой, путем количественной оценки физической активности людей в местах концентрации общественного транспорта и вокруг них [14]. Транзитные станции, как узлы, представляют собой места расположения объектов транспортной инфраструктуры [15].

Целью исследования является определение принципов формирования транзитно-ориентированных территорий в жилой застройке с ориентацией на общественный транспорт. Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

1. анализ международного опыта проектирования и реализаций проектов формирования жилой застройки с учетом транзитно-ориентированных территорий;
2. определение характерных особенностей формирования транзитно-ориентированных территорий, с ориентацией на общественный транспорт.

2. Материалы и методы

Для изучения «Транзитно-ориентированного развития» выбраны научные статьи и методические пособия, в которых представлены вопросы, касающиеся этого направления. Методология работы основывается на изучении текстовых материалов в литературе.

Изучение ТОР в различных странах, показало, что оно приобретает разные формы.

Города Малайзии развиваются и прогрессируют, и по мере роста городов, увеличивается спрос на использование автотранспорта, при этом в городах наблюдаются низкий уровень автомобилизации. Поскольку городской транспорт является основным и главным в городах, отсюда следует, что любые возникающие, в связи с этим вопросы могут влиять на экономическую и социальную устойчивость города. Решение проблем городского транспорта – это главная задача и функция организации землепользования в Малайзии. В Малайзии, есть железнодорожная и автобусная транспортные системы, а именно Komuter, (Rapid KL) LRT, монорельс и Rapid KL (автобусы) и другие [16].

В Малайзии применяются методические рекомендации, подготовленные FDTCP, которые соответствуют Национальному проекту планирования. В данном документе (местные нормы проектирования) говорится, что «высокий приоритет в проектировании должен быть отдан для создания энергоэффективных компактных городов». Здесь, «пригодная для жизни компактная застройка», описывается как место, которое сочетает в себе использование высокой интенсивности застройки в радиусе 400 м от железнодорожной или автобусной остановках, и где общественный транспорт является основным видом транспорта. Этот документ устанавливает главные требования для

планирования и проектирования застройки, пригодной для жизни, и которая основывается на ТОР. Схема развития района представлена схематично на рис. 1.

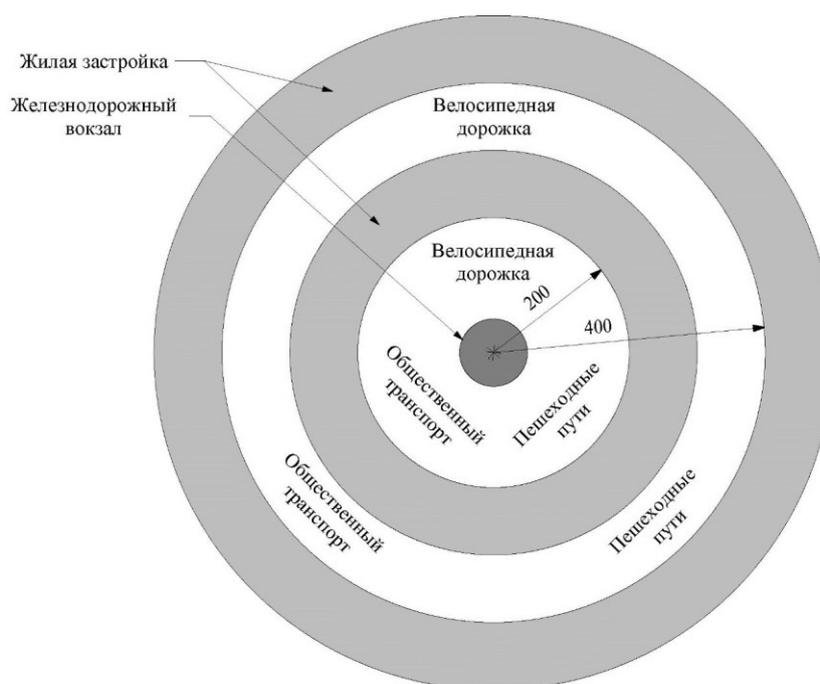


Рис.1. Схема развития района (Источник: выполнено авторами)
Fig.1. District development scheme (Source: done by the authors)

На этапе планирования застройки определяются типы, характеристики и компоненты ТОР – они будут незначительно отличаться, в зависимости от местоположения: городской центр; городской район; пригородный центр; периферия.

Вокруг крупнейшего транспортного узла в Малайзии построили Куала-Лумпур Сентрал - эксклюзивный городской центр в районе Брикфилдс. Его точечная застройка состоит из жилых домов, офисных зданий, отелей, торговых центров, международных выставок и развлекательных заведений. При этом интервалы между единицами общественного транспорта в результате реализации компонентов ТОР в часы пик в центре города составляют менее 5 минут, в то время как в пригородном районе они могут составлять 15-30 минут. При этом было учтено, что концентрация высокоинтенсивного развития для железнодорожного сообщения по условиям ТОР должна находиться в радиусе 400 м от транзитной станции, в то время как для автобусного ТОР она должна находиться в радиусе 200 м. Это руководство также предлагает учитывать 30%-ное соотношение дополнительных участков для коммерческой и жилой застройки в пределах 200 м и 100 м соответственно для железнодорожного и автобусного ТОР.

Интерес с точки зрения внедрения концепции ТОР представляет также группа климатического лидерства – это 96 городов, объединенных борьбой с климатическим кризисом, иначе они называют себя «C40» (*Cities Climate Leadership Group*).

Группа «C40» *Cities Climate Leadership Group* разработала методики для применения в городах и областях на основе концепции ТОР, имеющих решающее значение для экологии и устойчивого развития. Группа «C40» разработала также «Стандарты ТОР», где были изложены ключевые условия городского планирования и землепользования:

- 1) развитый общественный транспорт;
- 2) приоритет перемещений не на индивидуальном транспорте;
- 3) развитие и управление парковочным пространством и велосипедным движением;
- 4) формирование многофункциональных зон в транспортно-пересадочных узлах;
- 5) размещение помещений с общественными функциями на первых этажах зданий;
- 6) комфортные и безопасные общественные пространства;
- 7) активная общественная жизнь на территории [17].

В статье рассматривается территориальное развитие некоторых городов входящие в Группу «С40», и где применялась концепция ТОР.

В 13-м округе **Парижа** вдоль левого берега реки Сены расположен квартал Массена, район является частью компактного, многофункционального и удобного для пешеходов и велосипедистов нового района, построенного в начале 1990-х годов на месте бывших железнодорожных складов и промышленных площадей.

Район Рив Гош в 13 округе Парижа – это район южнее р. Сена, переживает этап своего расцвета. Здесь ежедневно пересекаются почти 20 000 жителей, 30 000 студентов, преподавателей и исследователей, а также 60 000 рабочих. В районе также имеется десять гектаров зеленых насаждений и 2 000 деревьев. Кроме того, в отличие от большей части Парижа, где здания обычно строятся в соответствии со стандартным дизайн-кодом, в этом районе представлено широкое разнообразие стилей зданий.

Район Массена в Париже объединяет в себе жилые, рабочие, торговые и развлекательные объекты. Таким образом, повседневные места назначения смешиваются вместе, а не концентрируются в отдельных пространствах. Разнообразные кварталы со смешанным использованием позволяют создать более разнообразные, насыщенные и интересные уличные пейзажи с разнообразной уличной активностью в любое время суток.

В **Австралии** в г. Мельбурне есть сеть переулков, созданных исторической сеткой мелких кварталов в центре города, которые предлагают разнообразные комбинации кафе, баров, небольших ресторанов, бутиков и выставочных залов. Сейчас переулки представляют собой территорию, заполненную дневной и ночной активностями, раньше они были заброшенными и малоиспользуемыми пространствами для служебного доступа. В дополнение к совмещению предлагаемых коммерческих видов использования, при проектировании переулков учитывались особенности пешеходного движения: освещение, навесы, указатели, дорожные знаки и удобные мостовые. Город Мельбурн ввел различные нормы для поддержки возрождения и развития переулков [18].

Количество доступных и активных переулков в Мельбурне увеличилось с 300 метров до 3,43 километров в период с 1994 по 2004 год. Переулки создали неповторимый характер города, наполнив его живыми пространствами [19]. Огромная популярность ежегодного фестиваля St Jerome's Laneway Festival, включающего живую музыку и представления, зародилась именно в этих переулках.

Столица и самый крупный город **Дании** Копенгаген славится своей культурой велосипедистов. С 1970-х годов город вкладывает значительные средства в велосипедную инфраструктуру, адаптируя дороги и транспортную политику к потребностям велосипедистов. В 2012 году г. Копенгаген принял новую стратегию развития велодвижения до 2025 года, целью которой является увеличение доли велосипедов до 50% от общего числа поездок на работу и снижение серьезных ДТП на 70%.

Согласно данным «Copenhagen Bicycle Account 2014», 45% от общего числа людей, работающих или обучающихся в г. Копенгагене, добираются до места работы или учебы на велосипеде. Имеется 350 километров сегрегированных велосипедных дорожек, на которых могут ездить все типы велосипедистов, включая детей, пожилых людей и семьи. Переход к преобладанию велосипедного транспорта также оказал благоприятное экономическое воздействие, поскольку сократились загрязнение воздуха и расходы на здравоохранение. Велосипед в целом воспринимается как более здоровый, экологичный, дешевый и зачастую более быстрый способ передвижения по городу, чем общественный транспорт или автомобиль. 50% велосипедистов г. Копенгагена утверждают, что они ездят на велосипеде, потому что это самый простой способ передвижения по городу [20].

Город Копенгаген добился успеха в реализации своей велосипедной стратегии благодаря целому ряду крупных и мелких мероприятий по поддержке велосипедного движения в городе. Город Копенгаген внедрил обширную сеть зеленых велосипедных маршрутов и супер-велосипедных магистралей. Велодорожки спроектированы с учетом безопасности и удобства велосипедистов, с четкой сегрегацией от автомобилей, часто с бордюром или деревьями, разделяющими два вида транспорта. Ключевым улучшением также стало внедрение «Cykelslangen», или «велосипедной змеи», приподнятой

велосипедной дорожки, которая сочетает в себе улучшенные условия для велосипедистов и знаковое дизайнерское решение дополнение к городу. Велосипедистам разрешено бесплатно провозить велосипеды в пригородных поездах, что способствует развитию смешанного транспорта.

Столицей **Великобритании** в г. Лондоне представлен проект реконструкции центра города «Central Saint Giles», цель которого было создание новых офисных и жилых площадей вблизи важных транспортных узлов. Многофункциональное пространство включает 46 000 квадратных метров офисов – почти вдвое больше, чем в старом здании Сент-Джайлз Корт – и более 100 квартир, окружающих новую общественную площадь с кафе, ресторанами и розничными магазинами, увеличивая плотность застройки участка за счет 15- и 11-этажных зданий. Проект минимизирует воздействие на окружающую среду благодаря котлам на биомассе, озелененным террасам на крыше, переработанной дождевой и серой воде и крайне ограниченной парковке. Строительство было завершено в 2010 году и с тех пор привлекло такие крупные компании, как Google и Mindshare. В ноябре 2010 года он также был номинирован на премию London Planning Awards в категории «Лучшее новое место для жизни».

«Central Saint Giles» удалось оживить большой район в центре Лондона, инвестируя в высококачественные офисы и жилые дома, но в то же время, делая упор на общие общественные пространства. Несмотря на высокую плотность застройки, здания окружают общедоступный внутренний двор с кафе и ресторанами, что повышает качество общественного пространства. Здесь всего десять парковочных мест, поскольку местный орган планирования настаивает на том, чтобы застройка была в основном свободной от автомобилей, а стоимость каждого парковочного места составляет 100 000 фунтов стерлингов, что создает сильный финансовый стимул для использования других видов транспорта.

3. Результаты

Анализ «Транзитно-ориентированного развития» на примере городов Малайзии, Франции, Дании, Великобритании показал, что ТОР может принимать различные формы и варьироваться от коммерческих и жилых центров, которые составляют сердце центрального делового района города, до компактных, но менее плотных жилых кварталов с некоторыми удобствами или без них. При этом все рассмотренные типологии ТОР обязательно включают в себя услуги общественного транспорта и развитую пешеходную среду.

Исследование показало, что ТОР включает в себя композицию из нескольких проектов, каждый из которых несет в себе определенную заложенную функцию. В совокупности проекты обеспечивают необходимые показатели города или района.

Несмотря на различие проектов развития городской территории, проектироваться они должны в соответствии с определенными принципами.

Изучение зарубежного опыта позволило сформулировать шесть основных принципов формирования «Транзитно-ориентированного развития» территорий с ориентиром на общественный транспорт:

1. Принцип концентрации высокоинтенсивного развития.
2. Принцип наполненности общественными функциями.
3. Принцип совмещения жилых, рабочих, торговых и развлекательных объектов.
4. Принцип формирования городских пешеходных пространств на базе переулков.
5. Принцип адаптации городской среды под велосипедную инфраструктуру.
6. Принципы экологичности на базе финансового стимулирования.

Краткая характеристика принципов формирования «Транзитно-ориентированного развития» территорий представлена в табл. 1.

Таблица 1

Принципы формирования «Транзитно-ориентированного развития» территорий

№ п/п	Принцип	Описание принципа
1	Принцип концентрации высокоинтенсивного развития	Выделение дополнительных участков для коммерческой и жилой застройки в пределах 200 м и 100 м соответственно для железнодорожного и автобусного ТОР.
2	Принцип наполненности общественными функциями	Размещение помещений с общественными функциями на первых этажах зданий
3	Принцип совмещения жилых, рабочих, торговых и развлекательных объектов	Разнообразные кварталы со смешанным использованием позволяют поддерживать уличную активность, в любое время суток в рамках одного района города
4	Принцип формирования городских пешеходных пространств на базе переулков	При проектировании переулков необходимо учитывать особенности пешеходного движения: освещение, навесы, указатели, дорожные знаки и удобные мостовые
5	Принцип адаптации городской среды под велосипедную инфраструктуру	Отделение велодорожек от автомобильных трасс, создание условий для бесплатного провоза велосипедов в поездах и автобусах
6	Принципы экологичности на базе финансового стимулирования	Высокая стоимость парковочных мест для личного автомобильного транспорта наряду с бесплатными парковками для велосипедов.

(Источник: составлено авторами)

4. Заключение

1. Изучен международный опыт формирования «Транзитно-ориентированного развития» территорий на примере городов Малайзии, Франции, Дании, Великобритании.

2. Проектирование жилой застройки города должно базироваться на принципах формирования «Транзитно-ориентированного развития» территорий, с ориентиром на общественный транспорт. В результате исследования международного опыта формирования «Транзитно-ориентированного развития» территорий были переделены принципы формирования «Транзитно-ориентированного развития» территорий: концентрация высокоинтенсивного развития, наполненность общественными функциями; совмещение жилых, рабочих, торговых и развлекательных объектов; формирование городских пешеходных пространств на базе переулков; адаптация городской среды под велосипедную инфраструктуру; финансовое стимулирование.

Принципы формирования «Транзитно-ориентированных развития» территорий позволят обеспечить легкий доступ к общественному транспорту, создать условия, делающие зону привлекательной для транзитных пассажиров.

Список литературы / References

1. Закирова Ю. А., Исмагилова С. Х. Функционально-пространственная организация стыковых узлов в планировочной структуре Казанской агломерации / Ю. А. Закирова, Л. Ф. Закиева // Архитектура и строительство России. – 2022. – № 2(242). – С. 44-49. [Zakirova Yu. A., Ismagilova S. Kh Functional-spatial organization of hubs in the planning structure of the Kazan agglomeration / Yu. A. Zakirova, L. F. Zakieva // Architecture and construction of Russia. – 2022. – No. 2(242). – P. 44-49]– EDN EDMBXA.
2. Аль-Джабери А.А.Х., Перькова М.В., Иванькина Н.А., Аль-Савари М.Х. Типология транзитно-ориентированного развития // Вестник БГТУ им. В.Г.Шухова. 2019. №5. С.120-130 [Al-Jaberi A.A.H., Perkova M.V., Ivankina N.A., Al-Savari M.H. Typology of transit-oriented development // Bulletin of BSTU named after. V.G. Shukhova. 2019. No. 5. P.120-130]
3. Jones, Matthew C., "Bridging the Gap: Community-Oriented Transit Development" 2014.Masters Theses. <https://doi.org/10.7275/5534671>
https://scholarworks.umass.edu/masters_theses_2/23.

4. Тахирай Г. Тенденции формирования и развития транспортно-пересадочного узла в инфраструктуре крупных городов Албании // *Architecture and Modern Information Technologies*. 2022. №1(58). С. 125-135. [Tahiray G. Trends in the formation and development of transport hubs in the infrastructure of large cities in Albania // *Architecture and Modern Information Technologies*. 2022. No. 1(58). P. 125-135.]URL:https://marhi.ru/AMIT/2022/1kvart22/PDF/07_tahiraj.pdf DOI: 10.24412/1998-4839-2022-1-125-135
5. Fan B., Yang Y., Li L. Integrated optimization of urban agglomeration passenger transport hub location and network design // *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking*. 2018. № 1 (2018). P. 1–7.
6. Забрускова М. Ю. Пономарев Е. С. Проектирование жилых районов массовой застройки в современных условиях // *Academia. Архитектура и строительство*. – 2009. – № 1. – С. 51-56. [Zabruskova M. Yu. Ponomarev E. S. Design of residential areas of mass development in modern conditions // *Academia. Architecture and construction*. – 2009. – No. 1. – P. 51-56.] – EDN KZUBKX.
7. Азаренкова З.В. Планировочная организация транспортно-пересадочных узлов // *Academia/ Архитектура и строительство*. 2011. Вып. 1. С. 76-80. [Azarenkova Z.V. Planning organization of transport hubs // *Academia/ Architecture and construction*. 2011. Issue. 1. P. 76-80.]
8. C40 Cities Climate Leadership Group February 2016 GOOD PRACTICE GUIDE Transit Oriented Development.
9. Multimodal Transport Hubs GOOD PRACTICE GUIDELINES SEPTEMBER 2020.
10. Transit- Oriented Development (TOD) Making Place In Malaysian Cities // *HabitatMagazine*. 2016. Vol. 4. Iss. 56-57. P. 48-51.
11. Копылова Т.А. Conception of level of service of public intermodal TRANSPORT JUNCTIONS // *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2017. Vol. 4. Iss. 56-57. P. 101-107. DOI: 10.26518/2071-7296-2017-4-5(56-57)-101-107.
12. Медведев П. В. Формирование транспортно-пересадочных узлов в городах // *Вестник Университета №. 2014. № 1 (11)*. С. 120–125. [Medvedev P.V. Formation of transportation hubs in cities // *Bulletin of the University no. 2014. No. 1 (11)*. P. 120–125.]
13. Низамова А. Ш., Шагиахметова Э. И., Боровских О. Н. Выявление ценообразующих факторов, влияющих на стоимость земельных участков под ИЖС на территории города// *Экономика и предпринимательство*. – 2023. – № 3(152). – С. 504-510. [Nizamova A. Sh., Shagiakhmetova E. I., Borovskikh O. N. Identification of pricing factors influencing the cost of land plots for individual housing construction in the city // *Economics and Entrepreneurship*. – 2023. – No. 3(152). – P. 504-510.] – DOI 10.34925/EIP.2023.152.3.097. – EDN DGKZOT.
14. Закиева, Л. Ф. Развитие внутриагломерационного рельсового пассажирского 40 транспорта на примере Камской агломерации// *Архитектура и строительство России*. – 2022. – № 2(242). – С. 40-43. [Zakieva, L. F. Development of intra-agglomeration rail passenger transport 40 using the example of the Kama agglomeration // *Architecture and construction of Russia*. – 2022. – No. 2(242). – P. 40-43.]– EDN ENDXRU.
15. Zinoski M., Medarski I., Solarska S. Conception of level of service of public intermodal TRANSPORT JUNCTIONS // *South East European Journal of Architecture and Design*. 2017. Vol. 4. Iss. 1-6. P. 101-107. DOI:0.3889/seejad.2017.10030
16. Власов Д.Н. Транспортно-пересадочные узлы. М.: Издательство МИСИ-МГСУ, 2017. 193 с. [Vlasov D.N. Transport hubs. M.: Publishing house MISS-MGSU, 2017. 193 p.]
17. Цыпин П.Е., Грачева А.А., Хинойн К.К. Лпыт японии в создании транспортно-пересадочных узлов и его применение в россии // *Бизнес и дизайн ревью*. 2017. № 6 (2). С. 3–12. [Tsy-pin P.E., Gracheva A.A., Hinoyan K.K. Japan’s experience in creating transport hubs and its application in Russia // *Business and design review*. 2017. No. 6 (2). P. 3–12.]

18. Elshater A. M., Ibraheem F. From Typology Concept to Smart Transportation Hub // *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. 2014. (153). P. 531–541.
19. Михайлов С. М., Михайлова А. С Пешеходная улица как арт-объект в дизайне современного города // *Архитектура и строительство России*. – 2017. – № 1(221). – С. 77-84. [Mikhailov S. M., Mikhailova A. S. Pedestrian street as an art object in the design of a modern city // *Architecture and construction of Russia*. – 2017. – No. 1(221). – P. 77-84.] – EDN YMVHOL.
20. Nadi A., Sharma S., Snelder M., Bakri T. Short-term prediction of outbound truck traffic from the exchange of information in logistics hubs: A case study for the port of Rotterdam // *Transportation Research Part C Emerging Technologies*. 2021. Vol. 127. Iss. 103111. P. 1-9. DOI: 10.1016/j.trc.2021.103111.

Информация об авторах

Камилла Айратовна Шаймарданова, архитектор, ООО «Проектно-конструкторская мастерская», г. Казань, Российская Федерация

E-mail: shaimardanova.c@gmail.com

Евгений Иванович Прокофьев, кандидат архитектуры, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Сулейманов Альфред Мидхатович, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: sulejmanov@kgasu.ru

Information about the authors

Camilla A. Shaimardanova, architect, LLC «PKM», Kazan, Russian Federation

E-mail: shaimardanova.c@gmail.com

Evgenii I. Prokofiev, candidate of architecture, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Alfred M. Suleymanov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Kazan State University of Architecture and Civil Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: sulejmanov@kgasu.ru



УДК: 721.011

DOI: 10.52409/20731523_2023_3_234

EDN: TDTPHK



Методология проектирования архитектуры сотовой сочленённой жилой застройки

Т.М. Нуреев¹

¹ООО «Зодчество», г. Казань, Российская Федерация

Аннотация: *Постановка задачи.* Актуальность исследования заключается в отсутствии методологии проектирования архитектуры нового типа застройки - сотовой сочленённой жилой застройки, отсутствующей также в реализации. Цель исследования - создание методологии проектирования архитектуры сотовой сочленённой жилой застройки в границах центральной и южной зон инсоляции России. *Задачи исследования:* 1) Создание условий повышения экономической эффективности градостроительного решения. 2) Создание минимального количества многолучевых жилых секций, соединение которых между собой приведёт к формированию сотовой сочленённой жилой застройки. 3) Создание условий энергетической эффективности квартир в рамках стимулирования роста коэффициента семейности России. *Результаты.* 1). Создана методология эффективного трёхэтапного проектирования сотовой сочленённой жилой застройки. 2). Создан мультипликативный эффект трёх направлений дальнейших исследований в строительной физике жилой застройки: А). Предложен метод расчёта энергоэффективности квартир азимутальных секторов симметричной половины двора сетчатой замкнутой полигональной жилой застройки. Б). Предложен метод строительной физики для расчёта отзеркаленной инсоляции для затенённых поверхностей фасадов сотовой сочленённой жилой застройки. В). Предложены методы управления микроклиматом двора сотовой сочленённой жилой застройки. *Выводы.* Значимость результатов заключается в создании методологии проектирования архитектуры сотовой сочленённой жилой застройки для центральной и южной зон инсоляции России из двух жилых секций: материнской «Т» - образной и дочерней «У» - образной. Обязательность внедрения под сотовую сочленённую жилую застройку объёма стилобата позволяет создать комфортные условия проживания и работы не только в поселениях центра страны, но и в условиях Севера России, обеспечивая максимальную норму плотности населения.

Ключевые слова: кинетика, многолучевая архитектура, сотовая сочленённая жилая застройка, материнская и дочерняя жилые секции

Для цитирования: Нуреев Т.М. Методология проектирования архитектуры сотовой сочленённой жилой застройки // Известия КГАСУ, 2023, № 3(65), с. 243-256, DOI: 10.52409/20731523_2023_3_234, EDN: TDTPHK

Architecture design methodology for honeycomb articulated residential development

T.M. Nureyev¹

¹LLC "Zodchestvo", Kazan, Russian Federation,

Abstract. *Problem statement.* The relevance of the study lies in the absence of a methodology for designing the architecture of a new type of development - a honeycomb articulated residential development (HARD), which is also absent in the implementation. The purpose of the study is to create a methodology for designing the architecture for a honeycomb articulated residential development in the central and southern insolation zones of Russia. *Research*

objectives: 1) Creation of conditions for increasing the economic efficiency of urban planning solutions. 2) Creation of a minimum number of multi-beam residential sections, the connection of which will lead to the formation of a honeycomb articulated residential development. 3) Creation of conditions for the energy efficiency of apartments in the framework of stimulating the growth of the family factor in Russia. *Results.* The study presents the following results: 1). A methodology for an effective three-stage design of a honeycomb articulated residential development has been created. 2). A multiplier effect has been created in the form of three directions for further research in the construction physics of residential development: A). A method for calculating the energy efficiency of apartments in the azimuthal sectors of a symmetrical half of the yard of a mesh closed polygonal residential development has been created. B). Methods for controlling the microclimate of the yard of a honeycomb articulated residential building are proposed. *Conclusions.* The significance of the results lies in the creation of a methodology for designing the architecture of a honeycomb articulated residential development for the central and southern insolation zones of Russia from two residential sections: the parent "T" - shaped and the child "Y" - shaped. The obligatory introduction of a stylobate volume for honeycomb articulated residential development makes it possible to create comfortable living and working conditions not only in the settlements of the center of the country, but also in the extreme conditions of the North of Russia, ensuring the maximum population density rate.

Keywords: full square kinetics, multi-beam architecture, honeycomb articulated residential development, parent and child residential sections

For citation: Nureyev T.M. Architecture design methodology for honeycomb articulated residential development // News KSUAE, 2023, № 3(65), p. 243-256, DOI: 10.52409/20731523_2023_3_234, EDN: TDTPHK

1. Введение

Визуальная среда реализуемой в мире жилой многоквартирной архитектуры характерна своим однообразием, выражающимся в её ортогональности: как в фасадах, так и в планах. Анализ проектов архитекторов начала XX века в виде полигональных многолучевых структур многоквартирного жилья выявил в них множество положительных характеристик, и главную отрицательную, которая до сих пор остаётся проблемой. Это отсутствие методологии создания замкнутых жилых многолучевых дворовых структур, формируемых на трёх планировочных координатных системах, которые замыкались бы без зазоров и могли далее развиваться в непрерывную сотовую жилую застройку. Изложенный ниже анализ реализованных примеров многолучевой жилой застройки в разных странах мира показывает присутствие в них зазоров и отсутствие непрерывности, являющейся признаком экономической эффективности освоения земельного участка. Рассматриваемая проблема сформулирована как *объект исследования* - архитектура сотовой сочленённой жилой застройки (ССЖЗ) многоквартирных домов с замкнутой конфигурацией дворов. *Актуальностью исследования* является отсутствие методологии проектирования архитектуры замкнутых дворов ССЖЗ, отсутствующей как в теории, так и в реализации. Аспект влияния замкнутости конфигурации жилого двора на социализацию детей и безопасность недвижимого имущества подчёркнут в научных трудах как в капиталистических странах с социальной сегрегацией, так и с её отсутствием её в социалистических странах [1,2]. Для формулирования задач исследования проведём исторический анализ возникновения замкнутых жилых дворов многоугольных конфигураций. Первый пример - замкнутые дворы Санкт-Петербурга, имевших различные конфигурации и функции [3]. Впервые попытка геометрически гармонизировать жилую застройку в СССР была осуществлена в 1924 году в мастерской ВХУТЕМАСА архитектором Ладовским Н.А. для проекта квартала по ул. Стромынка города Москва: в виде многоугольных полузамкнутых жилых дворов. Дворы формировались одной пятилучевой жилой секцией проекта дома для рабочих [4]. Через десять лет тема была завершена в мастерской Ладовского в проектах жилья для Средней Азии, выполненных студентом В. Калмыковым в виде сотовой

структуры конфигураций жилых дворов [5]. Концепция Ладовского реализована строительством жилого комплекса (ЖК) «Грёндаль» в столице Швеции – Стокгольме в 1946 году [6]. Дальнейшие попытки архитекторов мира создать замкнутость полигональных жилых дворов осложнились введением в послевоенные годы XX века норм инсоляции в странах Европы, которая в гексагональной конфигурации дворов не осуществима. Примером отсутствия инсоляции в гексагональных дворах служат многолучевые жилые секции ЖК «Норашен» в Ереване (Армения), реализованные в 1986 году [7], вынудившие архитекторов создать разрывы между всеми секциями ЖК. Удачной попыткой наличия инсоляции, но отсутствия полной замкнутости полигонального двора является ЖК «Аркада Хаус» в городе Москва, реализованный на рубеже XX - XXI веков [8]. Также анализировалась 171 серия трёхлучевой 9-ти этажной панельной жилой архитектуры, разработанная ЛенЗНИИЭП, которая не была реализована в связи с началом экономических реформ в СССР. Результаты анализа ЖК с полигональными полузакрытыми жилыми дворами, разработанными после введения норм инсоляции в разных странах, выявила в них общую закономерность: отсутствие замкнутости жилых дворов. Выявлена и общая проблема: отсутствие методологии проектирования многолучевых жилых секций, граничные параметры которых могли бы привести к созданию замкнутой полигональной жилой застройки с наличием нормативной инсоляции. В начале второго десятилетия 21 века архитектурная тенденция по созданию замкнутых дворов жилой застройки вернулась в поле деятельности архитекторов [9,10]. *Цель настоящего исследования* – создание методологии проектирования архитектуры сотовой сочленённой жилой застройки, конфигурация дворов которой не использует гексагональность двора для соблюдения норм инсоляции в границах научного исследования. *Задачи исследования:* 1). Создание условий повышения экономической эффективности градостроительного решения; 2). Определение минимального количества многолучевых жилых секций, соединение которых между собой приведёт к созданию ССЖЗ; 3). Создание условий энергетической эффективности квартир и соответствия их коэффициенту семейности субъекта России в границах исследования.

2. Материалы и методы

Настоящая статья - третий этап исследования, раскрывающий методы кинетики, комбинаторики, соединения или слияния первичной и множество типов вторичных жилых секций между собой, для достижения цели исследования – создания ССЖЗ (рис.1).

Вкратце опишем решённые задачи первых двух этапов, опубликованные ранее, для понимания формулируемых задач третьего этапа создания ССЖЗ [11,12]. Первые два этапа решили проблему создания первичной и вторичных многолучевых жилых секций ССЖЗ, граничные параметры которых при взаимном блокировании приводят к созданию замкнутых полигональных жилых дворов ССЖЗ. Кроме этого, граничные параметры разработанных секций ССЖЗ соответствуют коэффициенту семейности Российской Федерации (РФ) в 2,6 человека [13]. А также трём типам уровня комфорта квартир с общей площадью в 26,0 м²/чел к 2025 году, утверждённых в Республиканских нормах градостроительного проектирования РТ (РНГП РТ). Первые два этапа настоящего исследования представили новизну методологии, применяемой в архитектуре – методы кинетики квадрата, получившего в математике термин – «полный квадрат». Для понимания терминов, применяемых в настоящей статье в сокращении, вкратце опишем их. Первичная «Т» - образная жилая секция названа «материнской» (МЖС). Множество типов вторичных многолучевых жилых секций, полученных методами кинетики трёх блок-квартир МЖС, названы «дочерними» (ДЖС). Комбинаторные блоки МЖС: Центральный (ЦКБ), Западный (ЗКБ) и Восточный (ВКБ). Два последних блока именуются как периферийные комбинаторные блоки (ПКБ). Первая задача 3-го этапа исследования - поиск методов повышения экономической эффективности существующих типов жилой застройки решается выявлением в них скрытых экономических резервов. Они кроются в существующей квартальной жилой застройке. Для анализа выбрана существующая территория, близкая по площади 9,0 гектарам, оговорённых в первом Градостроительном Кодексе России в виде сетки улиц в 300 метров. Это существующая

квартальная застройка г. Казань в границах улиц Абсалямова, Чистопольская, Меридианная, Сибгата Хакима, расположенная вдоль правобережья реки Казанка (Таблица 1). Техничко-экономические показатели (ТЭП) таблицы 1 получены из поисковой системы Яндекс-карты [14]. Красные линии улиц в ней показаны пунктирными линиями. В расчёте количества населения в квартирах разного типа используется коэффициент семейности для городских поселений РТ - 2,7 чел. (столбец 4 таблицы 1) [13]. В итоговых цифрах таблицы №1 мы видим, что 49,6 % территории заняты площадью жилых групп-кварталов: площадь застройки плюс площадь дворов. Оставшиеся 50,4 % ушли в местные проезды, площадь которых относительно площади кварталов не нормируются.

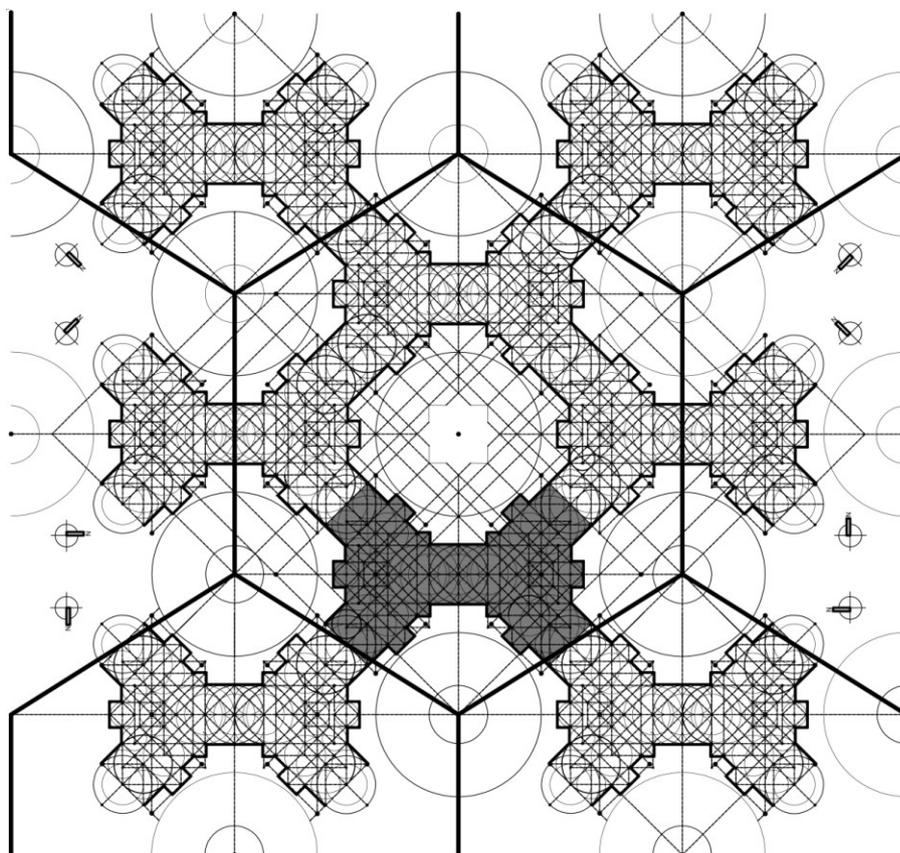


Рис. 1. Фрагмент ССЖЗ + стилобат для южной зоны инсоляции России. (Иллюстрация автора).
Fig. 1. Fragment of HARD + S for the southern insolation zone of Russia. (Illustration by the author).

Соответственно, первый метод решения первой задачи исследования – изъятие местных проездов для внедрения их в стилобат ССЖЗ, кровля которого по действующим нормам не входит в площадь застройки. В том числе в местных нормах градостроительного проектирования города Казань, утверждённых решением Городской Думы № 20-40 от 16.06.2020 года (МНГП). Кровля стилобата будет использована как экономический резерв для увеличения показателей двух взаимосвязанных позиций ССЖЗ: площадь застройки жилых зданий плюс площадь дворов.

Таблица 1

ТЭП квартальной жилой застройки в г. Казань площадью 8,2748 га

№№	Адрес зданий	секции /этажи шт.	кол-во кв-тир шт.	кол-во насел. 2,7 чел	площ. застр. м ²	площ. дворов м ²	площ. жил/гр м ²	площ. зданий м ²
0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	Чистоп-я 20	5 / 8	92	248,4	2950	1572	4522	2360
2	Чистоп-я 20а	5 / 7	72	194,4	2950	1572	4522	2065
3	Чистоп-я 20б	5 / 6	68	183,6	2950	1572	4522	1770

Окончание таблицы 1

0	1	2	3	4	5	6	7	8
4	Чистоп-я 22	2 / 15	108	291,6	1720	3160	4880	2580
5	Чистоп-я 24	0	0	0	подземная автостоянка			-
6	Чистоп-я 26	6 / 6	100	270	4000	1660	5660	2400
7	Мерид-я 3	8 / 6	200	540	2832	2250	5082	1699
8	Мерид-я 3а	3 / 5	75	202,5	1095	3280	3353	547
9	Мерид-я 1а	5 / 8	88	237,6	2754	1445	4199	2203
10	Мерид-я 1	4 / 19	146	394,2	2800	1503	4303	5320
11	Всего	43 / 9	949	2562	24 051	18 014	41043	20 944
12	Итого %				29,0	20,6	49,6	-

Взаимосвязь двух позиций происходит через норму площади благоустройства. Чтобы в ССЖЗ определить ТЭП для сравнительного анализа с существующей застройкой, необходимо разместить ССЖЗ на анализируемой территории. Для этого необходимо решить *вторую задачу исследования*: выбрать минимальное количество соединений секций ДЖС и МЖС между собой, которые могли бы привести к созданию ССЖЗ. После завершения размещения ССЖЗ мы вернёмся к завершению решения первой задачи: сравнению ТЭП двух типов застройки – квартальной и ССЖЗ. Эмпирически было определено, что решению второй задачи для южной зоны инсоляции России соответствует одна пятилучевая «Х» - образная дочерняя жилая секция («Х» ДЖС) (рис.1).

3. Результаты и обсуждение

На рисунке №1 пятилучевая «Х» ДЖС окрашена серым цветом. Соединение четырёх глухих торцов ПКБ «Х» ДЖС создаёт оригинал одного двора ССЖЗ. Фрагмент ССЖЗ в рисунке 1 удовлетворяет нормам инсоляции России не выше 43-го градуса северной широты. С условием строительства не выше трёх этажей. В связи с малым масштабом рисунка 1, план квартир «Х» ДЖС заменён на шесть подобий математически полного квадрата со вписанными в них окружностями. Габариты двора ССЖЗ – неправильный восьмигранник с размерами по внутренним фасадам 36 x 36 метров. Рисунок 1 позволяет понять предложенный в настоящем исследовании термин – сотовая сочленённая жилая застройка. Вопреки предположению, слово - «сотовый» не связан с конфигурацией контура зданий. Соты связывают центры дворов. Конфигурация внутреннего периметра двора – восьмиугольная, созданная блокированием одной жилой секции с самой собой: пятилучевой «Х» ДЖС. Слово «сочленённый» относится ко всем трём элементам ССЖЗ: соты сочленяются сами с собой. Также, как периметры дворов и «Х» ДЖС.

Предложенная геометрическая схема взаимосвязи многоугольников и лучей секций предполагает перспективное создание ССЖЗ с иными конфигурациями дворов, но с сотовой сочленённой конфигурацией их центров. Для центральной зоны инсоляции России, к которой относится выбранная для проектного эксперимента территория в городе Казань, нам понадобится иная конфигурация двора, связанная с её расположением на 55 градусе северной широты. Эмпирически было определено, что только парно соединённые трёхлучевые жилые секции, образуют для центральной зоны инсоляции России оригинал двора ССЖЗ с внутренними размерами 50 x 75 метров (Рис.2).

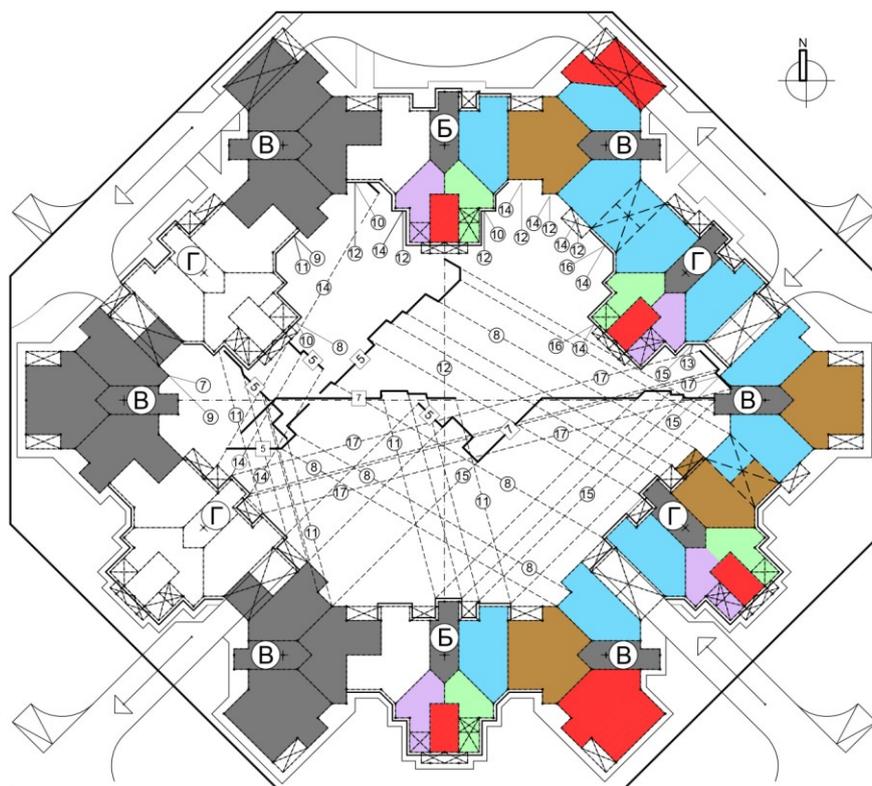


Рис. 2. Схема инсоляции и затенения ССЖЗ на стилобате. (Иллюстрация автора).

Fig. 2. Scheme of insolation and shading HARD+S. (Illustration by the author).

На рисунке 2 отображена трансформация второй задачи: разделение пятилучевой «Х» ДЖС на две трёхлучевые «У» - образные ДЖС («У» ДЖС) с имплантацией между ними «Т» - образной материнской жилой секцией (МЖС). В результате трансформации «Х» ДЖС в ССЖЗ образовалось 12 секций, собранных из парных жилых секций, соединённых между собой торцами: «У» ДЖС и МЖС. В разделении «Х» ДЖС использовались два метода трансформации. Первый метод - имплантация МЖС между глухими торцами ЦКБ «У» ДЖС, приводящий к повороту периметра двора на 135 градусов. *Второй метод* – имплантация МЖС между глухими торцами ПКБ «У» ДЖС и ПКБ МЖС, приводящий к повороту периметра двора на 90 градусов. Секции №6,12 – семиэтажные. ЦКБ секций №01,03,05,07,09,11 – семиэтажные. ПКБ секций №01,03,05,07,09,11 и секции №02,04,08,10: пятиэтажные. Обозначения рисунка 2: а). Пунктирная линия - направление тени от секции в час, указанный в окружности на линии; б). Сплошная утолщённая линия – граница тени от секции с цифрой её этажности, размещённой в квадрате на линии; в). Двухчасовая норма инсоляции показана сектором из сплошных линий с обозначением времени в окружностях крайних точек сектора. Западная и восточная половинки двора зеркальны. В западной половине двора серо-белое обозначение секций типового этажа. МЖС не окрашены. «У» ДЖС окрашены серым цветом. В восточной половине двора разные типы квартир обозначены разным цветом, которые детализированы на рисунках 3 и 4. Для бумажной версии статьи (черно-белой), цветная типология квартир создана в световой модели HSL в виде убывающей яркости, связанной с увеличением в них количества жилых комнат. Для завершения решения второй задачи на анализируемой территории в 8,2748 га города Казань производим сочленение оригинала двора рисунка 2 с самим собой для создания ССЖЗ. При этом сочленении получаем взамен девяти существующих дворов – семнадцать (рис 3).

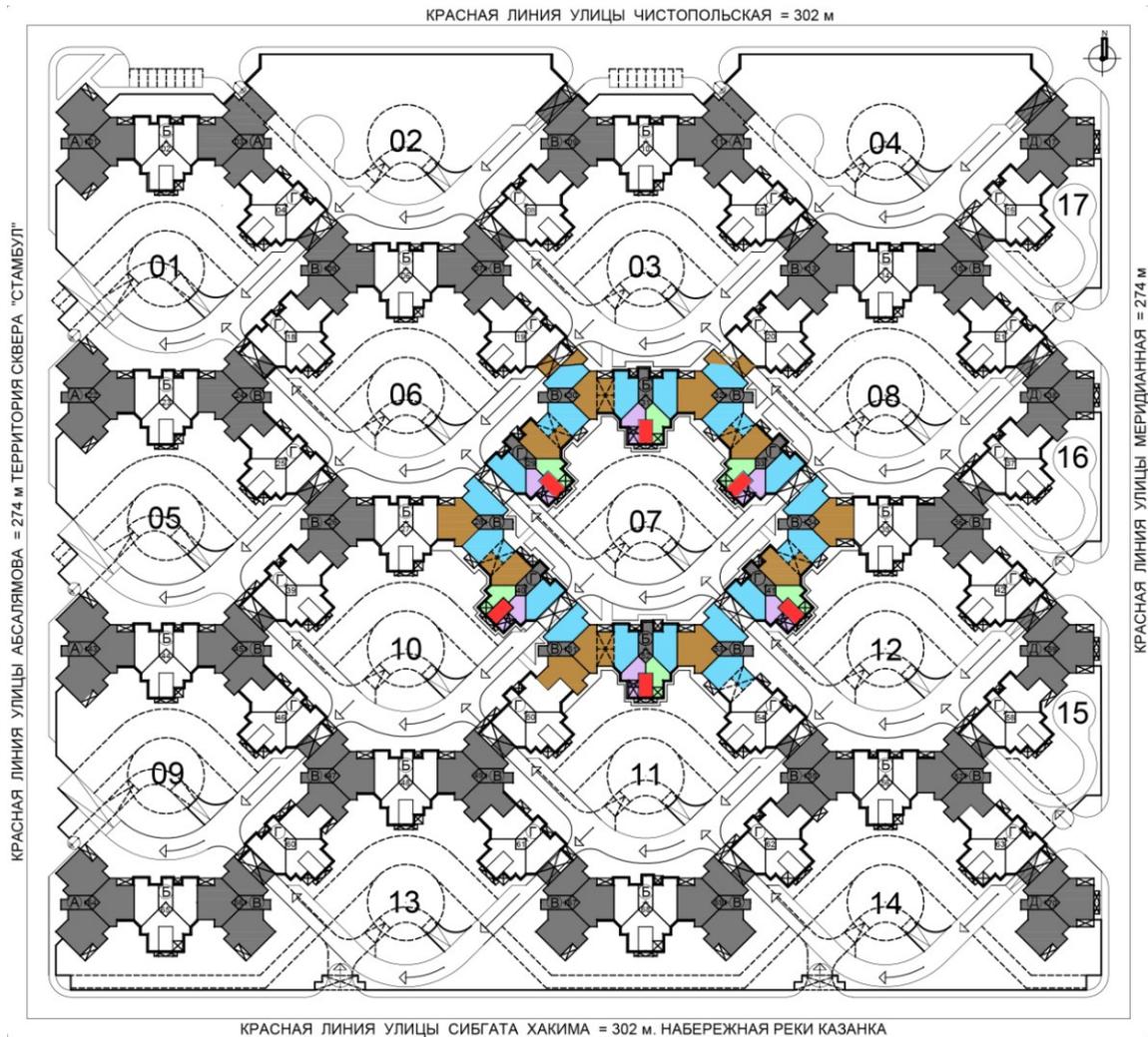


Рис.3. Схема сотовой сочленённой жилой застройки на стилобате (ССЖЗ). (Иллюстрация автора).
Fig. 3. Scheme of honeycomb articulated residential development (HARD+S). (Illustration by the author)

Семь дворов из них: замкнутых повторяющихся конфигураций ССЖЗ. Остальные – в виде фрагментов повторяющихся дворов, но разного размера. При копировании ССЖЗ на анализируемую территорию также решалась задача раскрытия её дворов на существующие элементы природного ландшафта. Это сквер «Стамбул» - с западной стороны и река Казанка - с южной стороны. Семь замкнутых дворов ССЖЗ - одинаковой площади. Полузамкнутые дворовы – различной площади, которые при складывании образуют площадь 16-ти повторяющихся замкнутых дворов. Сквозные проезды аварийных служб по кровле стилобата ликвидируют фрагменты объёма 1-го этажа торцовых пролётов жилых секций, на которые падают длинные утренние и вечерние тени. Объём проезда не ликвидирует квартиру, а меняет её типологию. Графика рисунка 3, повторяющаяся в каждом дворе ССЖЗ: А). Периметр участка – проезд на уровне земли вокруг стилобата ССЖЗ с карманами въезда в него; Б). Выпуклая полоса в северной части двора – зона противопожарной автолестницы; В). Выпуклая полоса в середине двора – аварийный выезд транспорта жильцов из стилобата во двор и обратно; Г). Вогнутая полоса в южной части двора – зона проезда аварийного транспорта. ТЭП ССЖЗ - в таблице 2 (табл.2):

Таблица 2

ТЭП сетчатой сочленённой жилой застройки (ССЖЗ) на 8,2748 га.

№	тип секций рис.3	кол-во секций (шт.)	этажность (этаж)	площ. этажа (м ²)	общ. площ секций (м ²)	жилой фонд (м ²)	кол-во квартир (шт.)	население к-нт сем-ти = 2,7 (чел.)
0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	А	6	5-7-9	304,4	15364,2	14043	141	381
2	Б	14	7-9	250,9	30108,0	27518,7	292	788
3	В	22	5-7	266,4	42385,2	38740	446	1204
4	Г	24	5	291,6	31615,2	28896,3	336	907
5	Д	4	5-7-9	336,7	8971,5	8200	70	189
6	ВСЕГО	70	6 средн	-	128444,1	117398	1285	3469

Тип «А» - «У» ДЖС: нет трансформации квартир в торцовых пролётах ПКБ; Тип «Б» - МЖС: торцовые пролёты ликвидированы; Тип «Г» - МЖС: трансформация квартир в торцовых пролётах ПКБ с аркой проезда в одном ПКБ; Тип «В» - «У» ДЖС: трансформация квартир в торцовых пролётах ПКБ с аркой проезда в одном ПКБ. Семь секций первой линии улицы Чистопольская: 9-ти этажные. На стадии расчётов ТЭП для таблицы 2 был обнаружен парадокс ССЖЗ в виде принадлежности парных секций разному количеству дворов. МЖС - двум дворам. «У» ДЖС – трём дворам (рис.3). Решение парадокса представлено в таблице 3: одному двору ССЖЗ принадлежит 4,4 секции: (70 секций \ 16 дворов. табл.3).

Таблица 3

Решение парадокса в ТЭП ССЖЗ по принадлежности секций одному двору

№	ссжз двор (шт.)	кол-во секц-й (шт.)	кол-во квартир (шт.)	насел-е к/с 2,7 (чел.)	площ. застр-ки (м ²)	площ. дворов (м ²)	площ. квартал (м ²)	площ. проезд (м ²)	площ участка (м ²)
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	4,4	80	216	1908,6	2849,4	4758	413,7	9929,7
2	16	70	1285	3469	30538	45590	76128	6620	82748

Итог таблицы 3: площадь участка одного двора в 9929,7м², являющейся суммой его параметров (столбцы 5-8, 1-ой строки), изображён на рисунке 2 в виде восьмиугольника, соединяющего границы отмотки торцов «У» ДЖС. Указанная площадь является 1/16 параметров 2-й строки этих же столбцов. Для завершения решения первой задачи исследования необходимо итоговые ТЭП двух анализируемых типов застройки сравнить с МНГП по контрольным показателям. Максимальный процент жилой застройки в 40%, указанный в МНГП, в анализируемых типах застройки не превышен. Но в ССЖЗ он выше, включая и плотность населения (табл. 4).

Таблица 4

Сравнение ТЭП 2-х типов застройки на эффективность использования 8,2748 га

№	тип застр - ойки	кол-во жилых дворов (шт.)	кол-во жилых секций (шт.)	кол-во квартир (шт.)	кол-во насел к/с-2,7 (чел.)	плотн. насел. (чел/га)	площ. застр. (м ²)	площ. дворы (м ²)	площ. проезд (м ²)
							(%)	(%)	(%)
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	квартал (сущ-й)	9	43	949	2562	298	25 500	17 000	40 248
							30,81	20,54	48,65
2	ССЖЗ (проект)	16	70	1285	3469	419	30 538	45 590	6620
							36,9	55,1	8,0

В существующей застройке местные проезды изъяли площадь дворов нарушая требования МНГП по благоустройству на 64,1% (столбец 8 табл.5). В нормах СССР минимальная площадь благоустройства рассчитывалась на одного жителя квартала. Она

была равна 10,0 м². Из которых 6,0 м² было озеленением. В формулах расчёта площади благоустройства МНГП жителя нет. Расчёт исходит из параметра жилого фонда (жилфонд (ж\ф), табл. 5). Который, в свою очередь, определяется на основе показателя средней этажности (прим. 7 таблицы 4.2.1.3.4 МНГП). Эмпирически определено, что в МНГП площадь благоустройства, приходящаяся на одного жителя, равна 12,7 м². А озеленения – 7,9 м².

Таблица 5
ТЭП 2-х типов застройки на соответствие нормам благоустройства МНГП г. Казань

№	типы застройки на 8,2748 га	средн этажность (эт.)	норма плотн жилфонда тыс.м ² /га.	жилой фонд жилфонд (ж\ф)		жил фонд % от нормы	площ благ-ва 35,5м ² /100м ² ж\ф	
				норма (тыс. м ²)	факт (тыс.м2)		норма тыс.м ² %	факт тыс.м ² %
0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	Квартал (существ)	8,8	16,0	133,39	18,85	14,1 %	47,3	17,0
							100 %	35,9 %
2	ССЖЗ (проект)	6,0	14,2	117,5	117,4	99,9 %	41,7	45,6
							100 %	108,6 %

Показатели существующей квартальной жилой застройки по площади жилфонда и благоустройства говорят об отсутствии приоритета экономики (табл.5): А). Площадь жилфонда ниже МНГП на 85,9 %; Б). Благоустройства - на 64,1 %. Итоговые показатели площадей жилфонда и благоустройства в ССЖЗ близки к максимальным нормам МНГП: А). Жилого фонда: 99,9%; Б). Благоустройства: на 108,6%. Избыток площади в 8,6% позволяет разместить в одном дворе ССЖЗ благоустройство встроенного детского сада. Настоящее исследование предлагает ещё три метода повышения экономической эффективности территории, опирающиеся на налоговые преференции, предоставляемые законами России собственникам жилых комплексов (ЖК). *Первый «зелёный» метод* - освобождение собственника ЖК от налога на имущество в течении первых трёх лет эксплуатации ЖК в случае применения в нём «зелёных» стандартов [15]. Преференция удостоверяется экологическим сертификатом. *Второй «зелёный» метод* - использование стандартов «зелёной» архитектуры: ГОСТ 58875-2020, а также ГОСТ 70346-2022 [15]. Метод увеличивает площадь озеленения двора переносом «антисанитарных» площадок благоустройства (выгула домашней фауны, хозяйственной и физкультурной) на эксплуатирующую кровлю жилых секций. Третий «зелёный» метод - использование технических систем для создания микроклимата двора, получающие энергию от инсоляции и возобновляемых источников [16-20]. В). Четвёртый метод предназначен для получения пассивного дохода кондоминиума и уменьшения транспортных миграции жителей ЖК внутри поселения. Метод заключается в размещении разрешённой МНГП сферы услуг малого бизнеса жителей ССЖЗ в освещённом периметре стилобата, а также под жилыми секциями [21].

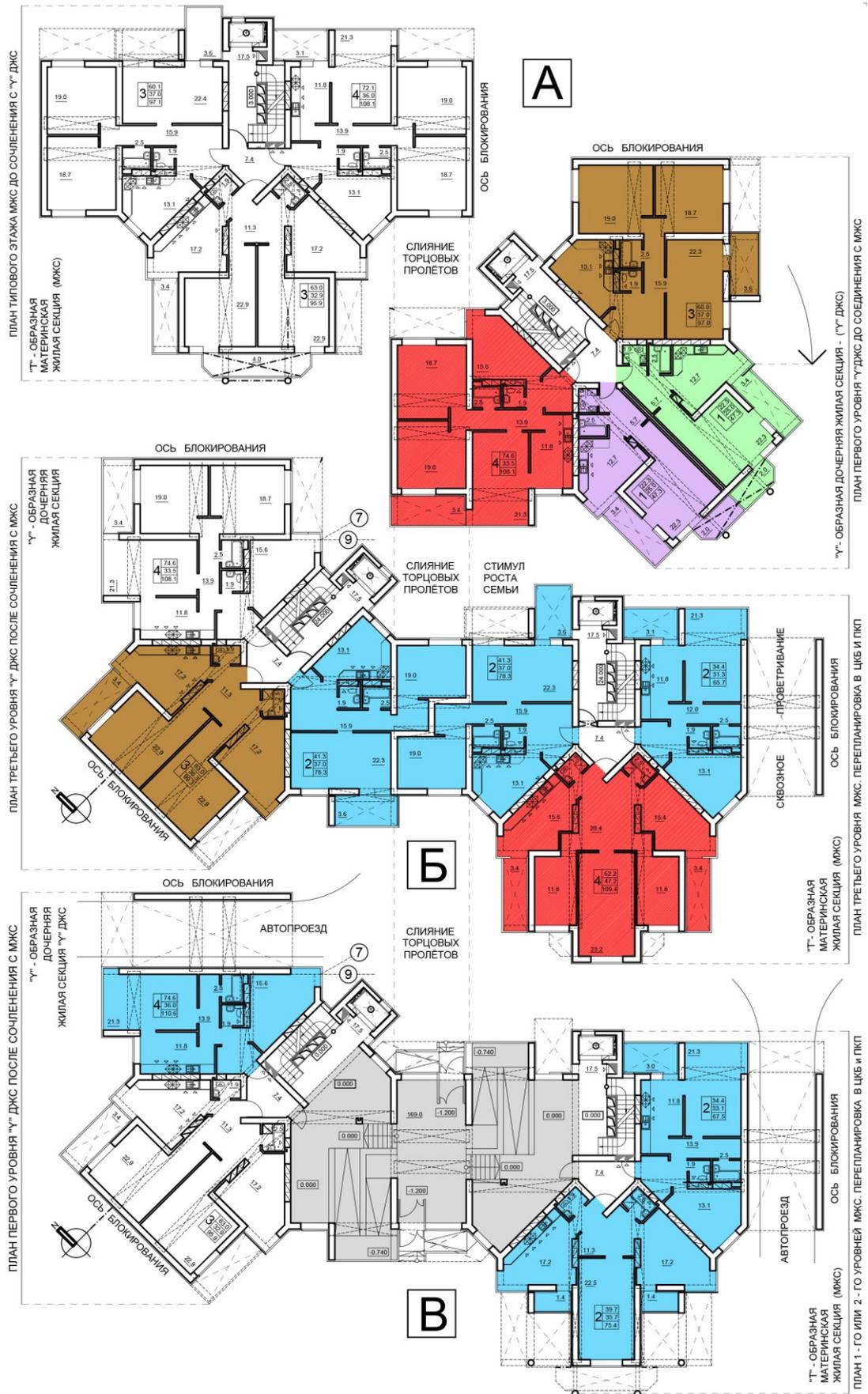


Рис. 4. Схема парного соединения секций №№ 01 и 02; 08 и 09. (Иллюстрация автора).
Fig 4. Scheme of pair connection of sections No. 01&02; 08 &09. (Illustration by the author)

Этот же метод предусматривает размещение автостоянок жителей только под дворами ССЖЗ. Предложенная рекомендация позволит избежать дополнительных экономических расходов при попытке компенсировать нормативный запрет размещения автостоянок непосредственно под жилыми квартирами. *Третья задача:* создание условий энергетической эффективности квартир решается тремя методами: *Первый метод* – возможность изменения типов квартир для увеличения периода инсоляции и получения дополнительной тепловой энергии (рис. 4 А-В); На рисунке 4 представлены парные секции с типами квартир, общая площадь которых менее 26 м²/чел и соответствует уровню комфорта квартир, установленных в РНПП РТ до 2025 года. Схема А рисунка 4: секции МЖС и «У» ДЖС - до изменения типологии квартир. Многокомнатность квартир схемы А соответствует увеличенному коэффициенту семейности южных регионов России [13].

Можно выделить основные результаты исследования:

- 1 - расшифрованная методология создания сотовой сочленённой жилой застройки (ССЖЗ), не существующей в реализации.
- 2 – сокращение времени проектирования ССЖЗ в виде двух спаренных жилых секций, последовательное соединение которых между собой создаёт ССЖЗ.
- 3 - три метода трансформации квартир, приводящие их тип к коэффициенту семейности РТ и средней полосы России. Первый метод - горизонтальное изменение типа квартир: на стыках секций (Рис.4Б); Второй метод - вертикальное изменение типа квартир: в ЦКБ МЖС (Рис.4В). Третий метод - трансформация пространства эксплуатируемой квартиры самими жильцами, приводящей к получению дополнительной жилой комнаты. Метод стимулирует рост коэффициента семейности России отсутствием процедуры покупки новой квартиры. Метод не изменяет каркас здания, но предусматривает перепланировку, используя конструктив открытой лоджии, обозначенной пунктирными линиями её границ. Жильцы смогут «повернуть» гостиную на место открытой лоджии, освободив место новой жилой комнате.
- 4 - патент плоского ригеля автора настоящей статьи, обозначенный на рисунке 4 (А, Б, В) двумя параллельными линиями и диагоналями между ними в виде пунктиров [22].
- 5 - регулирования микроклимата двора, передающего тепловую энергию от поверхности двора и внутренних фасадов ССЖЗ квартирам. Метод создаёт возможность установки оборудования в сквозные проёмы торцовых пролётов секций и применить компьютерные программы, регулирующие инсоляцию (рис. 4Б) [20].
- 6 – повышение площади благоустройства от нормы МНПП на 8,6 % и плотности населения до 419 чел./га. Обе цифры считаются минимальной нормой в активно развивающихся поселениях стран мира. Например, статистика плотности населения Барселоны и Сеула - более 1600 чел./га [23]. Указанная статистика предсказуемо наводит на мысль о дискомфорте проживания и оттоке населения из них. Но этого не происходит. Потому, что муниципалитеты поселений увеличивают комфорт проживания за счёт передачи улиц под пешеходные зоны [24]. Рассматриваемая тенденция по увеличению площади пешеходных пространств закладывается и отечественными архитекторами в рекомендации научных исследований при анализе условий комфортности проживания существующих городов, законодательные сроки действия генеральных планов которых подходят к завершению [25].

4. Заключение

4.1). *Первая задача* исследования решена созданием сотовой сочленённой жилой застройки (ССЖЗ), расположенной на стилобате территории в 9,0 га с ликвидацией существующих местных проездов. В решении задачи использовано отсутствие нормы России по взаимосвязи между параметрами жилой застройки и площадью местных проездов 4.2). *Вторая задача* исследования решена двумя модификациями парных секций, повтор в блокировании которых создаёт ССЖЗ. 4.3). *Третья задача* исследования решается двумя методами трансформации типологии квартир для увеличения периода инсоляции квартир и соответственно получения ими дополнительной тепловой энергии.

Список литературы / References

1. Пиир А.М. «Утраченный двор» Université de Paris-Sorbonne [Piir A.M. "The Lost Yard". Université de Paris-Sorbonne] 2010 P. 149-171, // URL: <https://DOI.org/10.3406/casla.2010.1095> (reference date: 24.04.22)
2. Francis J/ D'Addario «Personsl safety and security playbook». Risk Mitigation Guidance for Individuals, Families, Organizations, and Communities. Chapter 5 - Home Safety and Security. Elsevier. Book. 2014, P. 72-81 // URL: <https://DOI.org/10.1016/B978-0-12-417226-5.00005-1>
3. Лавров Л.П. Развитие внутриквартальных территорий исторического центра Санкт-Петербурга с учетом потребительской деятельности населения [Lavrov L.P. Development of the inner-block territories of the historical center of St. Petersburg taking into account consumer activity of the population // Academia. Architecture and construction. 2018. №1. P. 28-35] // Academia. Архитектура и строительство. 2018. №1. Стр 28-35 // DOI: 10.22337/2077-9038-2018-1-28-35
4. Смирнов А.В. Николай Ладовский: каким был рационализм в советской архитектуре? Часть 2 [Smirnov A.V. Nikolai Ladovsky: what was rationalism in Soviet architecture? Part 2. Shkola zhizni.ru] // Школа жизни.ru, published 06.02.2021, updated 16.09.2022 // URL: <https://www.shkolazhizni.ru/culture/articles/104141/> (reference date: 16.08.2023)
5. Хан-Магомедов С.О. Архитектура Советского авангарда. Книга 1. М. Стройиздат, 1996 г, стр. 586 [Khan-Magomedov S.O. The architecture of the Soviet avant-garde. Book 1. M. Stroyizdat, 1996, P. 586] // URL: <https://tehne.com/library/han-magomedov-s-o-arhitektura-sovetskogo-avangarda-kniga-pervaya-problemy-formoobrazovaniya-mastera-i-techeniya-moskva-1996> (reference date: 16.08.2023)
6. Жилищное строительство и жилая среда [Housing construction and living environment] // История архитектуры и градостроительства [History of architecture and urban planning] 2021 // URL: <http://townevolution.ru/books/item/f00/s00/z0000026/st003.shtml> рис.16 (reference date: 26.10.2022)
7. Образцово-перспективный жилой район Норашен на 25 тыс. жителей [Exemplary and promising residential area of Norashen for 25 thousand inhabitants] // URL: https://vk.com/wall-58780793_55 (reference date: 19.11.2022)
8. Дубынин Н. В. Многолучевые высотные здания в жилищном строительстве [Dubynin N. V. Multi-beam high-rise buildings in housing construction] // Архи.ру. 15.05.2007. Рис 2 «а», Рис.19 «а, б, в» // URL: <https://archi.ru/elpub/91208/mnogoluchevye-vysotnye-zdaniya-v-zhilishnom-stroitelstve> (reference date: 16.08.2023).
9. Николаев С.В. От реновации к национальной программе модернизации жилищного фонда [Nikolaev S.V. From renovation to a national housing modernization program] // АГСПКД // URL: <https://agspkd.ru/publikacii/ot-renovacii-k-nacionalnoj-programme-modernizacii-zhilishchnogo-fonda> (reference date: 16.08.2023)
10. Sundborg B, Szybinska Matusiak B, Arbab S «Perimeter blocks in different forms – aspects of daylight and view», IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 323 (2019) 012153 IOP Publishing // doi:10.1088/1755-1315/323/1/012153 // URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/323/1/012153/pdf>
11. Tagir Nureev and Anton Popov. Perspectives for using a three-beam spaceplanning structure in creating residential grid structure development // IOP Publishing Conference Series: Materials Science and Engineering 890 (2020) 012004 // URL: DOI:10.1088/1757-899X/890/1/012004
12. Nureyev Tagir, Popov Anton, Nureyeva Dinara. Methodology for creating a residential three rayed space-planning structure // E3S Web Conf., 274 (2021) 01037 // URL: <https://DOI.org/10.1051/e3sconf/202127401037>
13. Институт демографии им А.Г. Вишневого НИУ «ВШЭ». Число и размер частных домохозяйств по субъектам РФ [Institute of Demography named after A.G. Vishnevsky National Research University "Higher School of Economics". Number and size of private households by subjects of the Russian Federation.] Демоскоп weekly / № 993 – 994, 27.07 2023 // demoscope.ru: weekly internet publishing house // URL: http://www.demoscope.ru/weekly/ssp/rus_hh_10.php (reference date: 24.08.23).

14. Фрагмент карты города Казань в поисковой системе «Яндекс-карты» [A fragment of the map of the city of Kazan in the Yandex-maps search engine] // URL: <https://yandex.ru/maps/43/kazan/?ll=49.113810%2C55.817918&z=17> (reference date: 24.08.23)
15. ГОСТ по "зеленому" строительству многоквартирных домов вступает в силу в России. [GOST (State standard) on "green" construction of apartment buildings comes into force in Russia // TASS information agency] // Информационное агенство ТАСС // URL: <https://tass.ru/nedvizhimost/16210847> (reference date: 16.08.2023)
16. Тим Скоренко. Как Жак-Ив Кусто придумал турбопарус и что такое эффект Магнуса [Tim Skorenko. How Jacques-Yves Cousteau invented the turbosail and what is the Magnus effect] // Techinsider.ru Технологии / Транспорт 14.06.2023. //URL: <https://www.techinsider.ru/technologies/11383-parusa-v-vide-kolonn-effekt-magnusa/> (reference date: 16.08.2023)
17. Abdulbasit Almhafdy and others. Impacts of Courtyard Geometrical Configurations On Energy Performance of Buildings. // AMER International Conf. on Quality of Life Wina Holiday Villa. Environment-Behaviour Proceedings, 4 (№10), 2019, P. 29-36. // URL: <https://DOI.org/10.21834/e-bpj.v4i10.1637>
18. Nasibeh Sadafi and others. Evaluating thermal effects of internal courtyard in a tropical terrace house by computational simulation. // Energy and Buildings Volume 43, Issue 4, April 2011, P. 887-893 // URL: <http://dx.DOI.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.009>
19. Мягков М.С. Микроклимат и биоклиматическая комфортность традиционной арабской застройки [Myagkov M.S. Microclimate and bioclimatic comfort of traditional Arab buildings // AMIT.2019. № 04 (49) 2019. P.235 – 261] // AMIT.2019. № 04 (49) 2019 г. С.235 – 261// URL: https://marhi.ru/AMIT/2019/4kvart19/PDF/16_myagkov.pdf (reference date: 10.07.2023)
DOI: 10.24411/1998-4839-2019-00017
20. Xiaodong Xu and others. Performance-Based Evaluation of Courtyard Design in China's Cold-Winter Hot-Summer Climate Regions. // Sustainability 2018, 10 (11), 3950; // URL: <https://doi.org/10.3390/su10113950>
21. Дембич АА. Актуальные проблемы архитектуры и градостроительства Татарстана в зеркале мнений профессионального сообщества [Dembich A.A. Actual problems of architecture and urban development of Tatarstan in the mirror of opinions of the professional community // Architecture and construction of Russia. 2022. № 2. P. 4] // Архитектура и строительство России. 2022. № 2. Стр.4 // URL: <https://asrmag.ru/2-2022/ASR-2-22-Dembich-1.pdf> (reference date: 10.07.2023)
22. Сборный железобетонный каркас: пат 132814 Рос. Федерация [Precast reinforced concrete frame: patent 132814 Rus. Federation] 2013107055/03; заявл. 18.02.13; опубл. 27.09.13, Бюл. № 27 // URL: <http://poleznayamodel.ru/model/13/132814.html> (reference date: 17.07.2023)
23. Путинцев А.Л. Плотность населения как показатель качества комфорта городской среды [Putintsev A.L. Population density as an indicator of the quality of urban environment comfort // Areas development management. 2016. № 4.] Управление развитием территорий. 2016. № 4. Табл. // URL: <https://urtmag.ru/public/350/> (reference date: 16.08.2023)
24. Как в Барселоне делают самую радикальную урбанистическую революцию в мире [How Barcelona is making the most radical urban revolution in the world // Moscow transport. 19.07.2016] Московский транспорт. 19.07.2016. // URL: https://transport.mos.ru/mostrans/all_news/7293 (reference date: 16.08.2023)
25. Дембич А.А., Закирова Ю.А. Проблемы пространственного планирования г. Набережные Челны в постсоветский период [Dembich A.A., Zakirova Yu.A. Problems of Naberezhnye Chelny spatial planning in the post-Soviet period. // Vestnik MGSU. 2020. Vol. 15. Iss. 5. P. 641-654.] // Вестник МГ СУ. 2020. Т. 15. Вып. 5. С. 641–654. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.5.641-654

Информация об авторе

Нуреев Тагир Магданурович, Главный архитектор, ООО «Зодчество», г. Казань,
Российская Федерация
E-mail: ntm60@mail.ru

Information about the author.

Tagir M. Nureyev, Chief Architect, LLC "Zodchestvo", Kazan, Russian Federation
Email: ntm60@mail.ru

УДК: 004.92, 004.94, 69, 72, 004
DOI: 10.52409/20731523_2023_3_257
EDN: UWTZJU



Моделирование стержневых и полигональных конструкций с использованием программы Grasshopper

К.А. Шумилов¹, Ю.А. Гурьева¹

¹Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация: *Постановка задачи.* Многие архитектурные объекты в своём составе содержат стержневые элементы и полигональные конструкции с деталями, повторяющимися по определённой закономерности. При проектировании подобных архитектурных объектов сложной геометрии возникает ряд проблем и сложностей, с которыми сталкивается каждый проектировщик. Актуальность исследования обусловлена необходимостью выбора наиболее подходящего программного комплекса для создания конкретного архитектурного объекта. Также требуется сформировать параметрические модели стержневых и полигональных объектов сложной геометрии и разработать программный код при моделировании требуемых конструкций. При этом необходимо оптимизировать разработанный скрипт при работе с моделью каждого объекта. В процессе работы необходимо решить разнообразные проблемы, возникающие при передаче (экспорте/импорте) модели объекта из программы для моделирования объекта в программу для разработки архитектурного проекта.

Цель исследования: разработать наиболее оптимальные программные коды в Grasshopper для моделирования конкретных объектов, представляющих собой стержневые и полигональные конструкции сложной геометрии, при работе над архитектурными проектами.

Задачи исследования: для представленных объектов (содержащих стержневые и полигональные элементы) создать параметрические интерактивные модели; для формирования каждой модели разработать программный код в программе визуального (параметрического) программирования, позволяющей интерактивно, в режиме реального времени, варьировать вид моделируемого объекта; выбрать программу визуального (параметрического) программирования; осуществить возможность внесения изменений параметров в программный код в интерактивном режиме; создать универсальный скрипт, позволяющий снизить затраты ресурсов компьютера и пользователя при работе с моделями представленных объектов.

Результаты. В процессе исследования были разработаны универсальные программные коды в Grasshopper, позволяющие оперативно моделировать представленные объекты и импортировать их в готовые проекты, разрабатываемые в различных графических комплексах программ. В качестве объектов были выбраны стержневые и полигональные пространственные структуры как наиболее востребованные при архитектурном проектировании. Для выбранных объектов были созданы и оптимизированы скрипты, позволяющие снизить затраты времени проектировщика и ресурсы компьютера.

Выводы. Работа производилась в программе Grasshopper, предлагающей широкие возможности для параметрического моделирования сложных объектов, а также позволяющая импортировать созданные модели в 3D формате в другие графические пакеты.

Ключевые слова: архитектурное проектирование, моделирование, стержневые конструкции, полигональные конструкции, сложная геометрия, параметрическое программирование, визуальное программирование, Grasshopper, Rhino, Archicad, Revit

Для цитирования: Шумилов К.А., Гурьева Ю.А. Моделирование стержневых и полигональных конструкций сложной геометрии с использованием программы Grasshopper // Известия КГАСУ, 2023, № 3(65), с. 257-269, DOI: 10.52409/20731523_2023_3_257, EDN: UWTZJU

Modeling of rod and polygonal structures using the Grasshopper program

К.А. Shumilov¹, Yu.A. Guryeva¹

¹St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU), St. Petersburg, Russia

Abstract: *Problem statement.* Many architectural objects in their composition contain rod elements and polygonal structures with details that repeat according to a certain law. When designing such architectural objects of complex geometry, a number of problems and difficulties arise that every designer faces. The relevance of the study is due to the need to choose the most suitable software package for creating a specific architectural object. It is also required to form parametric models of rod and polygonal objects of complex geometry and to develop a program code for modeling the required structures. At the same time, it is necessary to optimize the developed script when working with the model of each object. In the process of work, it is also necessary to solve various problems that arise when transferring (exporting/importing) an object model from an object modeling program to an architectural design development program.

The purpose of the study: to develop the most optimal program codes in Grasshopper for modeling specific objects representing rod and polygonal structures of complex geometry when working on architectural projects.

Research objectives: it is required to create parametric interactive models for the presented objects (containing rod and polygonal elements) necessary for the implementation of architectural projects; to form each model, it is necessary to develop a program code using visual (parametric) programming that allows interactively, in real time, to vary the type of the object being modeled; it is necessary to choose a visual (parametric) programming program that will allow you to obtain a complex-shaped object model for further import into BIM programs (Revit, Renga, Archicad and others) and work with the model in these graphical software complexes; implement the possibility of making changes to the parameters in the program code in an interactive; create a universal script that allows you to reduce the cost of computer and user resources when working with models of the presented objects.

Results. In the course of the research, the authors developed the universal program codes in Grasshopper, allowing you to quickly simulate the presented objects and import them into finished projects developed in various graphic software packages.

The rod and polygonal spatial structures were chosen as objects as the most in demand in architectural design. Created and optimized scripts for the selected objects allow reducing the designer's time and computer resources.

Conclusions. The authors used the Grasshopper program, which offers many opportunities for parametric modeling of complex objects, and allows you to import the created 3D-models into other graphic packages and BIM programs without data loss, including domestic computer design packages - Renga, NanoCAD and others.

Keywords: architectural design, modeling, rod structures, polygonal structures, complex geometry, parametric programming, visual programming, Grasshopper, Rhino, Archicad, Revit

For citation: Shumilov K.A., Guryeva Yu.A. Modeling of rod and polygonal structures of complex geometry using the Grasshopper program // News KSUAE, 2023, № 3(65), p. 257-269, DOI: 10.52409/20731523_2023_3_257, EDN: UWTZJU

1. Введение

В процессе архитектурного проектирования при работе со стержневыми и полигональными конструкциями сложной геометрии возникает ряд проблем, с которыми сталкивается каждый проектировщик [1-3].

В статье [1] анализируются проблемы параметрического формообразования при моделировании объектов алгоритмической архитектуры. В работе [2] описываются преимущества использования алгоритмических программных комплексов, таких, как Rhino и Grasshopper, для решения сложностей при моделировании архитектурных объектов. Авторы статьи [3] анализируют проблемы, возникающие при интеграции трехмерной модели объекта параметрической архитектуры из Revit в другие программные комплексы. В [4] описываются возможности программ Grasshopper и Dynamo при работе с объектами разной геометрии, а также при анализе климатических условий. Примеры совместной работы в Grasshopper над объектами параметрической архитектуры представлены в работе [5].

К таким проблемам относятся: выбор наиболее подходящего программного комплекса для создания конкретного архитектурного объекта, например, в Revit [6], моделирование стержневых объектов сложной геометрии [7,8], разработка программного кода при моделировании конструкции, оптимизация разработанного скрипта при работе с моделью объекта, проблема передачи (экспорта/импорта) из программы для моделирования объекта в программу для разработки архитектурного проекта [9,10].

Часть этих проблем успешно решают такие программные комплексы, как Rhino-Grasshopper и Dynamo-Revit. Предлагается использовать параметрическое моделирование, как для архитектурного формообразования, так и для моделирования конструкций сооружения [11]. Существуют особенности применения подхода form-finding для решения задачи по поиску оптимальной формы оболочки в программном комплексе Rhino [12]. Предлагается внедрение Grasshopper 3D в процесс проектирования для оптимизации расчёта несущих конструкций [13]. Авторы приводят примеры использования программ Grasshopper и Rhino при проектировании архитектурных объектов в Archicad [14,15].

Необходимости работы именно с объектами сложной архитектурной формы посвящены работы [16-18]. Изучение влияния таких объектов на человека производилось в работах [19-21].

Но одной из самых главных проблем является оптимизация программного скрипта для моделирования конкретного архитектурного объекта. Решению именно этой проблемы и посвящена предложенная статья. При этом, в качестве архитектурных объектов были выбраны именно стержневые и полигональные конструкции, как наиболее часто используемые при проектировании.

Цель исследования: разработать наиболее оптимальные программные коды в Grasshopper для моделирования конкретных объектов, представляющих собой стержневые и полигональные конструкции сложной геометрии, при работе над архитектурными проектами.

Задачи исследования.

1. Для представленных объектов (содержащих стержневые и полигональные элементы), необходимых для выполнения архитектурных проектов, требуется создать параметрические интерактивные модели.
2. Для формирования каждой модели необходимо разработать программный код в программе визуального (параметрического) программирования, позволяющей интерактивно, в режиме реального времени, варьировать вид моделируемого объекта.
3. Необходимо выбрать программу визуального (параметрического) программирования, которая позволит получить модель объекта сложной формы для дальнейшего импорта в BIM-программы (Revit, Renga, Archicad и другие) и работать с моделью в этих графических программных комплексах.
4. Осуществить возможность внесения изменений параметров в программный код в интерактивном режиме для получения модели, соответствующей требованиям проектировщика.

5. Создать по возможности универсальный скрипт, позволяющий снизить затраты ресурсов компьютера и пользователя при работе с моделями представленных объектов в достаточно широком диапазоне входных параметров.

2. Материалы и методы

Для моделирования и исследования были выбраны следующие архитектурные объекты и формы: павильон; полигональная архитектурная форма из элементов, форма которых меняется по заданной закономерности; стержневая конструкция навеса; грасс; купол-навес; стержневая малая архитектурная форма; навес; полигональная малая архитектурная форма; стержневая полигональная малая архитектурная форма. Модели этих объектов потребовались проектировщикам при работе над проектами. Для моделирования использована программа Grasshopper, позволяющая без потери данных передавать разрабатываемые объекты в программы Archicad и Revit – наиболее популярные в настоящее время программные комплексы для архитектурно-строительного BIM-проектирования.

Для каждого объекта был подобран наиболее оптимальный код, который позволял ускорить процесс работы не только над самой моделью, но и работы с ней в пакетах BIM-проектирования. Были рассмотрены различные ноды, инструменты и их связки в процессе формирования программного кода. Показана работа с точками, линиями, плоскостями и поверхностями. В том числе были использованы инструменты:

XZPlane – создание плоскости;

ScaleNU – масштабирование объекта с неравными коэффициентами;

RotateAxis – вращение относительно оси;

Mirror – зеркальное отражение;

Loft – создание поверхности лфтингом (создание объектов из плоских форм путем формирования оболочки по опорным сечениям, расположенным вдоль заданной траектории произвольной формы) через набор секущих кривых;

SpaceTrussStructure – создание пространственной ферменной конструкции на поверхности;

MeshSphere – создание полигональной сетки в виде сферы;

QuadPanels – создание четырехугольных панелей на поверхности;

Area – вычисление площади для brep (объектов, представленных в виде внешних поверхностей), полигональных сеток (mesh) и плоских замкнутых кривых (planar closed curves);

Scale – масштабирование объекта равномерно во всех направлениях;

OffsetSurface – создание поверхности смещением точки базовой поверхности на фиксированную величину;

PlaneSrf – создание плоской поверхности;

Split – разбиение списка на отдельные части;

Pop3D – заполнение трехмерной области точками;

Voronoi – создание орнаментов Вороного из набора точек;

Explode – разбиение кривой на меньшие сегменты;

Pipe – создание трубчатой поверхности вокруг направляющей кривой;

DivideCurve – деление кривой;

PFrame – создание перпендикулярного (нулевого скручивание) фрейма в указанном параметре кривой;

Pline – создание составной полилинии, соединяющей точки в наборе;

Polygon – создание многоугольника (опционально: с закруглёнными углами);

Curve – создание кривой из контрольных точек nurbs;

DivideCurve – деление кривой на сегменты равной длины;

Range – создание диапазона чисел; числа располагаются равномерно внутри числового домена;

Graph Mapper – позволяет переопределить набор чисел;

Multiplication – математическое умножение;

Move – перемещение;

Arc3Pt – создание дуги через три точки;

- MeshSurface** – создание поверхности UV (горизонтально-вертикальной) полигональной сетки (Surface UV mesh);
- Triangulate** – преобразование всех четырехугольных граней полигональной сетки в треугольные;
- WaverBird** – **Lunchbox**, программа для топологического моделирования, которая содержит многочисленные операторы подразделения и преобразования;
- WbMeshThicken** – сгущение сетки;
- WbCatmull** – автоматическое увеличение количества граней до «n» для создания более гладкой поверхности;
- ClarkSubdivision** – сглаживание шестиугольников с помощью подразделения сетки Catmull-Clark посредством превращения их в круглые отверстия; используется для сопоставления шестиугольной сетки с поверхностью;
- Interpolate** – создание кривой, интерполированной через набор точек;
- RuledSurface** – создание линейчатой поверхности;
- ConstructPlane** – построение плоскости из исходной точки и осей {x}, {y};
- LineSdl** – создание отрезка прямой по точке начала (start point), касательной (tangent) и длине (length);
- Sweep2** – создание поверхности протягиванием кривой профиля по двум кривым направляющим;
- PolarArray** – создание массива в полярной системе координат;
- DivLength** – разделение кривой на сегменты заданной длины;
- IntCrv** – создание интерполированной кривой через набор точек;
- Boundary Surfaces** – создание плоских поверхностей из набора граничных краевых кривых.

3. Результаты и обсуждения

Павильон. Для моделирования этого объекта были созданы вспомогательные точки, линии и плоскости. Затем было сформировано основание павильона, в том числе отдельные его элементы. После этого моделировались кривые-направляющие для будущих стержневых элементов купола, а также горизонтальные и вертикальные импосты, по которым была сформирована поверхность для остекления (рис. 1).

Возможно изменение параметров:

Уровень изгиба поверхности купола за счет изменения изгиба кривых



Количество вертикальных импостов за счет изменения количества кривых и горизонтальных - за счет изменения количества сегментов при делении



Цвет стеклянных панелей при помощи цветового круга

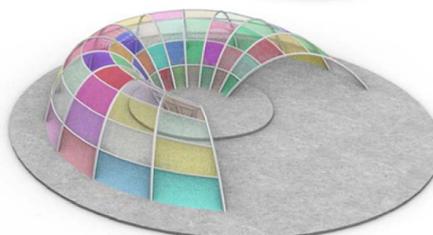
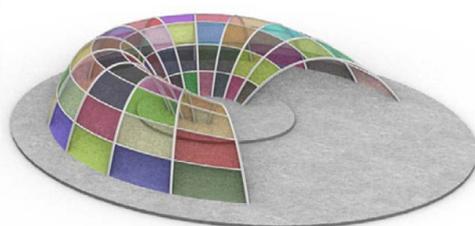


Рис. 1. Визуальное программирование Павильона в программе Grasshopper (иллюстрация авторов)
Fig. 1. Visual programming of the Pavilion in the Grasshopper program
(illustration by the authors)

Купол-навес. Для моделирования купол-навеса были использованы ноды **PlaneSrf**, **Split**, **Pop3D**, **Voronoi**, **Explode**, **Pipe** (рис. 2).



Рис. 2. Визуальное программирование Купола-навеса в программе Grasshopper (иллюстрация авторов)

Fig. 2. Visual programming of the Canopy Dome in the Grasshopper program (illustration by the authors)

Навес. Создание навеса было разделено на несколько этапов (рис. 3).

1. Создание двух кривых в Rhino на уровне 0,000, которые будут являться основанием арки.
2. Создание двух геометрических нодов **Curve** и назначение им созданных кривых.
3. Создание динамического параметра **NumberSlider**.
4. Создание двух компонентов **DivideCurve**, присоединение **Curve** к параметрам ввода **C**, подключение **NumberSlider** к параметру ввода **N**. В результате кривые разделены на равное количество отрезков, которое можно контролировать, изменяя значение параметра **NumberSlider**.
5. Соединение соответствующих точек кривых прямыми линиями с помощью инструмента **Line**: подсоединение параметра вывода **P** компонента **DivideCurve** к параметрам ввода компонента **Line**.
6. Создание инструментом **PointOnCurve** точек в середине полученных прямых.
7. Сдвиг полученных точек на определенную высоту с помощью инструмента **Move**.
8. Назначение параметра высоты каждой точке. Для этого используются инструменты **Range**, **Graph Mapper**, **Multiplication**.
9. Формирование кривой, проходящей через каждые три точки, лежащие в одной плоскости с помощью инструментов **Arc3Pt**, **DivideCurve**, **Move**.
10. Построение плоскости на полученных арках (инструмент **Loft**).
11. Деление криволинейной поверхности на полигоны инструментом **MeshSurface**.
12. Преобразование четырёхугольных полигонов в треугольные (инструмент **Triangulate**).
13. Создание отверстий в полигонах (плагин **WaverBird**, инструмент **WbPictureFrame**).
14. Назначение толщины (инструмент **WbMeshThicken**).
15. Назначение параметров сглаженности форм (инструмент **WbCatmull-ClarkSubdivision**).
16. Импортирование модели в Rhino.

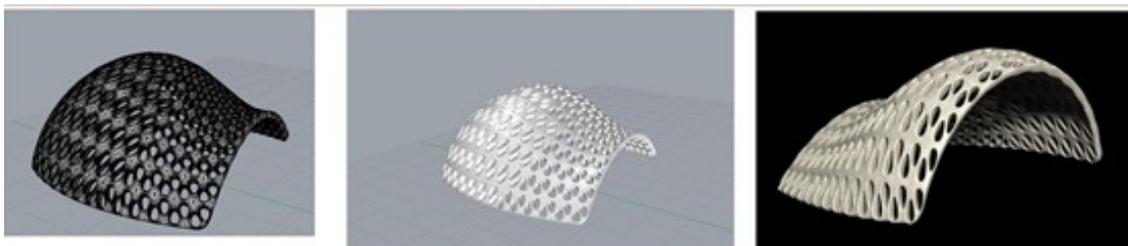


Рис. 3. Визуальное Навеса в программе Grasshopper (иллюстрация авторов)

Fig. 3. Visual programming of the Canopy in the Grasshopper program (illustration by the authors)

Стержневая конструкция навеса. Сначала производилось моделирование отдельных секций (рис. 4). Затем из полученных сегментов формировались фермы. На следующем этапе из ферм был создан пространственный навес.

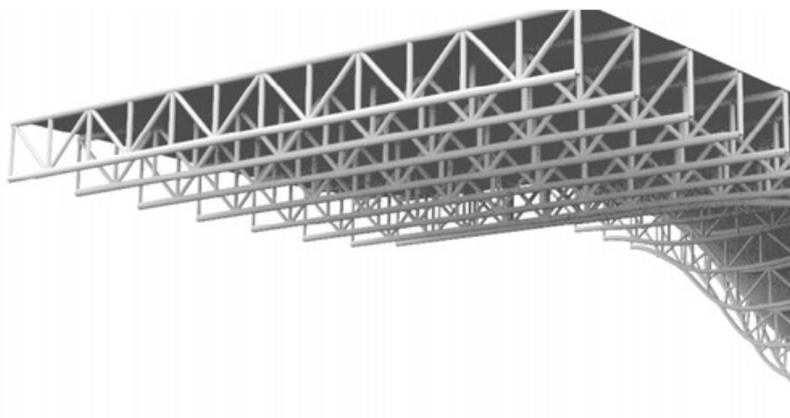


Рис. 4. Визуальное Стержневой конструкции навеса в программе Grasshopper (иллюстрация авторов)

Fig. 4. Visual programming of the Rod structure of the canopy in the Grasshopper program (illustration by the authors)

Полигональная архитектурная форма из элементов, форма которых меняется по заданной закономерности. На первом этапе была сформирована кривая, задающая направление траектории в процессе формообразования (рис. 5) Затем моделировались сечения. Производилось ориентирование созданных сечений относительно заданной траектории. Формировались промежуточные профили. Создавались граничные поверхности для назначения формы элементов сечений.



Рис. 5. Визуальное программирование с возможностью интерактивного внесения изменений параметров Полигональной архитектурной формы в программе Grasshopper (иллюстрация авторов)

Fig. 5. Visual programming with the ability to interactively change the parameters of the Polygonal architectural form in the Grasshopper program (illustration by the authors)

Полигональная малая архитектурная форма. Создание модели производилось в четыре этапа (рис. 6):

1. Формирование кривой, задающей основное направление формообразования. Для этого использованы инструменты **DivideCurve** и **Interpolate**.

2. Создание нижней поверхности. Назначение высоты, направления, по которому будет сформирована поверхность, ширины (модификаторы **Move**, **RuledSurface**, **Linesol**, **ConstructPlane**, **LineSdl**, **Sweep2**).

3. Формирование верхней поверхности. Аналогично созданию нижней поверхности.

4. Моделирование вертикальных стержней. Для этого осуществляется проецирование кривой на плоскость (инструмент **Proection**). Назначение требуемого количества точек, соответствующего количеству будущих стержней (модификаторы

Area, LineSdl). Формирование направляющей поверхности (инструменты **PolarArray, Extrude**). Назначение вектора выдавливания и толщины (модификатор **Extrude**).



Рис. 6. Визуальное программирование полигональной архитектурной формы в программе Grasshopper (иллюстрация авторов)

Fig. 6. Visual programming of the Polygonal architectural form in Grasshopper (illustration by the authors)

Стержневая полигональная малая архитектурная форма. Модель состоит из повторяющихся элементов (дисков эллиптической формы), расположенных упорядоченно по направляющим, скрученных в клубок (рис. 7).

Для разработки скрипта модели были использованы модификаторы **PFrames, DivLength, IntCrv, Boundary**.



Рис. 7. Визуальное программирование Стержневой полигональной малой архитектурной формы в программе Grasshopper (иллюстрация авторов)

Fig. 7. Visual programming of the Rod polygonal small architectural form in the Grasshopper program (illustration by the authors)

Стержневая малая архитектурная форма. Для создания модели стержневой малой архитектурной формы сначала была сформирована кривая, задающая основное направление формы. Эта кривая была разделена на равные по длине сегменты с помощью инструмента **DivideCurve**. Затем была создана рама с помощью **PFrame**. Модель полигона с дополнительными рёбрами круглого поперечного сечения была получена благодаря ноду **Polygon**. Также использовались инструменты **Explode, Pline, Pipe** (рис. 8).



Рис. 8. Визуальное программирование Стержневой малой архитектурной формы в программе Grasshopper (иллюстрация авторов)

Fig. 8. Visual programming of the Rod small architectural form in the Grasshopper program (illustration by the authors)

Грасс. При моделировании грасса по сформированным линиям были созданы поверхности с помощью инструментов **XZPlane**, **ScaleNU**, **RotateAxis**, **Mirror**, **Loft**. Для создания рёбер были использованы ноды **SpaceTrussStructure**, **MeshSphere**, **Pipe**. Инструментами **QuadPanels**, **Area**, **Scale** и **OffsetSurface** сформирована поверхность между рёбрами, которая затем была разделена на панели (рис. 9).



Рис. 9. Визуальное программирование Грасса в программе Grasshopper (иллюстрация авторов)

Fig. 9. Visual programming of the Grass in the Grasshopper program (illustration by the authors)

4. Заключение

В работе рассмотрены технологии, инструменты и модификаторы для моделирования стержневых и полигональных архитектурных объектов сложной формы:

1. Для представленных объектов, необходимых для выполнения архитектурных проектов, получены параметрические модели.

2. Модели были разработаны для объектов, содержащих стержневые и полигональные элементы, как для наиболее востребованных в процессе проектирования.

3. Для работы была выбрана программа визуального (параметрического) программирования Grasshopper, которая позволяет получить модель объекта сложной формы для дальнейшего импорта в BIM-программы (Revit, Renga, Archicad и другие) и работать с моделью в этих графических программных комплексах.

4. Для формирования каждой из представленных моделей разработан программный код в программе визуального (параметрического) программирования Grasshopper.

5. Для создания модели, соответствующей требованиям проектировщика, в исходный программный код модели в Grasshopper могут быть внесены изменения параметров, которые сразу же приводят к изменениям в самой модели, при этом, всё происходит в удобном для работы интерактивном режиме.

6. Для представленных моделей созданы скрипты, позволяющие снизить затраты ресурсов компьютера и пользователя при работе с моделями представленных объектов.

Статья публикуется по результатам проведения научно-исследовательской работы, проводимой в рамках конкурса грантов на выполнение научно-исследовательских работ научно-педагогическими работниками Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (СПбГАСУ) в 2023 году.

Список литературы / References

1. Гоголкина А. В. Особенности формирования конструкций в параметрической архитектуре // Архитектура и современные информационные технологии. 2018. №1(42). С. 355-363. [Gogolkina A. V. Features of the formation of structures in parametric architecture // Architecture and modern information technologies. 2018. No. 1 (42). P. 355-363.]
2. Бжахов М. И., Ефимова М. М., Журтов А. В. Алгоритмическое проектирование в архитектуре // Инженерный вестник Дона. 2018. №2 (49). С. 166. [Bzhakhov M.I., Efimova M.M., Zhurtov A.V. Algorithmic design in architecture // Engineering Bulletin of the Don. 2018. No. 2 (49). P. 166.]
3. Кравченко Г. М., Труфанова Е. В., Манойленко А. Ю., Литовка В. В. Применение информационного моделирования при исследовании уникальных объектов параметрической архитектуры // Инженерный вестник Дона. – Ростов-на-Дону. 2019. №1(52). С. 128-134. [Kravchenko G. M., Trufanova E. V., Manoylenko A. Yu., Litovka V. V. Application of information modeling in the study of unique objects of parametric architecture // Engineering Bulletin of the Don. - Rostov-on-Don. 2019. No. 1 (52). P. 128-134.]
4. Анисимова Н. В. Обзор основных плагинов средового моделирования и оптимизации геометрии в Dynamo и Grasshopper // BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры (Санкт-Петербург, 15-17 мая, 2019 г.): материалы II Международной научно-практической конференции / Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Санкт-Петербург. 2019. С. 228-233. DOI: 10.23968/BIMAC.2019.042 [Anisimova N. V. Overview of the main plug-ins for environmental modeling and geometry optimization in Dynamo and Grasshopper // BIM-modeling in the tasks of construction and architecture (St. Petersburg, May 15-17, 2019): proceedings of the II International Scientific and Practical Conference / St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Saint Petersburg. 2019. P. 228-233. DOI: 10.23968/BIMAC.2019.042]
5. Liu Hongming, Jiang Yu. The parametric modeling of one heterotypic building basing on Rhino and Grasshopper // Новые идеи нового века: материалы международной научной конференции Фад Тогу. Хабаровск. 2017. Т. 2. С. 202-207. [Liu Hongming, Jiang Yu. The parametric modeling of one heterotypic building basing on Rhino and Grasshopper // New ideas for a new century: Proceedings of the international scientific conference Fad Togu. Khabarovsk. 2017. V. 2. P. 202-207.]
6. Жуков В. С., Зацепин Е. П. Основы визуального программирования в Dynamo для проектирования в Revit // Цифровая трансформация в энергетике (Тамбов, 21-22 декабря 2021 г.): Материалы Третьей Всероссийской научной конференции / Тамбовский государственный технический университет. Тамбов. 2022. С. 103-105. [Zhukov V. S., Zatsepin E. P. Fundamentals of visual programming in Dynamo for design in Revit // Digital transformation in the energy sector (Tambov, December 21-22, 2021): Proceedings of the Third All-Russian Scientific Conference / Tambov State Technical University. Tambov. 2022. P. 103-105.]
7. Перцева А. Е., Хижняк Н. С., Радаев А. Е. Алгоритм проектирования конструкций сложной конфигурации с использованием средств автоматизации (на примере Autodesk Revit, Autodesk Autocad и Dynamo) // Транспортные сооружения. 2018. Т.5. №4. С. 4. DOI: 10.15862/04SATS418 [Pertseva A. E., Khizhnyak N. S., Radaev A. E. Algorithm for designing structures of complex configuration using automation tools (on the example of Autodesk Revit, Autodesk Autocad and Dynamo) // Transport facilities. 2018. V.5. No. 4. P. 4. DOI: 10.15862/04SATS418]
8. Андреев И. И., Мальцев В. Л. Расширенное использование возможностей Autodesk Revit на основе дополнения Dynamo // Информационные и графические технологии

- в профессиональной и научной деятельности (Тюмень, 27 ноября 2017 г.): Сборник статей Международной научно-практической конференции. / Тюменский индустриальный университет. Тюмень. 2017. С. 124-127. [Andreev I. I., Maltsev V. L. Extended use of Autodesk Revit capabilities based on the Dynamo add-on // Information and graphic technologies in professional and scientific activities (Tyumen, November 27, 2017): Collection of articles of the International Scientific and Practical Conference. / Tyumen Industrial University. Tyumen. 2017. P. 124-127.]
9. Каренгин Г. В., Есипов А. В. Динамо как способ расширения возможностей Autodesk Revit // Информационные и графические технологии в профессиональной и научной деятельности (Тюмень, 30 ноября 2018 г.): Сборник статей II Международной научно-практической конференции. / Тюменский индустриальный университет. Тюмень. 2018. С. 216-218. [Karengin G. V., Esipov A. V. Dynamo as a way to expand the capabilities of Autodesk Revit // Information and graphic technologies in professional and scientific activities (Tyumen, November 30, 2018): Collection of articles of the II International Scientific and Practical Conference. / Tyumen Industrial University. Tyumen. 2018. P. 216-218.]
 10. Валенсия Э., Рынковская М. И. Расширение моделирования в программе Revit с помощью Динамо // Научному прогрессу – творчество молодых (Йошкар-Ола, 17-18 апреля 2015 г.): материалы X международной молодежной научной конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам. / Поволжский государственный технологический университет. Йошкар-Ола. 2015. С. 95-97. [Valencia E., Rynkovskaya M. I. Expansion of modeling in the Revit program using Dynamo // Scientific progress - the creativity of the young (Yoshkar-Ola, April 17-18, 2015): materials of the X International Youth Scientific Conference on Natural Sciences and Technical Disciplines. / Volga State Technological University. Yoshkar-Ola. 2015. P. 95-97.]
 11. Ларин В. С., Клашанов Ф. К. Параметрическое моделирование в связке трех аппаратных комплексов Archicad, Rhinoceros, Grasshopper // Студенческий. Новосибирск. 2019. №10 (54). С. 6-11. [Larin V. S., Klashanov F. K. Parametric modeling in conjunction with three hardware complexes Archicad, Rhinoceros, Grasshopper // Student. Novosibirsk. 2019. No. 10 (54). P. 6-11.]
 12. Попова Е.Е., Шегай Р.А. Реализация метода «form-finding» в программном комплексе Rhinoceros // Строительство уникальных зданий и сооружений. Санкт-Петербург, 2019. №5(80). С. 17-21. [Popova E.E., Shegay R.A. Implementation of the “form-finding” method in the Rhinoceros software package // Construction of unique buildings and structures. St. Petersburg, 2019. No. 5(80). P. 17-21.]
 13. Чеснаков И.Э. Применение средств параметрического моделирования для решения задач оптимизации несущих конструкций // Сборник статей магистрантов и аспирантов Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета. Серия «Строительство». Санкт-Петербург, 2020. С. 183-191. [Chesnakov I.E. Application of parametric modeling tools for solving problems of optimization of load-bearing structures // Collection of articles of undergraduates and graduate students of the St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Series "Construction". St. Petersburg, 2020, P. 183-191.]
 14. Шумилов К.А., Гурьева Ю.А. Моделирование сложных архитектурных объектов с использованием Grasshopper, Rhino и Archicad // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. Астрахань, 2022. № 2(40). С. 145-150. DOI: 10.52684/2312-3702-2022-40-2-145-150 [Shumilov K.A., Guryeva Yu.A. Modeling of complex architectural objects using Grasshopper, Rhino and Archicad. Astrakhan, 2022. No. 2(40). P. 145-150. DOI: 10.52684/2312-3702-2022-40-2-145-150]
 15. Шумилов К.А., Гурьева Ю.А. Применение Grasshopper, Rhino и Archicad для моделирования различных форм архитектурных объектов, содержащих элементы сложной геометрии // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. Астрахань, 2022. №3(41). С. 92-95. DOI: 10.52684/2312-3702-2022-41-3-92-95 [Shumilov K.A., Guryeva Yu.A. The use of Grasshopper, Rhino and Archicad for modeling various forms of architectural objects containing elements of complex geometry // Engineering and

- Construction Bulletin of the Caspian Sea. Astrakhan, 2022. No. 3 (41). P. 92-95. DOI: 10.52684/2312-3702-2022-41-3-92-95]
16. Yakupov N.M., Kiyamov H.G., Mukhamedova I.Z. Simulation of Toroidal Shell with Local Defect // Lobachevskii Journal of Mathematics. 2020. Vol. 41, No. 7. P. 1310–1314. DOI 10.1134/S1995080220070434.
 17. Кудряшов А.В., Каюмов Р.А., Мухамедова И.З., Шакирзянов Ф.Р. Существование решения задачи о конечном деформировании круговой упругопластической оболочки // Вестник Технологического университета. 2015. Т. 18. № 3. С. 251–253 [Kudryashov A.V., Kayumov R.A., Muhamedova I.Z., Shakirzyanov F.R. Existence of a solution to the finite deformation problem of a circular elastoplastic shell // Herald of technological university. 2015. Vol. 18. No 3. P. 251–253].
 18. Якупов Н.М., Киямов Х.Г., Ахмадиев Ф.Г. Компьютерное моделирование расчета напряженно-деформированного состояния оболочечной конструкции сложной геометрии // Строительство и техногенная безопасность. 2012. № 41. С. 261–267 [Yakupov N.M., Kiyamov H.G., Akhmadiev F.G. Computer simulation of the calculation of the stress-strain state of a shell structure of complex geometry // Construction and industrial safety. 2012. No. 41. P. 261–267].
 19. Михайлов С.М., Михайлова А.С., Надыршин Н.М. Возвращение к психоаналитическому методу Ладовского в условиях современных цифровых технологий // Архитектура и строительство России. 2022. № 1 (241). С. 56–59 [Mikhailov S.M., Mikhailova A.S., Nadyrshine N.M. Appeal to the psychoanalytic method of Ladovsky in the conditions of modern digital technologies // Architecture and Construction of Russia. 2022. No 1 (241). P. 56–59].
 20. Садыкова Л.Р., Ахтямов И.И., Ахтямова Р.Х. Архитектурные принципы организации сенсорно-стимулирующих пространств дошкольных учреждений // Архитектура и современные информационные технологии. 2021. № 2 (55). С. 320–336 [Sadykova L.R., Akhtyamov I.I., Akhtyamova R.Kh. Architectural principles of organizing sensory-stimulating spaces of preschool institutions // Architecture and modern information technologies. 2021. No. 2 (55). P. 320–336.
 21. Шаймарданова К. А. Влияние визуальной среды города на психологическое состояние и здоровье человека: особенности восприятия пространства // Актуальные проблемы дизайна и дизайн-образования. Материалы IV Международной научно-практической конференции / Белорусский государственный университет. Минск. 2020. С. 198–208 [Shaimardanova K. A. Influence of the visual environment of the city on the psychological state and health of a person: features of space perception // Actual problems of design and design education. Materials of the IV International Scientific and Practical Conference / Belarusian State University. Minsk. 2020. P. 198–208]

Информация об авторах

Шумилов Константин Августович, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

E-mail: shkas@mail.ru

Гурьева Юлиана Александровна, кандидат технических наук, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

E-mail: yual2017@mail.ru

Information about the authors

Konstantin A. Shumilov, candidate of technical sciences, associate professor, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russian Federation

E-mail: shkas@mail.ru

Yuliana A. Guryeva, candidate of technical sciences, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russian Federation

E-mail: yual2017@mail.ru

Журнал «Известия КГАСУ» выходит 4 раза в год, тиражом 500 экз. Журнал является подписным изданием и включен в подписной каталог ГК «Урал - Пресс», индекс издания – 36939.

Авторы, являющиеся членами редакционной коллегии и (или) подписчиками журнала, имеют преимущественное право на опубликование своих статей.

Научные статьи в полном объеме также размещаются на официальном сайте журнала Известия КГАСУ <http://izvestija.kgasu.ru>. Электронное периодическое издание (ЭПИ) <http://izvestija.kgasu.ru> (Свидетельство о регистрации средства массовой информации Эл № ФС 77-31046 от 25.01.2008г.).

СТАТЬИ ПУБЛИКУЮТСЯ БЕСПЛАТНО.

Все материалы направлять по адресу:
420043, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1, комн. 79
Отдел Информационно-аналитического сопровождения НИР
Телефон (843) 510-46-39
Email: patent@kgasu.ru.

Известия КГАСУ
2023г., № 3(65)

Гл. редактор: Низамов Р. К.
Учредитель и издатель:
ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет»

Макет и редактирование: Чухлова М.Б.

Адрес редакции: 420043, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1, комн. 79
Тел. для справок: (843) 510-46-39
Адрес издателя: 420043, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1, комн. 79

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций.

Электронное периодическое издание: <http://izvestija.kgasu.ru>
Регистр. Эл. № ФС 77-31046 от 25.01.2008г.

Подписной каталог ГК Урал-Пресс
Индекс издания – 36939

Распространение: свободная цена

Подп. к печати 29.09.2023	Формат 60×84/8
Заказ №115	Бумага тип. №1
Усл.-печ. л 33,7	Уч.-изд. л. 34,6
Тираж 500 экз.	
I завод – 100	

Дата выхода в свет: 29.09.2023г.

Отпечатано в Издательстве КГАСУ: 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1