

Главный редактор:

Колчунов В.И., акад. РААСН, д-р техн. наук, проф. (Россия)

Заместители главного редактора:

Гордон В.А., советник РААСН, д-р техн. наук, проф. (Россия)

Коробко В.И., д-р техн. наук, проф. (Россия)

Савин С.Ю., канд. техн. наук, доц. (Россия)

Финадеева Е.А., канд. техн. наук, доц. (Россия)

Редакция:

Акимов П.А., акад. РААСН, д-р техн. наук, проф. (Россия)

Бакаева Н.В., советник РААСН, д-р техн. наук, проф. (Россия)

Бок Т., д-р техн. наук, проф. (Германия)

Булгаков А.Г., д-р техн. наук, проф. (Германия)

Данилевич Д.В., канд. техн. наук, доц. (Россия)

Ерофеев В.Т., акад. РААСН, д-р техн. наук, проф. (Россия)

Есаулов Г.В., акад. РААСН, д-р арх., проф. (Россия)
Карпенко Н.И., акад. РААСН, д-р техн. наук, проф. (Россия)

Колесникова Т.Н., д-р арх., проф. (Россия)

Колчунов В.И., д-р техн. наук, проф. (Россия)

Коробко А.В., д-р техн. наук, проф. (Россия)

Король Е.А., чл.-корр. РААСН, д-р техн. наук, проф. (Россия)

Кривошапко С.Н., д-р техн. наук, проф. (Россия)

Кудряшов Н.Н., канд. арх., проф. (Россия)

Лефай З., д-р техн. наук, проф. (Франция)

Мелькумов В.Н., д-р техн. наук, проф. (Россия)

Орлович Р.Б., д-р техн. наук, проф. (Польша)

Птичкина Г.А., д-р арх., проф. (Россия)

Ребош Д., д-р техн. наук, проф. (Словения)

Рышшин В.И., чл.-корр. РААСН, д-р техн. наук, проф. (Россия)

Тамразян А.Г., д-р техн. наук, проф. (Россия)

Травуш В.И., акад. РААСН, д-р техн. наук, проф. (Россия)

Трещев А.А., д-р техн. наук, проф. (Россия)

Тур В.В., д-р техн. наук, проф. (Белоруссия)

Турков А.В., д-р техн. наук, проф. (Россия)

Федоров В.С., акад. РААСН, д-р техн. наук, проф. (Россия)

Федорова Н.В., советник РААСН, д-р техн. наук, проф. (Россия)

Шах Р., д-р техн. наук, проф. (Германия)

Яковенко И.А., д-р техн. наук, проф. (Украина)

Исполнительный редактор:

Юрова О.В., (Россия)

Адрес редакции:

302030, Орловская обл., г. Орёл,

ул. Московская, д. 77.

Тел.: +79065704999

<http://oreluniver.ru/science/journal/sir>

E-mail: str_and_rek@mail.ru

Зарегистрировано в Федеральной службе
по надзору в сфере связи, информационных
технологий и массовых коммуникаций.

Свидетельство: ПИ №ФС 77-67169
от 16 сентября 2016 г.

Подписной индекс **86294**

по объединённому каталогу «Пресса России»
на сайтах www.ppressa-ru и www.akc.ru

© ОГУ имени И.С. Тургенева, 2024

Содержание

Теория инженерных сооружений. Строительные конструкции

Джамуев Б.К. Влияния несъемных пустотообразователей на прочность заземленных по контуру монолитных железобетонных плит перекрытия.....	3
Колчунов В.И., Крылов С.Б., Федоров С.С. Жесткость железобетонных конструкций при изгибе с учетом поперечной и продольной сил (часть 2).....	16
Надольский В.В. Несовершенства для расчета стальных конструкций методом конечных элементов. Часть 1.....	28
Симаков О.А., Нецадимов В.А. Проектирование усиления каменной кладки односторонними аппликациями из торкрет-бетона.....	39
Трошин М.Ю., Турков А.В., Заев А.В. Влияние шага досок в поперечном слое на деформативность и распределение напряжений в трехслойной CLT-панели, жестко заземленной с двух сторон.....	50

Безопасность зданий и сооружений

Колчунов В.И., Савин С.Ю., Амелина М.А. Устойчивость железобетонной колонны, подверженной сжатию с кручением в результате особого воздействия.....	59
Соловьев А.А., Соловьев С.А. Вероятностный анализ надежности стержней стальных ферм при неполной статистической информации.....	74

Архитектура и градостроительство

Михайлова Е.В. Архитектурно-художественные решения общественно-торговых комплексов при реконструкции советских кинотеатров.....	83
--	----

Строительные материалы и технологии

Алексеев В.А., Баженова С.И., Монахина А.А. Прогнозирование характеристик грунтобетонных массивов, создаваемых инъектированием особотонкодисперсных вяжущих (микроцементов) по манжетной технологии.....	95
Черкасов В.Д., Щербак Ю.П., Черкасов Д.В. Эластичные самоклеящиеся радиопоглощающие материалы.....	110
Шестаков Н.И., Алешин Н.Д., Макаров А.Д. Ресурсный потенциал пыли уноса асфальтобетонных заводов.....	117

Журнал входит в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук» ВАК по группе научных специальностей 2.1. – Строительство и архитектура: 2.1.1. – Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки); 2.1.2. – Основания и фундаменты, подземные сооружения (технические науки); 2.1.5. – Строительные материалы и изделия (технические науки); 2.1.7. – Технология и организация строительства (технические науки); 2.1.9. – Строительная механика (технические науки); 2.1.10. – Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства (технические науки); 2.1.11. – Теория и история архитектуры, реставрация и реконструкция историко-архитектурного наследия (архитектура); 2.1.12. – Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности (архитектура); 2.1.13. – Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов (архитектура).
Индексируется в РИНЦ, RSCI (Russian Science Citation Index) на платформе Web of Science)

Editor-in-Chief

Kolchunov V.I., doc. sc. tech., prof. (Russia)

Editor-in-Chief Assistants:

Gordon V.A., doc. sc. tech., prof. (Russia)

Korobko V.I., doc. sc. tech., prof. (Russia)

Savin S.Yu., candidate sc. tech., docent (Russia)

Finadeeva E.A., candidate sc. tech., docent (Russia)

Editorial Board

Akimov P.A., doc. sc. tech., prof. (Russia)

Bakaeva N.V., doc. sc. tech., prof. (Russia)

Bock T., doc. sc. tech., prof. (Germany)

Bulgakov A.G., doc. sc. tech., prof. (Germany)

Danilevich D.V., candidate sc. tech., docent. (Russia)

Erofeev V.T., doc. sc. tech., prof. (Russia)

Esaulov G.V., doc. arc., prof. (Russia)

Karpenko N.I., doc. sc. tech., prof. (Russia)

Kolesnikova T.N., doc. arc., prof. (Russia)

Kolchunov V.I., doc. sc. tech., prof. (Russia)

Korobko A.V., doc. sc. tech., prof. (Russia)

Korol E.A., doc. sc. tech., prof. (Russia)

Krivoshapko S.N., doc. sc. tech., prof. (Russia)

Kudryashov N.N., candidate arc., prof. (Russia)

Lafhaj Z., doc. sc. tech., prof. (France)

Melkumov V.N., doc. sc. tech., prof. (Russia)

Orlovic R.B., doc. sc. tech., prof. (Poland)

Ptichnikova G.A., doc. arc., prof. (Russia)

Rebolj D., doc. sc. tech., prof. (Slovenia)

Rimshin V.I., doc. sc. tech., prof. (Russia)

Tamrazyan A.G., doc. sc. tech., prof. (Russia)

Travush V.I., doc. sc. tech., prof. (Russia)

Treschev A.A., doc. sc. tech., prof. (Russia)

Tur V.V., doc. sc. tech., prof. (Belorussia)

Turkov A.V., doc. sc. tech., prof. (Russia)

Fedorov V.S., doc. sc. tech., prof. (Russia)

Fedorova N.V., doc. sc. tech., prof. (Russia)

Schach R., doc. sc. tech., prof. (Germany)

Iakovenko I.A., doc. sc. tech., prof. (Ukraine)

Managing Editor:

Yurova O.V. (Russia)

The edition address:

302030, Oryol region., Oryol,

Moskovskaya Street, 77

+79065704999

<http://oreluniver.ru/science/journal/sir>

E-mail: str_and_rek@mail.ru

Journal is registered in Russian federal service for monitoring communications, information technology and mass communications

The certificate of registration:

ПН №ФЦ 77-67169 from 16.09.2016 r.

Index on the catalogue of the «Pressa Rossi»

86294 on the websites www.pressa-ru and

www.akc.ru

© Orel State University, 2024

Contents

Theory of engineering structures. Building units

- Dzhamuev B.K.** The effect of non-removable void generators on the strength of monolithic reinforced concrete floor slabs clamped along the contour 3
- Kolchunov V.I., Krylov S.B., Fedorov S.S.** Stiffness of reinforced concrete structures under bending considering shear and axial forces (part 2) 16
- Nadolski V.V.** Imperfections for the calculation of steel structures by the finite element method. Part 1 28
- Simakov O.A., Neshchadimov V.A.** Design of masonry strengthening with one-sided shotcrete applications 39
- Troshin M.Yu., Turkov A.V., Zaev A.V.** The effect of the pitch of the boards in the transverse layer on the deformability and stress distribution in a three-layer CLT panel rigidly clamped on both sides 50

Building and structure safety

- Kolchunov V.I., Savin S.Yu., Amelina M.A.** Stability of a reinforced concrete column under compression with torsion caused by accidental action 59
- Soloveva A.A., Solovev S.A.** Reliability analysis of steel truss bars with imprecise statistical data 74

Architecture and urban planning

- Mikhaylova E.V.** Architectural and artistic solutions of the OTC during the gentrification of soviet cinemas 83

Construction materials and technologies

- Alekseev A.V., Bazhenova S.I., Monakhina A.A.** Prediction of characteristics of soil-concrete massifs created by injection of extremely fine-dispersed binders (microcements) 95
- Cherkasov V.D., Shcherbak Y.P., Cherkasov D.V.** Elastic self-adhesive radioabsorbing materials 110
- Shestakov N.I., Aleshin N.D., Makarov A.D.** Resource potential of dust entrainment of asphalt-concrete plants 117

The journal Building and Reconstruction (Stroitel'stvo i rekonstruktsiya) have being included by Higher Attestation Commission in the List of peer-reviewed scientific journals, in which the main scientific results of dissertations for the degree of candidate and doctor of science should be published, for the group of scientific specialties 2.1. - Construction and architecture: 2.1.1. – Building constructions, buildings and structures (technical sciences); 2.1.2. – Soils and foundations, underground structures (technical sciences); 2.1.5. – Building products and construction materials (technical sciences); 2.1.7. – Construction technology and organization (technical sciences); 2.1.9. – Structural mechanics (technical sciences); 2.1.10. – Environmental safety in construction and urban economy (technical sciences); 2.1.11. – Theory and history of architecture, restoration and reconstruction of historical and architectural heritage (architecture); 2.1.12. – Architecture of buildings and structures. Creative concepts of architectural activity (architecture); 2.1.13. – Urban planning, planning of rural settlements (architecture). The journal is indexed in RSCI, RSCI on the Web of Science.

Б.К. ДЖАМУЕВ¹

¹ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
г. Москва, Россия

ВЛИЯНИЯ НЕСЪЕМНЫХ ПУСТОТООБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ПРОЧНОСТЬ ЗАЩЕМЛЕННЫХ ПО КОНТУРУ МОНОЛИТНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ ПЕРЕКРЫТИЯ

Аннотация. В статье представлены результаты численного исследования влияния несъемных пустотообразователей на прочность защемленных по контуру монолитных железобетонных плит перекрытия. Моделирование конструкций выполнено с использованием объемных конечно-элементных моделей в программном комплексе «ЛИРА-САПР». Исследования проведены для образцов 4 видов, различающихся между собой габаритами в плане и армированием. Дано подробное описание использованных зависимостей и законов деформирования материалов в ходе построения моделей. Сравнительному анализу подверглись величины сжимающих напряжений в бетоне и арматуре, а также растягивающих напряжения в арматуре, полученные в результате моделирования. На основе проведенного исследования установлено, что использование несъемных пустотообразователей в монолитной железобетонной плите не снижает ее прочность, при этом позволяет сократить расход бетона на $18,3 \div 23,1$ %.

Ключевые слова: железобетон, монолитная плита, плита с пустотообразователями, прочность, численное моделирование, конечно-элементная модель, программный комплекс «ЛИРА-САПР».

В.К. DZHAMUEV¹

¹National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

THE EFFECT OF NON-REMOVABLE VOID GENERATORS ON THE STRENGTH OF MONOLITHIC REINFORCED CONCRETE FLOOR SLABS CLAMPED ALONG THE CONTOUR

Abstract. The article presents the results of a numerical experiment to determine the effect of non-removable void generators on the strength of monolithic reinforced concrete floor slabs clamped along the contour. The experimental samples are made in the form of spatial models using volumetric finite element models in the LIRA-CAD software package. The tests were carried out on 4 series of samples, differing in terms of dimensions and reinforcement. Detailed descriptions of the dependencies used and the laws of deformation of materials during the construction of models are given. The values of compressive stresses in concrete and reinforcement, as well as tensile stresses in reinforcement obtained as a result of tests, were subjected to comparative analysis. Based on the conducted experiment, it was found that the use of non-removable voids in a monolithic reinforced concrete slab does not reduce its strength, while reducing concrete consumption by 18.3-23.1%.

Keywords: reinforced concrete, monolithic slab, slab with voids, strength, numerical modeling, numerical experiment, non-removable voids, finite element model, software package «LIRA-CAD».

© Джамуев Б.К., 2024

Введение

В соответствии с Распоряжением Правительства РФ от 31 октября 2022 г. №3268-р «Об утверждении Стратегии развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства РФ на период до 2030 г. с прогнозом до 2035 г.» объемы строительства с применением железобетона в нашей стране из года в год увеличиваются. Значительную долю в этих объемах занимает монолитное домостроение: как при новом строительстве, так и в процессе реконструкции ветхих и аварийных зданий. И это неудивительно, ведь железобетон как комплексный материал обладает множеством преимуществ. Однако, есть у него существенный недостаток – большой собственный вес. Этот вопрос всегда стоял остро, т.к. снижение веса здания — это экономия материалов (в том числе невозобновляемых), уменьшение стоимости строительно-монтажных работ, оптимизация размеров вертикальных несущих элементов, возможность отказа от дополнительных работ в виде усиления слабых оснований и т.п., что в конечном счете снижает стоимость объекта строительства. Как известно, значительную долю от общего объема расходуемого бетона на здание, занимают перекрытия. Таким образом, снижение веса перекрытия при инвариантности качественных его показателей (прочность, деформативность, надежность, долговечность), является одним из актуальных вопросов.

Классическим способом уменьшения расхода бетона для возведения здания и, как следствие снижения его общего веса, является применение сборных железобетонных многопустотных плит перекрытий. Исследованием данного вопроса начали заниматься достаточно давно, а результатом научных исследований в нашей стране явился государственный стандарт, принятый в 1991 году – ГОСТ 9561-91 [1], позволяющий при возведении зданий и сооружений использование железобетонных плит с продольными пустотами.

а)



б)

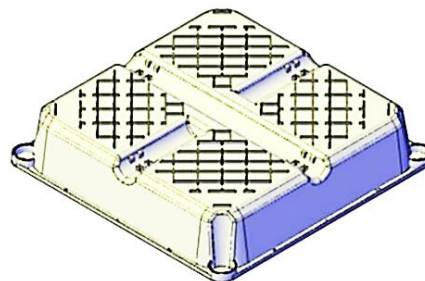


Рисунок 1 – Схема расположения пустотообразователей в железобетонной плите (а) и общий вид пустотообразователя (б)

В монолитном домостроении также велись исследования на данную тематику. Если говорить о конструкциях монолитного перекрытия, то собственный вес можно снизить различными способами: использование вкладышей из легкого бетона (минваты, пенополистирола и т.п.), применение кессонного перекрытия, а также используя несъемные пустотообразователи. Последний способ является наиболее молодым, в 1992 году его изобрел датский инженер-строитель Йорген Бреннинг. Как видно, извлекаемые и неизвлекаемые пустотообразователи начали использовать в монолитных перекрытиях достаточно недавно, но в последнее десятилетие этот способ получил наибольшее распространение, т.к. соответствует глобальному тренду по уменьшению выбросов CO₂ в атмосферу. С начала 2000-х гг. запатентовано несколько моделей и способов применения пустотообразователей: емкость для жидкости из резины или полиэтиленового пакета с водой [2], трубки из бумаги или пластика [3], полиэтилентерефталовые бутылки [4], емкость в виде пластмассового полого или герметичного тела вращения [5] емкость прямоугольной формы

из пластмассы или влагостойкого картона [6], картонно-полиэтиленовые трубы [7]. На данный момент в мире существуют множество технологий, основанные на применении неизвлекаемых пустотообразователей, наиболее распространение из которых в нашей стране получили U-Boot, Cobiax, Bubble Deck, Simkar и Сибформа (см. рисунок 1). По использованию в монолитных железобетонных плитах пустотообразователей Simkar и Сибформа разработаны стандарты организации [8, 9].

Анализ зарубежных [10-17] и отечественных [18-20] исследований о влиянии несъемных пластиковых пустотообразователей на прочность железобетонных плит указывает на то, что пустотообразователи не оказывают существенного влияния на прочность, но позволяют значительно экономить материалы. При этом, в различных исследованиях, авторами говорится о снижении максимальных напряжений в бетоне на 1-40% при использовании в плите пустотообразователей, а в исследовании [16] утверждается, что несущая способность плиты с пустотообразователями приближается к полнотелой плите с увеличением пролета.

Таким образом, учитывая, что в ранее проведенных исследованиях различными авторами приводятся данные с достаточно значительным разбросом прочности однотипных плит с пустотообразователями и без них (полнотелые), а также принимая во внимание противоречивые выводы в отдельных исследованиях, была составлена программа испытаний с целью оценки влияния несъемных пустотообразователей на прочность монолитных железобетонных плит перекрытия.

Модели и методы

Объектом исследования является монолитная железобетонная плита с несъемными пустотообразователями, квадратной в плане формы (соотношение сторон 1:1), защемленная по периметру плиты, на которую воздействует равномерно-распределенной нагрузка.

Т.к. целью исследования является оценка влияния несъемных пустотообразователей на ее прочность железобетонной плиты, то для более объективного анализа было подготовлено 4 серии образцов (моделей) различающиеся между собой габаритами в плане и армированием (см. таблица 1), что также позволило оценить влияние длины плиты на ее прочность и провести проверку правомочности вышеизложенных утверждений в [16].

Экспериментальные образцы – виртуальные, выполнены по канонам численного моделирования из конечных элементов. В качестве программного комплекса для создания конечно-элементных моделей эталонных плит и плит с пустотообразователями был использован вычислительный комплекс «ЛИРА-САПР», как наиболее популярный среди российских инженеров. Он обладает достаточными функциональными возможностями для численного исследования прочности и деформативности конструкций методом конечных элементов.

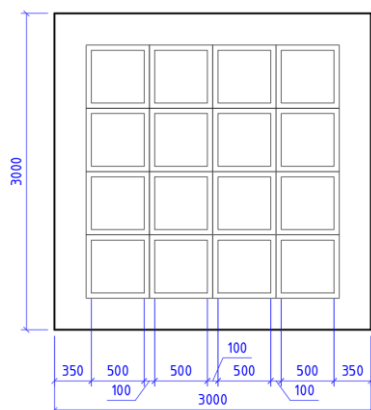
Каждая серия состояла из двух образцов: эталонный-полнотелый (условное обозначение «Et») и пустотелый (условное обозначение «Ps»).

Прообразом эталонной модели является монолитная железобетонная плита перекрытия толщиной 200 мм, выполненная из бетона класса по прочности на сжатие B25, заармированная плоскими сетками из арматурных стержней A500, уложенные равномерно с шагом 200 мм по нижней и верхней граням плиты. Расстояние от грани сечения до равнодействующего усилия в растянутой (сжатой) арматуре составляет 30 мм. При этом диаметр арматуры в каждой серии различен и подобран в результате предварительного ручного расчета.

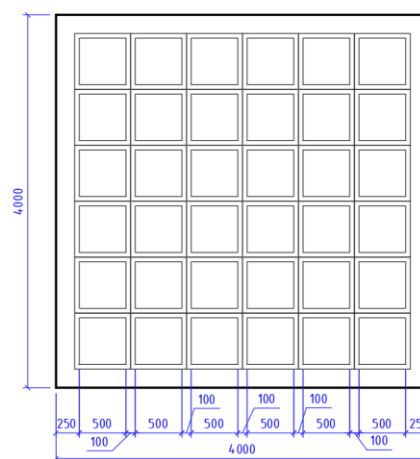
Таблица 1 – Характеристики образцов

Условное обозначение образца	Размер плиты в плане (мм)	Объем бетона (м³)	Армирование (м)	Снижение объема бетона относит. этал. образца, (%)
Серия «А»				
A-Et	3000 x 3000	1,80	Ø8A500 с шагом 200мм	18,3
A-Ps		1,47		
Серия «В»				
B-Et	4000 x 4000	3,20	Ø10A500 с шагом 200мм	23,1
B-Ps		2,46		
Серия «С»				
C-Et	5000 x 5000	5,00	Ø12A500 с шагом 200мм	20,0
C-Ps		4,00		
Серия «D»				
D-Et	6000 x 6000	7,20	Ø14A500 с шагом 200мм	22,9
D-Ps		5,55		

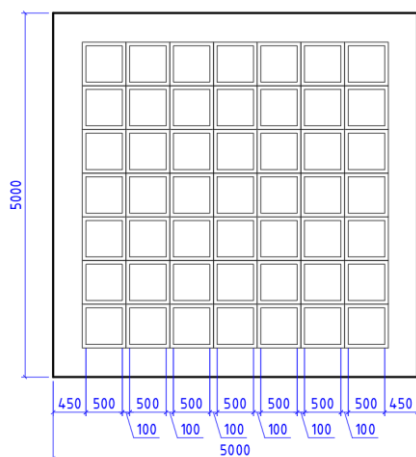
а)



б)



в)



г)

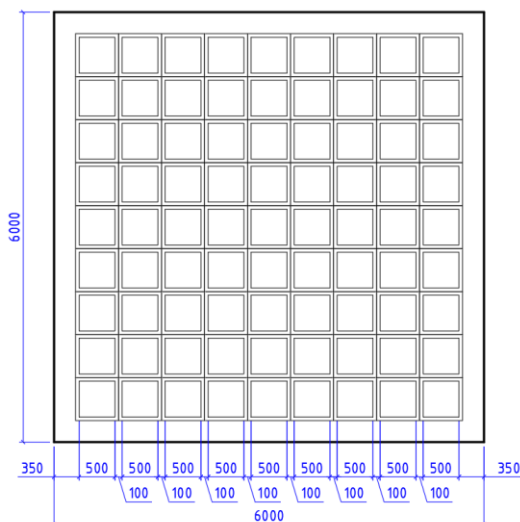
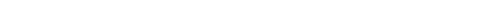
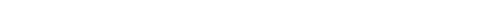


Рисунок 2 – Схема расположения пустотообразователей в образцах серий А, В, С, D

- толщина плиты не должна быть меньше 200 мм для пустотообразователя высотой 100 мм;

- расстояние от контурных балок до зоны с пустотообразователями должна быть не менее $1.5 \times h_0$;

a)  b) 

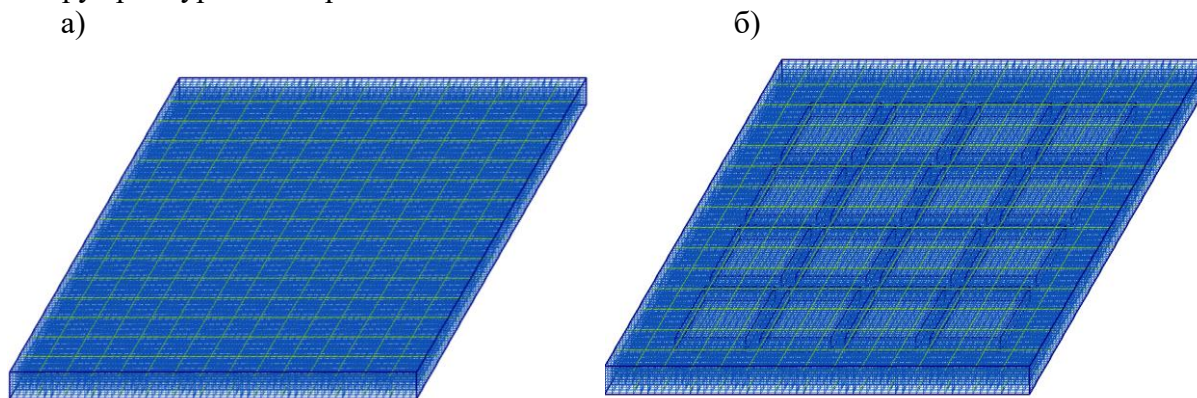


Рисунок 3 – Конечно-элементная модель плиты перекрытия: полнотелая (а) и с пустотообразователями (б)

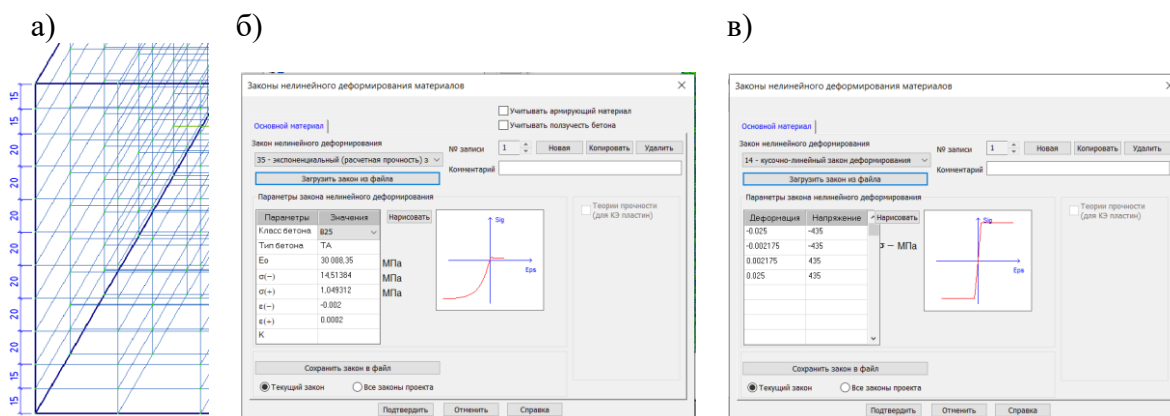


Рисунок 4 – Фрагмент конечно-элементной модели с указанием принятых размеров по высоте (а) и принятые законы нелинейного деформирования для бетона (а) и арматуры (б)

Бетонные составляющие смоделированы с помощью физически нелинейного универсального пространственного восьмиузлового изопараметрического элемента типа КЭ236. Для описания закона деформирования бетона в моделях использовалась экспоненциальная зависимость (№35), т.к. учитывает сцепление основного материала с армирующим. Диаграмма « σ - ϵ » строится программным комплексом автоматически в зависимости от класса и типа бетона (см. рисунок 4б). Армирование плиты моделировалось физически нелинейными универсальными пространственными стержневыми конечными элементами суперэлементного построения типа КЭ210. Для описания закона деформирования арматуры (см. рисунок 4в) была использована кусочно-линейная зависимость (№14). Ввиду отсутствия экспериментальных данных, исходные данные для построения экспоненциальной и кусочно-линейной зависимостей принимались по данным СП 63.13330.2018 [21]. В моделях, предусматривающие наличие пустотообразователей («Ps»), пустоты моделировались путем удаления конечных объемных элементов на заданных участках.

Таким образом, в программном комплексе численные модели геометрически и физически полностью идентичны своим прообразам. Для обеспечения жесткой заделки в моделях, по контуру, были наложены связи, запрещающие перемещения и повороты во всех плоскостях. В расчетах учитывался собственный вес плиты и нагрузка, равномерно распределенная по верхней грани. Расчет производился шаговым методом, т.е. программа организует пошаговое нагружение конструкции и обеспечивает решение линеаризованной системы уравнений на каждом шаге для текущего приращения вектора узловых нагрузок, сформированного для конкретного нагружения.

Величина максимальной расчетной равномерно распределенной нагрузки, при которой произойдет исчерпание несущей способности в нормальном сечении была предварительно определена согласно требованиям п.8.1.8 СП 63.13330.2018 [21], приравнивая изгибающий момент от внешней нагрузки (M) к изгибающему моменту, который может быть воспринят наиболее опасным нормальным сечением (M_{ult}):

$$M \leq M_{ult} \quad (1)$$

Исходя из расчетной схемы плиты с жестким сопряжением по периметру, максимальное значение изгибающий момент достигнет в опорной зоне, а его величина согласно справочным данным [22] составит:

$$M = \frac{51 \cdot q \cdot l^2}{1000} \quad (2)$$

где, l – расчетный пролет плиты (м);

q – равномерно-распределенная нагрузка (кПа), представляющая собой сумму равномерно-распределенной нагрузки от собственного веса ($q_{св}$) и внешнего воздействия ($q_{вн}$):

$$q = q_{св} + q_{вн} \quad (3)$$

$$q_{св} = k \cdot \delta \cdot \gamma \quad (4)$$

где, k – коэффициент надежности по нагрузке, принимаемый согласно СП 20.13330.2020 [23] равным 1,1 для железобетонного изделия;

δ – толщина плиты (м);

γ – объемный вес железобетона (25 кН/м³).

Таким образом, значение максимальной расчетной равномерно распределенной нагрузки определяется по формуле:

$$q_{вн} = \frac{1000 \cdot M_{ult}}{51 \cdot l^2} - q_{св} \quad (5)$$

Таблица 2 – Результаты аналитического расчета эталонных образцов

Условное обозначение модели	h_0 (мм)	R_s (МПа)	R_b (МПа)	A_s (мм ²)	l (мм)	x (мм)	M_{ult} (кН•м)	$q_{вн}$ (кПа)
A-Et	170	435	14.5	252	3000	7,56	18,22	34,2
B-Et				393	4000	11,79	28,05	28,9
C-Et				566	5000	16,98	39,77	25,7
D-Et				770	6000	23,10	53,07	23,4

Величина изгибающего момента, который может быть воспринят наиболее опасным нормальным сечением определяется с учетом имеющегося в сечении симметричного армирования, т.е. по п.8.1.13 [21]:

$$M_{ult} = R_s \cdot A_s \cdot (h_0 - a') \quad (6)$$

Т.к. высота сжатой зоны $x < a'$, уравнение примет следующий вид:

$$M_{ult} = R_s \cdot A_s \cdot (h_0 - 0.5x) \quad (7)$$

Высота сжатой зоны определяется по формуле п.8.1.9 [21] без учета сжатой арматуры:

$$x = \frac{R_s \cdot A_s}{R_b \cdot b} \quad (8)$$

Исходные данные и результаты аналитического расчета эталонных образцов каждой серии представлены в таблице 2.

Результаты исследования и их анализ

В процессе эксперимента контролировались величины сжимающих и растягивающих напряжений в бетоне и арматуре при заданном уровне нагружения. Результаты проведенного численного эксперимента приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты численного эксперимента

№ этапа нагружения	Нагрузка q (кПа)	Сжимающее напряжение в бетоне σ_{b-} (МПа)	Растягивающее напряжение в бетоне σ_{b+} (МПа)	Сжимающее напряжение в арматуре σ_{s-} (МПа)	Растягивающее напряжение в арматуре σ_{s+} (МПа)
A-Et					
1	3,42	0,24	0,24	0,99	0,99
2	6,84	0,485	0,448	2,01	2,11
3	10,26	0,737	0,624	3,06	3,38
4	13,68	0,997	0,768	4,17	4,85
5	17,1	1,27	0,88	5,31	6,58
6	20,52	1,54	0,96	6,50	8,61
7	23,94	1,83	1,01	7,75	11,01
8	27,36	2,14	1,04	9,05	13,92
9	30,78	2,45	1,05	10,42	17,36
10	34,2	2,78	1,05	11,85	21,47
A-Ps					
1	3,42	0,236	0,236	0,97	0,96
2	6,84	0,478	0,441	1,97	2,05
3	10,26	0,727	0,616	3,00	3,30
4	13,68	0,982	0,759	4,08	4,73
5	17,1	1,25	0,871	5,19	6,40
6	20,52	1,52	0,953	6,36	8,37
7	23,94	1,81	1,01	7,57	10,72
8	27,36	2,1	1,04	8,85	13,54
9	30,78	2,41	1,05	10,18	16,94
10	34,2	2,74	1,05	11,57	21,07

№ этапа загрузки	Нагрузка q (кПа)	Сжимающее напряжение в бетоне σ_{b-} (МПа)	Растягивающее напряжение в бетоне σ_{b+} (МПа)	Сжимающее напряжение в арматуре σ_{s-} (МПа)	Растягивающее напряжение в арматуре σ_{s+} (МПа)
B-Et					
1	2,89	0,369	0,369	1,57	1,57
2	5,78	0,754	0,659	3,22	3,48
3	8,67	1,16	0,868	4,97	5,86
4	11,56	1,59	0,994	6,84	8,92
5	14,45	2,05	1,05	8,84	12,87
6	17,34	2,54	1,05	11,01	18,22
7	20,23	3,07	1,05	13,38	24,59
8	23,12	3,63	1,05	15,80	31,85
9	26,01	4,21	1,05	18,34	39,75
10	28,9	4,8	1,05	21,02	47,90
B-Ps					
1	2,89	0,37	0,37	1,59	1,59
2	5,78	0,752	0,655	3,26	3,49
3	8,67	1,15	0,857	5,01	5,82
4	11,56	1,57	0,982	6,85	8,75
5	14,45	2,01	1,04	8,83	12,51
6	17,34	2,48	1,05	10,93	17,45
7	20,23	2,99	1,05	13,12	23,57
8	23,12	3,54	1,05	15,54	30,70
9	26,01	4,1	1,05	18,09	38,60
10	28,9	4,68	1,05	20,64	47,13
C-Et					
1	2,57	0,521	0,521	2,23	2,23
2	5,14	1,08	0,871	4,63	5,20
3	7,71	1,68	1,04	7,27	9,37
4	10,28	2,35	1,05	10,17	15,47
5	12,85	3,1	1,05	13,44	23,70
6	15,42	3,89	1,05	16,89	33,16
7	17,99	4,73	1,05	20,60	43,06
8	20,56	5,58	1,05	24,49	52,79
9	23,13	6,44	1,05	28,56	62,42
10	25,7	7,29	1,05	32,89	72,33
C-Ps					
1	2,57	0,491	0,491	2,10	2,10
2	5,14	1,01	0,836	4,36	4,87
3	7,71	1,58	1,02	6,83	8,74
4	10,28	2,21	1,05	9,55	14,41
5	12,85	2,91	1,05	12,56	22,28
6	15,42	3,67	1,05	15,83	31,83
7	17,99	4,48	1,05	19,27	42,00
8	20,56	5,32	1,05	22,81	52,17
9	23,13	6,18	1,05	26,53	62,42
10	25,7	7,03	1,05	30,50	73,03
D-Et					
1	2,34	0,688	0,688	2,97	4,04
2	4,68	1,44	1,04	6,27	10,08
3	7,02	2,3	1,05	10,07	19,81
4	9,36	3,29	1,05	14,29	33,60
5	11,7	4,36	1,05	19,04	48,54
6	14,04	5,49	1,05	24,04	64,01

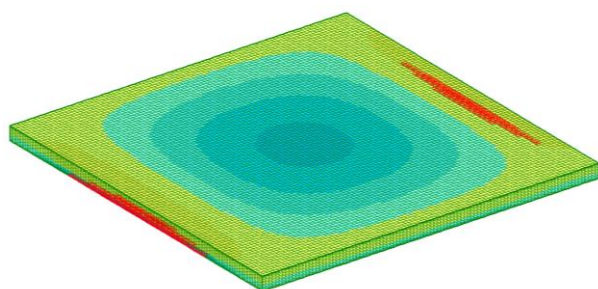
№ этапа загрузки	Нагрузка q (кПа)	Сжимающее напряжение в бетоне σ_{b-} (МПа)	Растягивающее напряжение в бетоне σ_{b+} (МПа)	Сжимающее напряжение в арматуре σ_{s-} (МПа)	Растягивающее напряжение в арматуре σ_{s+} (МПа)
7	16,38	6,62	1,05	29,37	80,37
8	18,72	7,74	1,05	35,15	96,37
9	21,06	8,8	1,05	41,52	113,17
10	23,4	9,77	1,05	48,54	129,09
D-Ps					
1	2,34	0,646	0,646	2,79	3,79
2	4,68	1,35	1	5,85	9,28
3	7,02	2,13	1,05	9,29	17,86
4	9,36	3,03	1,05	13,19	30,68
5	11,7	4,04	1,05	17,54	45,27
6	14,04	5,11	1,05	22,09	61,10
7	16,38	6,21	1,05	26,90	78,34
8	18,72	7,33	1,05	32,03	95,49
9	21,06	8,39	1,05	37,82	113,17
10	23,4	9,38	1,05	43,86	131,74

Анализ результатов проведенного исследования на основе компьютерного моделирования позволяет отметить следующее:

1. Сжимающие и растягивающие напряжения как в бетоне конструкции, так и в арматуре, не превысили предельно допустимых значений для заданных классов: В25 и А500. При этом, в каждой серии на образцы действовала равномерно-распределенная нагрузка, соответствующая предельно допустимой, определенная аналитическим путем (таблица 2). Имеющийся при этом запас по несущей способности указывает на перераспределения напряжений, который не учитывается в ручных расчетах.

2. Как видно из рисунков 5 и 6 пиковые сжимающие напряжения при достижении максимального нагружения возникли в нижней части опорной зоны плиты, а растягивающие – в верхней, что соответствует общепринятым представлениям о характере работы плитных конструкций под нагрузкой.

а)



б)

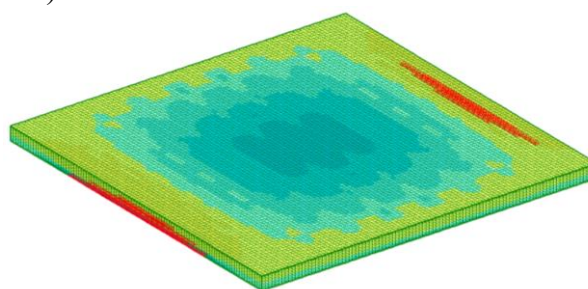


Рисунок 5 – Участки с пиковыми сжимающими напряжениями в бетоне плиты (выделены красным цветом): полнотелая (а) и с пустообразователями (б)

3. Как видно из таблицы 3, при достижении в отдельных конечных (объемных) элементах, моделирующих бетон, предельных растягивающих напряжений, равных 1,05 МПа, при последующем увеличении нагрузки данный показатель не увеличивался. Данный факт свидетельствует, что программным комплексом моделируется выключение из работы элемента при достижении в нем предельно допустимого напряжения, что соответствует действительному характеру разрушения материала под нагрузкой: фактически на этих участках появляются трещины.

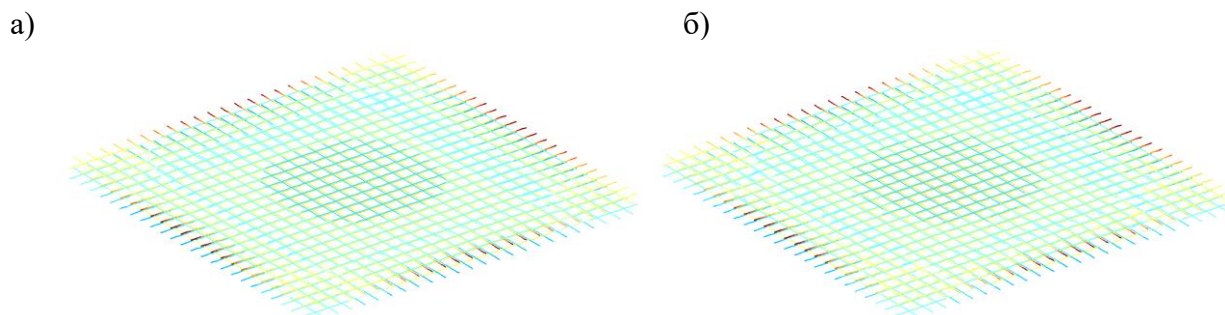


Рисунок 6 – Участки с пиковыми сжимающими (синие участки) и растягивающими (красные участки) напряжениями в арматуре плиты: полнотелая (а) и с пустотообразователями (б)

4. Сравнительный анализ возникающих напряжений в бетоне и арматуре полнотелых плит и плит с пустотообразователями (см. таблицу 4) при максимально уровне нагружения показывает следующее:

- сжимающие напряжения в бетоне плит с пустотообразователями ниже на $1,4 \div 4,0$ %, чем в эталонных плитах (полнотелых), и чем выше длина плиты, тем эта разница выше;
- сжимающие напряжения в арматуре плит с пустотообразователями ниже на $2,4 \div 9,6$ %, чем в эталонных плитах (полнотелых), и чем выше длина плиты, тем эта разница выше;
- для плит длиной 3,0 и 4,0 м растягивающие напряжения в арматуре плит с пустотообразователями ниже на $1,6 \div 1,9$ %, чем в эталонных плитах (полнотелых);
- для плит длиной 5,0 и 6,0 м растягивающие напряжения в арматуре плит с пустотообразователями выше на $1,0 \div 2,1$ %, чем в эталонных плитах (полнотелых).

Таблица 4 – Сравнительный анализ результатов эксперимента при максимальном уровне нагружения

Условное обозначение модели	Напряжение (сжатие) в бетоне σ_{b-} (МПа)	Разница относительно эталонного образца (%)	Напряжение (сжатие) в арматуре σ_{s-} (МПа)	Разница относительно эталонного образца (%)	Напряжение (растяжение) в арматуре σ_{s+} (МПа)	Разница относительно эталонного образца (%)
Серия «А» при нагрузке $q = 34,2$ кПа						
A-Et	2,78	-	11,85	-	21,47	-
A-Ps	2,74	-1,4	11,57	-2,4	21,07	-1,9
Серия «В» при нагрузке $q = 28,9$ кПа						
B-Et	4,8	-	21,02	-	47,90	-
B-Ps	4,68	-2,5	20,64	-1,8	47,13	-1,6
Серия «С» при нагрузке $q = 25,7$ кПа						
C-Et	7,29	-	32,89	-	72,33	-
C-Ps	7,03	-3,6	30,50	-7,3	73,03	+1,0
Серия «Д» при нагрузке $q = 23,4$ кПа						
D-Et	9,77	-	48,54	-	129,09	-
D-Ps	9,38	-4,0	43,86	-9,6	131,74	+2,1

5. Учитывая, что плитные конструкции, в основном проектируются под заданное значение нагрузки, которое чаще на практике меньше, чем в данном эксперименте, то сравнительному анализу подверглись напряжений в бетоне и арматуре полнотелых плит и плит с пустотообразователями (см. таблицу 5) при усредненной нагрузке на плиту перекрытия. Например, в торговых (выставочных) помещениях, эта нагрузка приблизительно равна 16-18 кПа (с учетом собственного веса перекрытия и конструкций пола). При

указанной нагрузке (для каждой серии образцов выбрано свое значение, соответствующее определенному шагу нагружения в эксперименте) получаем следующее:

- сжимающие напряжения в бетоне плит с пустотообразователями ниже на $1,6 \div 6,2$ %, чем в эталонных плитах (полнотелых), и чем выше длина плиты, тем эта разница выше;
- сжимающие напряжения в арматуре плит с пустотообразователями ниже на $2,3 \div 8,4$ %, чем в эталонных плитах (полнотелых), и чем выше длина плиты, тем эта разница выше;
- растягивающие напряжения в арматуре плит с пустотообразователями ниже на $2,5 \div 4,2$ %, чем в эталонных плитах (полнотелых).

Таблица 5 – Сравнительный анализ результатов эксперимента при промежуточном уровне нагружения

Условное обозначение модели	Напряжение (сжатие) в бетоне σ_{b-} (МПа)	Разница относительно эталонного образца (%)	Напряжение (сжатие) в арматуре σ_{s-} (МПа)	Разница относительно эталонного образца (%)	Напряжение (растяжение) в арматуре σ_{s+} (МПа)	Разница относительно эталонного образца (%)
Серия «А» при нагрузке $q = 17,1$ кПа						
A-Et	1,27	-	5,31	-	6,58	-
A-Ps	1,25	-1,6	5,19	-2,3	6,40	-2,7
Серия «В» при нагрузке $q = 17,34$ кПа						
B-Et	2,54	-	11,01	-	18,22	-
B-Ps	2,48	-2,4	10,93	-0,7	17,45	-4,2
Серия «С» при нагрузке $q = 17,99$ кПа						
C-Et	4,73	-	20,60	-	43,06	-
C-Ps	4,48	-5,3	19,27	-6,5	42,00	-2,5
Серия «D» при нагрузке $q = 16,38$ кПа						
D-Et	6,62	-	29,37	-	80,37	-
D-Ps	6,21	-6,2	26,90	-8,4	78,34	-2,5

Выводы

Проанализировав результаты исследования, можно сделать вывод, что использование несъемных пустотообразователей в монолитной железобетонной плите не снижает ее прочность, при этом позволяет сократить расход бетона на $18,3 \div 23,1$ %, что дает значительное преимущество по сравнению с традиционной полнотелой плитой в части экономической эффективности.

При максимально допустимой равномерно-распределенной нагрузке, в плите, за счет использования пустотообразователей, напряжения в сжатом бетоне снизились на $1,4 \div 4,0$ %, в сжатой арматуре на $2,4 \div 9,6$ %, в растянутой арматуре на $1,6 \div 1,9$ % (только для плит пролетом 3,0 и 4,0 м). При этом для плит пролетом 5,0 и 6,0 м, было отмечено незначительное повышение (на $1,0 \div 2,1$ %) напряжения в растянутой арматуре образцов, имеющих пустотообразователи. Эту особенность необходимо учитывать при проектировании монолитных железобетонных плит с несъемными пустотообразователями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ 9561-91 «Плиты перекрытий железобетонные многпустотные для зданий и сооружений технические условия».
- Прилуцкий О.Г. Способ изготовления монолитного строительного элемента // Патент России №RU2243889C2. 10.01.2005.
- ООО «К-РегионСтрой». Многпустотная железобетонная плита перекрытия // Патент №RU49853U1. 10.12.2005.
- Котенков И.А. Многпустотная железобетонная плита перекрытия // Патент Беларуси №BY7667U. 30.10.2011.
- УО «БГТУ». Пустотообразователь безбалочной плиты перекрытия // Патент Беларуси №BY8418U. 30.08.2012.

6. Мартынов А.А. Способ изготовления зданий и сооружений с трансформируемой в процессе эксплуатации планировкой // Патент России №RU2488667C2. 27.07.2013.
7. Пушкарев Б.А. Способ изготовления монолитных железобетонных балочных плит перекрытий с круглыми пустотами, с применением неизвлекаемых картонно-полиэтиленовых пустотообразователей // Патент России №RU2634156C2. 24.10.2017.
8. СТО 38311046-001-2019 «Монолитные железобетонные облегченные плиты с пустотообразователями Simkar. Правила проектирования и возведения».
9. СТО 35546020.001-2016 «Несъемная опалубка (пустотообразователи и соединительные муфты) Сибформа®. Общие сведения о технологии, номенклатура изделий. Рекомендации по расчету и конструированию монолитных безбалочных плит перекрытий с несъемной опалубкой Сибформа® в соответствии с СП 63.13330.2012».
10. Tiwari N. and Zafar S. Structural Behavior of Bubble Deck Slabs and Its Application: Main Paper. *IJSRD International Journal for Scientific Research & Development*. 2016. Vol. 4. Issue 02. Pp: 433-437. ISSN (online): 2321-0613.
11. Ibrahim A. M., Ali N. K., and Salman W. D. Flexural Capacities of Reinforced Concrete Two-Way Bubbledeck Slabs of Plastic Spherical Voids. *J. Print. Iraq*. 2013. Vol. 06. No. 02. Pp: 9-20.
12. Valivonis J., Skuturna T., Daugevicius M. and Šneideris A. Punching shear strength of reinforced concrete slabs with plastic void formers. *Constr. Build. Mater.* 2017. Vol.145. Pp: 518-527.
13. Saifulla M., Azeem M. A. Comparative Seismic Performance of a Conventional Slab and Flat Slab over a Bubble Deck Slab. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. November 2017. Vol. 7. Issue 11.. Pp: 137-143.
14. Teja P. P., Kumar P. V, Mounika C. R., and Saha P. Structural Behavior of Bubble Deck Slab. January 2012. Pp: 383-388.
15. Lakshmikanth L., Poluraju P. Performance of Structural Behaviour of Bubble Deck Slab. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*. April 2019. Vol.7. Issue 6C2. ISSN: 2277-3878.
16. Varghese J. P, M. George. Parametric Investigation on the Seismic Response of Voided and Solid Flat Slab Systems. *IJSET - International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*. March 2018. Vol. 5. Issue 3. Pp: 256-258.
17. Mahalakshmi S., S. Nanthini S., and Saha A. P. Experimental Studies on Comparison of Conventional Slab and Bubble Deck Slab Based on Strength. 2017. Vol. 5. Pp: 580-588.
18. Орлова М.Д., Мнушкин М.А., Евтушенко И.С., Виноградова К.И., Егармин К.А. Анализ применения пустотообразователей из рециклированного полипропилена при создании облегченных монолитных перекрытий. Исследование различных направлений современной науки: Сборник материалов XXI Международной научно-практической конференции. Ч.1. Москва. 2017. С.562-567.
19. Филимонова Е. С. Анализ напряженно-деформированного состояния монолитной плиты перекрытия с пустотообразователями по системе Cobiax на основании различных расчетных моделей // Молодой ученый. 2022. № 20 (415). С. 107-109.
20. Малахова А.Н. Пустотные кессонные плиты перекрытий монолитных многоэтажных зданий // Вестник МГСУ. 2016. № 6. С. 15-24.
21. СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003».
22. Справочник проектировщика промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений / под ред. А.А. Уманского. М.: Госстройиздат, 1960. 1041 с.
23. СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*».

REFERENCES

1. GOST 10180-2012 «Reinforced concrete multi-cavity floor slabs for buildings and structures technical conditions». (rus)
2. Prilutsky O.G. Sposob izgotovleniya monolitnogo stroitel'nogo elementa [Method of manufacturing a monolithic building element] // Russian Patent No.RU2243889C2. 10.01.2005. (rus)
3. ООО «K-RegionStroj». Mnogopustotnaya zhelezobetonnyaya plita perekrytiya [Multi-cavity reinforced concrete floor slab] // Patent No.RU49853U1. 12/10/2005. (rus)
4. Kotenkov I.A. Mnogopustotnaya zhelezobetonnyaya plita perekrytiya [Multi-hollow reinforced concrete floor slab] // Patent of Belarus No.BY7667U. 10/30/2011. (rus)
5. УО «BGTU». Pustotoobrazovatel' bezbalochnoj plity perekrytiya [Void-forming girderless floor slab] // Patent of Belarus No. BY8418U. 30.08.2012. (rus)
6. Martynov A.A. Sposob izgotovleniya zdaniy i sooruzhenij s transformiruemoj v processe ekspluatatsii planirovkoj [Method of manufacturing buildings and structures with a layout transformed during operation] // Patent of Russia No. RU2488667C2. 07/27/2013. (rus)
7. Pushkarev B.A. Sposob izgotovleniya monolitnyh zhelezobetonnyh balochnyh плит perekrytij s kruglymi pustotami, s primeneniem neizvlekaemyh kartonno-polietilenovyh pustotoobrazovatelej [Method of manufacturing

monolithic reinforced concrete floor slabs with round voids, using non-removable cardboard-polyethylene void formers] // Russian Patent No.RU2634156C2. 10/24/2017. (rus)

8. STO 38311046-001-2019 «Monolithic reinforced concrete lightweight slabs with Simkar void formers. Rules of design and construction». (rus)

9. STO 35546020.001-2016 «Fixed formwork (voids and couplings) Sibforma ®. General information about the technology, product range. Recommendations for the calculation and design of monolithic girderless floor slabs with non-removable formwork Sibform ® in accordance with SP 63.13330.2012». (rus)

10. Tiwari N. and Zafar S. Structural Behavior of Bubble Deck Slabs and Its Application: Main Paper. *IJSRD International Journal for Scientific Research & Development*. 2016. Vol. 4. Issue 02. Pp: 433-437. ISSN (online): 2321-0613.

11. Ibrahim A. M., Ali N. K., and Salman W. D. Flexural Capacities of Reinforced Concrete Two-Way Bubbledeck Slabs of Plastic Spherical Voids. *J. Print. Iraq*. 2013. Vol. 06. No. 02. Pp: 9-20.

12. Valivonis J., Skuturna T., Daugevicius M. and Šneideris A. Punching shear strength of reinforced concrete slabs with plastic void formers. *Constr. Build. Mater.* 2017. Vol.145. Pp: 518-527.

13. Saifulla M., Azeem M. A. Comparative Seismic Performance of a Conventional Slab and Flat Slab over a Bubble Deck Slab. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. November 2017. Vol. 7. Issue 11.. Pp: 137-143.

14. Teja P. P., Kumar P. V., Mounika C. R., and Saha P. Structural Behavior of Bubble Deck Slab. January 2012. Pp: 383-388.

15. Lakshmikanth L., Poluraju P. Performance of Structural Behaviour of Bubble Deck Slab. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*. April 2019. Vol.7. Issue 6C2. ISSN: 2277-3878.

16. Varghese J. P., M. George. Parametric Investigation on the Seismic Response of Voided and Solid Flat Slab Systems. *IJSET - International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*. March 2018. Vol. 5. Issue 3. Pp: 256-258.

17. Mahalakshmi S., S. Nanthini S., and Saha A. P. Experimental Studies on Comparison of Conventional Slab and Bubble Deck Slab Based on Strength. 2017. Vol. 5. Pp: 580-588.

18. Orlova M.D., Mnushkin M.A., Evtushenko I.S., Vinogradova K.I., Egarmin K.A. Analiz primeneniya pustotoobrazovatelej iz reciklirovannogo polipropilena pri sozdanii oblegchennyh monolitnyh perekrytij. Issledovanie razlichnyh napravlenij sovremennoj nauki: Sbornik materialov XXI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii. [Analysis of the use of hollow formers from recycled polypropylene in the creation of lightweight monolithic floors. Research of various directions of modern science: Collection of materials of the XXI International Scientific and practical Conference]. Part 1. Moscow. 2017. Pp.562-567. (rus)

19. Filimonova E. S. Analiz napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya monolitnoj plity perekrytiya s pustotoobrazovatelyami po sisteme Cobiax na osnovanii razlichnyh raschetnyh modelej [Analysis of the stress-strain state of a monolithic floor slab with void generators according to the Cobiax system based on various computational models] // *J. Young Scientist*. 2022. No. 20 (415). Pp. 107-109. (rus)

20. Malahova A.N. Pustotnye kessonnye plity perekrytij monolitnyh mnogoetazhnyh zdaniy [Hollow coffered floor slabs of monolithic multi-storey buildings] // *J. Vestnik MGSU*. 2016. No. 6. Pp. 15-24. (rus)

21. SP 63.13330.2018 «Concrete and reinforced concrete structures. The main provisions. Updated edition of SNiP 52-01-2003». (rus)

22. Handbook of the designer of industrial, residential and public buildings and structures / edited by A.A. Umansky. Moscow: Gosstroyizdat, 1960. 1041 p. (rus)

23. SP 20.13330.2016 «Loads and impacts. Updated version of SNiP 2.01.07-85». (rus)

Информация об авторах:

Джамуев Булат Калсынович

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия,

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций.

E-mail: dbk-07@mail.ru

Information about authors:

Dzhamuev Bulat K.

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,

candidate of technical science, associated professor, associated professor of the department of reinforced concrete and stone structures.

E-mail: dbk-07@mail.ru

ВЛ. И. КОЛЧУНОВ^{1,2}, С.Б. КРЫЛОВ³, С.С. ФЕДОРОВ¹¹ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия²Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, г. Москва, Россия³Научно-исследовательский центр "Строительство", (НИИЖБ) Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона им. А.А. Гвоздева

ЖЕСТКОСТЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ИЗГИБЕ С УЧЕТОМ ПОПЕРЕЧНОЙ И ПРОДОЛЬНОЙ СИЛ (ЧАСТЬ 2)

Аннотация. Приведены физическая и расчётная модель для определения параметров предельных состояний железобетонных конструкций при сложном напряжённом состоянии - изгибе с продольной и поперечными силами. На основе принятой схемы дискретизации поперечного сечения и теоремы А.Р. Ржаницына о двойственности между силовыми и деформационными параметрами построены прямой и обратный переход для определения коэффициентов матрицы жёсткости железобетонных стержневых конструкций с наклонными и нормальными трещинами. Определение жёсткости конструкций в зоне наклонных трещин выполнено на основе модели составных полосок, на которые разбивается зона с наклонными трещинами. При этом принята гипотеза о характере распределения деформаций в сложнапряжённом железобетонном элементе с наклонными трещинами. Для этой модели получен условный модуль сдвига, позволяющий определять средние относительные линейные и угловые деформации бетоны и арматуры в точке, прилегающей к шву сдвига между наклонными трещинами. На основе этой модели и с использованием экспериментально полученного значения относительного сдвига в наклонной трещине определены нагельные усилия в арматурном стержне, пересекаемом наклонной трещиной. Использование полученных аналитических зависимостей в практике проектирования железобетонных конструкций позволяет не только существенно уточнить определение перемещений и ширины раскрытия наклонных и нормальных трещин, но и максимально сблизить расчётную и физическую модель, базирующуюся на экспериментальных данных.

Ключевые слова: железобетон, жесткость, физическая модель, расчётная модель, наклонная трещина, сдвиг, нагельный эффект, составной стержень.

VL. I. KOLCHUNOV^{1,2}, S.B. KRYLOV³, S.S. FEDOROV¹¹ National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia² Scientific Research Institute of Construction Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow, Russia³ Gvozdev Research Institute of Reinforced Concrete, JSC SIC Construction, Moscow, Russia.

STIFFNESS OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES UNDER BENDING CONSIDERING SHEAR AND AXIAL FORCES (PART 2)

Abstract. The paper presents a physical and computational model for determining the parameters of limit states of reinforced concrete structures under complex stressed state - bending with axial and shear forces. Based on the adopted scheme of cross-section discretization and A.R. Rzhantsyn's theorem of duality between force and deformation parameters, the forward and backward transfer for determining the coefficients of the stiffness matrix of reinforced concrete rod structures with inclined and normal cracks have been constructed. Stiffness of structures in the zone of inclined cracks is determined using the model of composite strips which separate the zone with inclined cracks. The hypothesis about the character of deformation distribution in a complex-stressed reinforced concrete element with inclined cracks is accepted.

© Колчунов В.И., Крылов Б.С., Федоров С.С., 2024

For this model the conditional shear modulus is obtained, which allows to determine the average relative linear and angular strains of concrete and reinforcement at the point adjacent to the shear joint between inclined cracks. Based on this model and using the experimentally obtained value of the relative shear in the inclined crack, the dowel forces in the reinforcing bar intersected by the inclined crack were determined. The application of the obtained analytical relationships in the practice of designing reinforced concrete structures allows not only to clarify significantly the definition of displacements and width of opening of inclined and normal cracks, but also to maximize the convergence of the design and physical model based on experimental data.

Keywords: reinforced concrete, stiffness, physical model, computational model, inclined crack, shear, dowel effect, composite bar.

Введение

Повышение точности и надёжности расчёта железобетонных конструкций зданий и сооружений связано с развитием исследований по разработке новых расчётных моделей при сложных напряжённых состояниях [1-7]. Появление новых технологий при сближении физических явлений, теории и практики расчёта железобетона становится одним из важнейших направлений создания эффективных строительных конструкций [5-9].

Многолетние экспериментальные и теоретические исследования наклонных трещин для изгибаемых элементов, с учётом продольных и поперечных сил проводились в основном для оценки трещиностойкости и прочности железобетонных конструкций [10-23]. Однако существует относительно мало исследований [16-22] для определения жесткости конструкций с учётом наклонных трещин, в том числе, пересекающихся наклонных трещин. В рассматриваемой статье приведена разработанная физическая и расчётная модель для оценки жёсткости железобетонных конструкций при изгибе с учётом действия поперечных и продольных сил и наличии наклонных трещин, с использованием единичных составных полосок в блоке – клине и арках между наклонными трещинами, а также рассмотрена модель аппроксимации прямоугольных поперечных сечений с помощью малых квадратов в элементах матрицы жёсткости. На основе анализа исследований Н.И. Карпенко и С.Н. Карпенко [24-26], в продольной растянутой арматуре получены «нагельные» усилия Q_s и сдвиг в трещине Δ_s в виде отношения функции ширины раскрытия трещин и деформаций бетона к косинусу угла наклона трещины (θ). Определены экспериментальные значения «нагельных» усилий $Q_{s,exp}$ и экспериментальные зависимости сдвига в трещине для установления связи между сдвигом ($\Delta_{cr,exp}$) и пролётом среза (a/h_0), а также экспериментальные связи между длиной зоны анкеровки и деформациями арматуры. Настоящая статья (часть 2) является продолжением публикации авторов [27].

Модели и методы

На основе расчетной модели, построенной в работе [27], получены **жесткостные физические характеристики** (рисунок 1) D_{pq} ($p, q - 1, 2, 3$) в системе уравнений, которые определяются по формулы (11)-(21), приведенным в [27].

Расчет выполняется на основе нелинейной деформационной модели по методологии СП63.13330.2018, но дополнительно с учётом жёсткости на сдвиг, особенно в зонах с наклонными трещинами, с использованием уравнений статики и следующих базовых принципов:

- распределение относительных деформаций бетона и арматуры по высоте сечения элемента принимают по линейному закону (гипотеза плоских сечений);
- связь между осевыми напряжениями и относительными деформациями бетона и арматуры принимают в виде диаграмм состояния (деформирования) бетона и арматуры;

— сопротивление бетона растянутой зоны допускается не учитывать, принимая при $\varepsilon_{bi} \geq 0$ напряжения $\sigma_{bi} = 0$.

Переход к внутренним усилиям выполняется исходя из эпюры напряжений при помощи численного интегрирования по нормальному сечению. При расчете элементов с использованием деформационной модели принимают значения сжимающей продольной силы, а также сжимающих напряжений и деформаций укорочения бетона и арматуры с отрицательным знаком, а растягивающих напряжений и деформаций удлинения бетона и арматуры – с положительным знаком.

Положение центра тяжести и точек приложения усилий в расчетном сечении принимают в соответствии с системой координат, начало которой расположено в точке O^* (см. [27], рисунок 1).

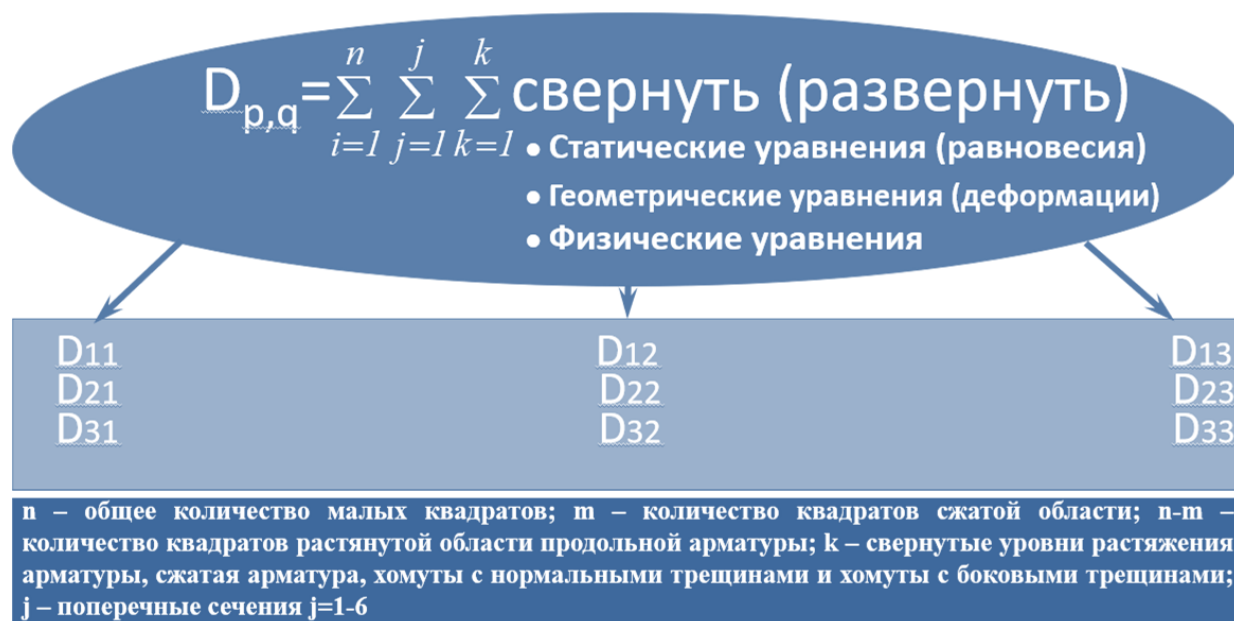


Рисунок 1 - Схема определения жесткости прямоугольных поперечных сечений с помощью малых квадратов матрицы 3×3 в элементах A_{ij} для характеристик матрицы от D_{11} до D_{33}

При расчете нормальных сечений по прочности в общем случае (см. [27], рисунок 1) используют уравнения равновесия внешних и внутренних усилий в нормальном сечении элемента:

$$M_y = \sum_i \sigma_{bi} \cdot A_{bi} \cdot Z_{byi} + \sum_j \sigma_{sj} \cdot A_{sj} \cdot Z_{syj} ; \quad (1)$$

$$N = \sum_i \sigma_{bi} \cdot A_{bi} + \sum_j \sigma_{sj} \cdot A_{sj} ; \quad (2)$$

уравнения, определяющие распределение деформаций по сечению элемента:

$$\varepsilon_{bi} = \varepsilon_0 + \frac{1}{r_y} \cdot Z_{byi} ; \quad (3)$$

$$\varepsilon_{sj} = \varepsilon_0 + \frac{1}{r_y} \cdot Z_{byj} ; \quad (4)$$

зависимости, связывающие напряжения и относительные деформации бетона и арматуры:

$$\sigma_{bi} = E_b \cdot \nu_{bi} \cdot \varepsilon_{bi} ; \quad (5)$$

$$\sigma_{sj} = E_{sj} \cdot v_{sj} \cdot \varepsilon_{sj}. \quad (6)$$

В уравнениях (1) - (6): M_y - изгибающий момент в расчетном сечении от внешней нагрузки относительно выбранных координатных осей; N - продольная сила от внешней нагрузки; e_y, e_z - расстояния от точки приложения продольной силы N до соответствующих выбранных осей; A_{bi}, Z_{byi}, Z_{bzi} - площадь, координаты центра тяжести i -го участка бетона и напряжения на уровне его центра тяжести; $A_{xj}, Z_{syj}, Z_{szj}, \sigma_{sj}$ - площадь, координаты центра тяжести j -го стержня арматуры и напряжение в нем; ε_0 - относительная деформация волокна, расположенного на пересечении выбранных осей (в точке 0); $\frac{1}{r_y}$ - кривизна продольной оси в рассматриваемом поперечном сечении элемента в плоскости действия изгибающих моментов M_y ; E_b - начальный модуль упругости бетона; E_{sj} - модуль упругости j -го стержня арматуры; v_{bi} - коэффициент упругости бетона i -го участка; v_{sj} - коэффициент упругости j -го стержня арматуры.

Коэффициенты v_{bi} и v_{sj} принимают по соответствующим диаграммам состояния бетона и арматуры. При этом используют зависимости СП63.13330.2018 "напряжение-деформация" на рассматриваемых участках диаграмм:

$$v_{bi} = \frac{\sigma_{bi}}{E_b \cdot \varepsilon_{bi}}; \quad (7)$$

$$v_{sj} = \frac{\sigma_{sj}}{E_{sj} \cdot \varepsilon_{sj}}. \quad (8)$$

Расчет нормальных сечений железобетонных элементов по прочности производится из условий:

$$|\varepsilon_{b,max}| \leq \varepsilon_{b,ult}; \quad (9)$$

$$|\varepsilon_{s,max}| \leq \varepsilon_{s,ult}, \quad (10)$$

Здесь $\varepsilon_{b,max}$ - относительная деформация наиболее сжатого волокна бетона в нормальном сечении элемента от действия внешней нагрузки; $\varepsilon_{s,max}$ - относительная деформация наиболее растянутого стержня арматуры в нормальном сечении элемента от действия внешней нагрузки; $\varepsilon_{b,ult}$ - предельное значение относительной деформации бетона при сжатии; $\varepsilon_{s,ult}$ - предельное значение относительной деформации удлинения арматуры.

Результаты исследований и их анализ

Жесткостные характеристики D_{ij} ($i, j - 1, 2, 3$) в системе уравнений для матрицы $D_{11} - D_{33}$, например, для D_{11} определяются по формуле:

$$D_{11} = \sum_{i=1}^m (Z_{bx,j,i} \cdot v_b \cdot E_b \cdot \omega_{\sigma,i} \cdot A_{b,c,i} \cdot z_{b,i} + Z_{bx,j,i} \cdot v_b \cdot E_b \cdot \omega_{\sigma,i} \cdot A_{b,c,ad,i} \cdot z_{b,i}) +$$

$$\begin{aligned}
 & + \sum \left(Z_{sx,j,i} \cdot v_s \cdot E_s \cdot \omega_r \cdot A_{s,i,rig} \cdot [h - x - a_{s,i,rig}] \right) + \varphi_{7,*} \cdot rig \sum \left(Z_{sx,j,i} \cdot v_s \cdot E_s \cdot \omega_r \cdot A_{s,rig} \cdot (0,5c_{inc,i-1} - 0,5l_2 - z_{sw} \pm a_j) \right) - \\
 & - \varphi_{5,*} \cdot rig \sum \left(Z_{sx,j,i} \cdot v_s \cdot E_s \cdot \omega_r \cdot A_{s,rig} \right) + (-\varphi_{8,*} \cdot Z_{sx,j,i} \cdot v_s \cdot E_s \sum \omega \cdot A_{s,*} - \\
 & - \varphi_{8,*} \cdot rig \cdot Z_{sx,j,i} \cdot v_s \cdot E_s \sum \omega_{rig,*} \cdot A_{s,rig}) \cdot a_{m,b,j} - \left(\frac{\varphi_{z,1} \cdot Z_{b,1-1} \cdot v_b \cdot E_b \cdot \varphi_{1,*} \cdot \left[a - \left(l_1 + \frac{\sqrt{2}}{2} l_2 \cdot \frac{1}{2} - \eta_{hor,b} \cdot l_2 \right) \right]}{a} \right) x_{B,k} \cdot \sqrt{l_2^2 + b^2} \cdot e_x + \\
 & + \left(\pm \varphi_{10} \cdot \frac{\sqrt{z^2 + y^2}}{l} \cdot G_b \right) \cdot \varphi_{3,*} \cdot x_{B,k} \cdot \sqrt{l_2^2 + b^2} \cdot e_x + \frac{\varphi_{z,1} \cdot Z_{b,1-1} \cdot v_b \cdot E_b \cdot \varphi_{1,*} \cdot \left[a - \left(l_1 + \frac{\sqrt{2}}{2} l_2 \cdot \frac{1}{2} - \eta_{hor,b} \cdot l_2 \right) \right]}{a} (x_k - x_{B,k}) \cdot \sqrt{l_2^2 + b^2} \cdot e_x + \\
 & + \left(\pm \varphi_{10} \cdot \frac{\sqrt{z^2 + y^2}}{l} \cdot G_b \right) \cdot \varphi_{3,*} \cdot (x_k - x_{B,k}) \cdot \sqrt{l_2^2 + b^2} \cdot e_x - Z_{s,1-1} \cdot v_b \cdot E_b \sum \omega_{up} \cdot A_{sc,up,i} \cdot e_x + \\
 & + Z_{s,1-1} \cdot v_s \cdot E_s \cdot \sum \omega_{rig} \cdot A_{s,i,rig} \cdot e_x - Z_{s,1-1} \cdot v_s \cdot E_s \cdot \sum \omega_{c,rig} \cdot A_{sc,i,rig} \cdot e_x + \\
 & + Z_{b,1-1} \cdot v_b \cdot E_b \cdot (A_{b,*} + A_{b,*,ad}) \cdot e_x + Z_{b,1-1} \cdot v_b \cdot E_b \cdot A_{sc,1,rig} \cdot e_x. \quad (11)
 \end{aligned}$$

Для частного случая $M_t = 0$ и $N = 0$ можно записать (прямой переход):

$$\frac{1}{r_x} = D_{11,*} \cdot M_x + D_{14,*} \cdot Q; \quad (12)$$

$$\Delta_Q = D_{41,*} \cdot M_x + D_{44,*} \cdot Q; \quad (13)$$

Теперь получим значение момента M_x из выражения (12):

$$M_x = \frac{1}{D_{11,*}} \left(\frac{1}{r_x} - D_{14,*} \cdot Q \right); \quad (14)$$

а также получим значение поперечной силы Q из выражения (13):

$$Q = \frac{1}{D_{44,*}} (\Delta_Q - D_{41,*} \cdot M_x); \quad (15)$$

В результате получим систему уравнений:

$$D = \begin{cases} M_x = \frac{\frac{1}{r_x} - D_{14,*} \cdot Q}{D_{11,*}}; \\ Q = \frac{\Delta_Q - D_{41,*} \cdot M_x}{D_{44,*}} \end{cases}; \quad (16)$$

Теперь, подставив значение M_x из первого уравнения системы во второе уравнение системы получим:

$$Q = D_{41,**} \cdot \frac{1}{r_x} + D_{44,**} \cdot \Delta_Q; \quad (17)$$

$$D_{41,**} = \frac{-D_{41,*}}{D_{44,*} D_{11,*} - D_{41,*} \cdot D_{14,*}}; \quad (18)$$

$$D_{44,**} = \frac{D_{11,*}}{D_{44,*}D_{11,*} - D_{41,*} \cdot D_{14,*}}. \quad (19)$$

Далее, подставим значение Q из второго уравнения системы в уравнение системы (16):

$$M_x = D_{11,**} \cdot \frac{1}{r_x} + D_{14,**} \cdot \Delta Q; \quad (20)$$

$$D_{11,**} = \frac{D_{44,*}}{D_{11,*}D_{44,*} - D_{14,*} \cdot D_{41,*}}; \quad (21)$$

$$D_{14,**} = \frac{-D_{14,*}}{D_{11,*}D_{44,*} - D_{14,*} \cdot D_{41,*}}. \quad (22)$$

В итоге, для жёсткости железобетонного элемента D получим:

$$D = \begin{pmatrix} M_x = D_{11,**} \cdot \frac{1}{r_x} + D_{14,**} \cdot \Delta Q \\ Q = D_{41,**} \cdot \frac{1}{r_x} + D_{44,**} \cdot \Delta Q \end{pmatrix}. \quad (23)$$

Жесткостные коэффициенты второго уровня в элементах матрицы записываются в виде:

$$D_{11,**} = \frac{D_{44,*}}{D_{11,*}D_{44,*} - D_{14,*} \cdot D_{41,*}}. \quad (24)$$

Здесь обозначены $D_{11,**}$ - жесткостной коэффициент второго уровня в элементах матрицы; $D_{11,*}$ и $D_{14,*}$ - тоже, коэффициенты—первого уровня. Дополнительно, аналогичным способом получены коэффициенты: $D_{13,**}$, $D_{14,**}$, $D_{31,**}$, $D_{33,**}$, $D_{34,**}$, $D_{41,**}$, $D_{43,**}$, $D_{44,**}$

Обратная матрица системы определяющих уравнений имеет вид:

$$M_x = D_{11} \cdot \frac{1}{r_x} + D_{14} \cdot \Delta Q; \quad (25)$$

$$Q = D_{14} \cdot \frac{1}{r_x} + D_{44} \cdot \Delta Q. \quad (26)$$

Теперь получим значения кривизны $\frac{1}{r_x}$ из выражения (25):

$$\frac{1}{r_x} = \frac{M_x - D_{14} \cdot \Delta Q}{D_{11}}. \quad (27)$$

Получим значение приращения поперечной силы ΔQ из выражения (26):

$$\Delta Q = \frac{Q - D_{14} \cdot \frac{1}{r_x}}{D_{44}}. \quad (28)$$

Запишем систему:

$$D = \begin{cases} \frac{1}{r_x} = \frac{M_x - D_{14} \cdot \Delta Q}{D_{11}} \\ Q - D_{14} \cdot \frac{1}{r_x} \\ \Delta Q = \frac{Q - D_{14} \cdot \frac{1}{r_x}}{D_{44}} \end{cases} \quad (29)$$

Возьмём первое уравнение системы (29) и подставим в него значение ΔQ из второго уравнения системы и получим:

$$\frac{1}{r_x} = D_{11,*} \cdot M_x + D_{14,*} \cdot Q, \quad (30)$$

где

$$D_{11,*} = \frac{D_{44}}{D_{11}D_{44} - D_{14} \cdot D_{14}}; \quad (31)$$

$$D_{14,*} = \frac{-D_{14}}{D_{11}D_{44} - D_{14} \cdot D_{14}}. \quad (32)$$

Аналогично, возьмём второе уравнение системы (29) и подставим в него значение $\frac{1}{r_x}$ из первого уравнения системы и получим:

$$\Delta Q = D_{14,*} \cdot M_x + D_{44,*} \cdot Q; \quad (33)$$

$$D_{14,*} = \frac{-D_{14}}{D_{44}D_{11} - D_{14} \cdot D_{14}}; \quad (34)$$

$$D_{44,*} = \frac{D_{11}}{D_{44}D_{11} - D_{14} \cdot D_{14}}; \quad (35)$$

В итоге для жесткости D можно записать:

$$D = \begin{cases} \frac{1}{r_x} = \frac{D_{44}}{D_{11}D_{44} - D_{14} \cdot D_{14}} \cdot M_x + \frac{-D_{14}}{D_{11}D_{44} - D_{14} \cdot D_{14}} \cdot Q \\ \Delta Q = \frac{-D_{14}}{D_{44}D_{11} - D_{14} \cdot D_{14}} \cdot M_x + \frac{D_{11}}{D_{44}D_{11} - D_{14} \cdot D_{14}} \cdot Q \end{cases} \quad (36)$$

Коэффициент **первого** алгебраического **уровня** в элементах матрицы, например $D_{14,*}$, определяется по формуле:

$$D_{14,*} = \frac{-D_{14}}{D_{44}D_{11} - D_{14} \cdot D_{14}}. \quad (37)$$

Аналогично вычисляются коэффициенты: $D_{13,*}$, $D_{14,*}$, $D_{31,*}$, $D_{33,*}$, $D_{34,*}$, $D_{41,*}$, $D_{43,*}$, $D_{44,*}$

Для изгибаемых, внецентренно сжатых железобетонных элементов, в которых не допускаются трещины, расчет производят с учётом работы растянутого бетона в расчетном поперечном сечении элемента из условия:

$$\varepsilon_{bt,max} \leq \varepsilon_{bt,ult}. \quad (38)$$

Здесь $\varepsilon_{bt,max}$ - относительная деформация наиболее растянутого волокна бетона в нормальном сечении элемента от действия внешней нагрузки; $\varepsilon_{bt,ult}$ - предельное значение относительной деформации бетона при растяжении.

Предельные значения относительных деформаций бетона $\varepsilon_{b,ult}$ ($\varepsilon_{bt,ult}$) принимают при двузначной эпюре деформаций (сжатие и растяжение) в поперечном сечении элемента (изгиб, внецентренное сжатие или растяжение с большими эксцентриситетами) равными ε_{b2} (ε_{bt2}).

При внецентренном сжатии или растяжении элементов и распределении в поперечном сечении элемента деформаций только одного знака, предельные значения относительных деформаций бетона $\varepsilon_{b,ult}$ ($\varepsilon_{bt,ult}$) определяют в зависимости от соотношения деформаций бетона на противоположных гранях сечения элемента ε_1 и ε_2 ($|\varepsilon_2| \geq |\varepsilon_1|$) по формулам:

$$\varepsilon_{b,ult} = \varepsilon_{b2} - (\varepsilon_{b2} - \varepsilon_{b0}) \cdot \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}, \quad (39)$$

$$\varepsilon_{bt,ult} = \varepsilon_{bt2} - (\varepsilon_{bt2} - \varepsilon_{bt0}) \cdot \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}. \quad (40)$$

Здесь ε_{b0} , ε_{bt0} , ε_{b2} , ε_{bt2} - параметры деформаций расчётных диаграмм состояния бетона, принимаемые по нормам СП63.13330. Предельные значения относительной деформации арматуры $\varepsilon_{s,ult}$ принимают равными: 0,025 - для арматуры с физическим пределом текучести; 0,015 - для арматуры с условным пределом текучести.

Выводы

На основании приведённых исследований можно сделать следующие выводы.

1. Предложена схема аппроксимации прямоугольных поперечных сечений сложноподвижных железобетонных конструкций с помощью малых квадратов для определения элементов a_{pq} матрицы жесткостных характеристик от $D_{11,**}$ до $D_{33,**}$, а также построены прямой (для внутренних усилий) и обратный, (где известны $\frac{1}{r_x}$, ε_0 и Δ_Q , но неизвестны M_x , N , Q) переход для определения коэффициентов характеристик матрицы D_{pq} ($p, q = 1, 2, 3$) сжатой области бетона и растянутой рабочей арматуры в системе уравнений: статических, геометрических и физических.

2. Для решения задач определения расчётных параметров предельных состояний II группы в зоне наклонных (перекрёстных) трещин построена деформационная модель единичных составных полосок, моделирующих деформации в зоне наклонных трещин, с учётом изменения положения изогнутой оси при образовании трещин.

3. Жесткости сечений в зоне наклонных трещин железобетонных конструкций при действии изгибающего момента M_{bend} , продольной N и поперечной силы Q для модели единичных составных полосок найдены исходя из продольных деформаций $\varepsilon_{0,x,j,i,*}$ (от нейтральной оси), кривизн $\frac{1}{r_{x,j,i,*}}$, а также поперечных сдвигов $\Delta_{Q,j,i,*}$, принимая схему

разбивки поперечных сечений на малые квадраты и с учётом упругопластических деформаций в сжатом бетоне и рабочей арматуре.

4. На основе предложенной гипотезы о характере распределения деформаций в сложнапряженном железобетонном элементе с трещинами получен условный модуль сдвига ξ_m в единичной зоне шва сдвига для средних относительных линейных и угловых деформаций от взаимных смещений бетона и арматуры в точке шва, прилегающих к шву сдвига между смежными трещинами. Использование этой гипотезы позволяет снизить порядок системы дифференциальных уравнений составных стержней А.Р. Ржаницына и учесть наличие в конструкции трещин.

5. Для сдвигов и внутренних усилий в модели железобетонных составных стержней получены продольные напряжения и линейные деформации в каждом составляющем стержне. Эюра продольных и касательных напряжений (деформаций) в поперечном сечении составного стержня получается ступенчатой.

6. Градиент зависимости сдвига трещины на эюре продольных и касательных напряжений в каждом составном стержне для каждого шва определяется отношением производной от сдвигающего усилия в i -том шве к условному модулю сдвига.

7. Нагельное усилие в арматуре Q_s от поперечной силы в наклонном сечении получены на основе модели приопорной зоны в виде составных полосок и экспериментально установленного значения сдвига в трещине.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Arzamastsev S.A., Rodevich V.V. To the calculation of reinforced concrete elements for bending with torsion // *Proceedings of higher educational institutions, Building*. 2015. vol. 681. no. 9, Pp. 99-109.
2. Ilker Kalkan, Saruhan Kartal. Torsional Rigidities of Reinforced Concrete Beams Subjected to Elastic Lateral Torsional Buckling // *International Journal of Civil and Environmental Engineering*. 2017. Vol. 11. No.7. Pp. 969-972.
3. Klein G., Lucier G., Rizkalla S., Zia P., Gleich H. Torsion simplified: a failure plane model for design of spandrel beams // *ACI Concrete International Journal*, February 2012. Pp.1-19
4. Lin W. Experimental investigation on composite beams under combined negative bending and torsional moments // *Advances in Structural Engineering*. 2021. 24(6). Pp. 1456-1465. <https://doi.org/10.1177/1369433220981660>.
5. Залесов А.С., Мухамедиев Т.А., Чистяков Е.А. Расчет трещиностойкости железобетонных конструкций по новым нормативным документам // *Бетон и железобетон*. 2002. №5. С. 15-18.
6. Кодыш Э.Н., Никитин И.К., Трекин Н.Н. Расчет железобетонных конструкций из тяжелого бетона по прочности, трещиностойкости и деформациям. М.: Изд. АСВ, 2010. 352 с.
7. Крылов С.Б. Построение точного общего решения уравнения изгиба железобетонного стержня с учетом ползучести и трещинообразования // *Бетон и железобетон в Украине*. 2002. №4(14). С. 2-4.
8. Травуш В.И., Карпенко Н.И., Колчунов Вл. И., Каприелов С.С., Демьянов А.И., Коноров А.В. Основные результаты экспериментальных исследований железобетонных конструкций из высокопрочного бетона В100 круглого и кольцевого сечений при кручении с изгибом // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2019. №15(1). С.51-61.
9. Демьянов А.И., Сальников А.С., Колчунов Вл. И. Экспериментальные исследования железобетонных конструкций при кручении с изгибом и анализ их результатов // *Строительство и реконструкция*. 2017. №4(72). С. 17-26.
10. Колчунов В.И., О.И. Аль-Хашими, Протченко М.В. Жесткость железобетонных конструкций при изгибе с поперечной и продольной силами // *Строительство и реконструкция*. 2021. №6. С. 5-19.
11. Колчунов Вл. И., Федоров В.С. Понятийная иерархия моделей в теории сопротивления строительных конструкций // *Промышленное и гражданское строительство*. 2020. №8. с. 16-23. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.08.16-23.
12. Kolchunov Vl. I., Dem'yanov A. I. The modeling method of discrete cracks and rigidity in reinforced concrete // *Magazine of Civil Engineering*, 2019. vol. 88. no. 4. Pp. 60-69, DOI: 10.18720/MCE.88.6.
13. Karpenko N. I., Kolchunov Vl. I., Travush V. I. Calculation model of a complex stress reinforced concrete element of a boxed section during torsion with bending // *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2021. vol. 51. no. 3. Pp. 7-26, DOI: 10.36622/VSTU.2021.51.3.001.

14. Горностаев И. С., Ключева Н. В., Колчунов Вл. И., Яковенко И. А. Деформативность железобетонных составных конструкций с наклонными трещинами // Строительная механика и расчет сооружений. – 2014. – № 5(256). – С. 60-66.
15. Гусев Б.В., Звездов А.И. Теоретические и экспериментальные исследования статистических вопросов прочности бетонов // Строительные материалы. 2017. № 11. С. 18–21.
16. Бондаренко В.М., Колчунов Вл.И. Расчетные модели силового сопротивления железобетона. М.: Изд-во АСВ, 2004. 471 с.
17. Верюжский Ю.В., Колчунов Вл.И. Методы механики железобетона. Учебное пособие. - К.: Книжное издательство НАУ, 2005. 653 с
18. Голышев А. Б. Сопротивление железобетона / А. Б. Голышев, Вл. И. Колчунов. – К.: Основа, 2009. 432 с.
19. Голышев А.Б., Колчунов Вл. И. Сопротивление железобетонных конструкций, возводимых в сложных инженерно-геологических условиях (монография). Киев: Основа. 2010. 286 с.
20. Емельянов С. Г., Немчинов Ю. И., Колчунов Вл.И., Марьенков Н. Г., Яковенко И. А. Особенности расчета сейсмостойкости крупнопанельных зданий // Промышленное и гражданское строительство. 2013. №12. С. 64–71.
21. Kim C., Kim S., Kim K.-H., Shin D., Haroon M., Lee J.-Y. Torsional Behavior of Reinforced Concrete Beams with High-Strength Steel Bars // ACI Structural Journal. 2019. – 116. Pp. 251-233.
22. Велюжский Ю.В., Голышев А.Б., Колчунов Вл.И., Ключева Н.В., Лисицин Б.М., Машков И.Л., Яковенко И.А. Справочное пособие по строительной механике. В двух томах. Том II: Учебное пособие. – М.: Изд-во АСВ, 2014. 432 с.
23. Баширов Х. З., Колчунов Вл. И., Федоров В. С., Яковенко И. А. Железобетонные составные конструкции зданий и сооружений. Москва: Издательство АСВ, 2017. 248 с.
24. Карпенко Н.И. Теория деформирования железобетона с трещинами, М: Стройиздат. 1976. 204 с.
25. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. М.: Стройиздат, 1996. 410 с.
26. Карпенко, С. Н. Об общем подходе к построению теории прочности железобетонных элементов при действии поперечных сил // Бетон и железобетон. 2007. №2. С. 21-27.
27. Колчунов В.И., Крылов С.Б., Федоров С.С. Жесткость железобетонных конструкций при изгибе с учётом поперечной и продольной сил (часть 1) // Строительство и реконструкция. 2023. № 6. С. 25-40. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2023-110-6-25-40>

REFERENCES

1. Arzamastsev S.A., Rodevich V.V. To the calculation of reinforced concrete elements for bending with torsion. *Proceedings of higher educational institutions. Building*. 2015. vol. 681. no. 9, Pp. 99-109.
2. IlkerKalkan, SaruhanKartal. Torsional Rigidities of Reinforced Concrete Beams Subjected to Elastic Lateral Torsional Buckling. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*. 2017. Vol. 11. No.7. Pp. 969–972.
3. G. Klein, G. Lucier, S. Rizkalla, P. Zia and H. Gleich. Torsion simplified: a failure plane model for design of spandrel beams. *ACI Concrete International Journal*. 2012. February. Pp.1-19
4. Lin W. Experimental investigation on composite beams under combined negative bending and torsional moments. *Advances in Structural Engineering*. 2021. 24(6). Pp. 1456–1465. DOI: 10.1177/1369433220981660.
5. Zalesov A.S., Mukhamediev T.A., Chistyakov E.A. Calculation of crack resistance of reinforced concrete structures according to new normative documents. *Concrete and Reinforced Concrete*. 2002. No. 5. Pp. 15-18.
6. Kodysh E.N., Nikitin I.K., Trekin N.N. Calculation of reinforced concrete structures from heavy concrete on strength, crack resistance and deformations. Moscow: Publ. ASV, 2010. 352 p.
7. Krylov S.B. Construction of the exact general solution of the bending equation of a reinforced concrete rod with account of creep and cracking. *Concrete and Reinforced Concrete in Ukraine*. 2002. No. 4(14). Pp. 2-4.
8. Travush V.I., Karpenko N.I., Kolchunov Vl. I., Kaprielov S.S., Demyanov A.I., Konorev A.V. Main results of experimental studies of reinforced concrete structures of high-strength concrete B100 round and circular cross sections in torsion with bending. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2019. vol. 15. no. 1. Pp. 51-61. DOI:10.22363/1815-5235-2019-15-1-51-61
9. Demyanov A.I., Salnikov A.S., Kolchunov Vl. I. The experimental studies of reinforced concrete constructions in torsion with bending and the analysis of their results. *Building and Reconstruction*, 2017. vol. 72, no. 4. Pp. 17–26.
10. Kolchunov V.I., Al-Hashimi O.I., Protchenko M.V. Bending stiffness of reinforced concrete structures with transverse and longitudinal forces. *Building and reconstruction*. 2021. No. 6. Pp. 5-19.
11. Kolchunov Vl. I., Fedorov V.S. Conceptual Hierarchy of Models in the Theory of Resistance of Building Structures. *Industrial and Civil Engineering*. 2020. No. 8. Pp. 16–23, DOI: 10.33622/0869-7019.2020.08.16-23.

12. Kolchunov V. I., Dem'yanov A. I. The modeling method of discrete cracks and rigidity in reinforced concrete. *Magazine of Civil Engineering*. 2019. vol. 88. no. 4. p. 60-69, DOI: 10.18720/MCE.88.6.
13. Karpenko N. I., Kolchunov V. I., Travush V. I. Calculation model of a complex stress reinforced concrete element of a boxed section during torsion with bending. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2021. vol. 51. no. 3. Pp. 7-26. DOI: 10.36622/VSTU.2021.51.3.001.
14. Gornostaev I.S., Klyueva N.V., Kolchunov V.I., Yakovenko I.A. Deformability of reinforced concrete composite structures with inclined cracks. *Structural mechanics and calculation of structures*. 2014. No. 5 (256). Pp. 60-66.
15. Gusev B.V., Zvezdov A.I. Theoretical and experimental studies of statistical issues of concrete strength. *Construction Materials*. 2017. No. 11. Pp. 18-21.
16. Bondarenko V.M., Kolchunov V.I. Design models of the power resistance of reinforced concrete. Moscow: Publishing house ASV, 2004. 471 p.
17. Veruzhsky Yu.V., Kolchunov V.I. Methods of reinforced concrete mechanics. Kiev: NAU Book Publishing House. 2005. 653 p.
18. Golyshv A.B., Kolchunov V.I. Reinforced concrete resistance. Kiev: Osnova, 2009. 432 p.
19. Golyshv A.B., Kolchunov V.I. Soprotivlenie zhelezobetonnykh konstrukcij, vozvodimyh v slozhnyh inzhenerno-geologicheskikh usloviyah [Resistance of reinforced concrete structures erected in complex engineering-geological conditions] Kiev: Osnova, 2010. 286 p. (in Russian).
20. Emelianov s. G., Nemchinov Yu. I., Maryenkov N. G., Kolchunov V. I., Yakovenko I. A. Features of calculation of seismic stability of large-panel buildings. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2013. No. 12. Pp. 64–71. (in Russian).
21. Kim C., Kim S., Kim K.-H., Shin D., Haroon M., Lee J.-Y. Torsional Behavior of Reinforced Concrete Beams with High-Strength Steel Bars. *ACI Structural Journal*. 2019. 116. Pp. 251-233.
22. Velyuzhsky Yu.V., Golyshv A.B., Kolchunov V.I., Klyueva N.V., Lisitsin B.M., Mashkov I.L., Yakovenko I.A. A reference guide to structural mechanics: Volume II. Moscow: Publishing house ABC. 2014. 432 p.
23. Bashirov Kh.Z., Kolchunov V. I., Fedorov V.S., Yakovenko I.A. Reinforced concrete composite structures of buildings and structures. Moscow: ASV Publishing House, 2017. 248 p.
24. Karpenko N.I. The theory of deformation of reinforced concrete with cracks. Moscow: Stroyizdat. 1976. 204 p.
25. Karpenko N.I. General models of reinforced concrete mechanics. Moscow: Stroyizdat, 1996. 410 p.
26. Karpenko, S.N. On the general approach to the construction of the theory of strength of reinforced concrete elements under the action of transverse forces. *Concrete and reinforced concrete*. 2007. No. 2. Pp. 21-27.
27. Kolchunov V.I., Krylov S.B., Fedorov S.S. Stiffness of reinforced concrete structures under bending considering shear and axial forces (part 1). *Building and Reconstruction*. 2023. No. 6. Pp. 25-40. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2023-110-6-25-40>

Информация об авторах:

Колчунов Владимир Иванович

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,

Член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры инженерной графики и компьютерного моделирования.

Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН), г. Москва, Россия

Главный научный сотрудник

E-mail: vlik52@mail.ru

Крылов Сергей Борисович

Член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией механики железобетона НИИЖБ им. А. А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство»»

E-mail: niizhb_lab8@mail.ru

Федоров Сергей Сергеевич

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), г. Москва, Росси

Кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой инженерной графики и компьютерного моделирования

E-mail: fedorovss@mgsu.ru

Information about authors:

Kolchunov Vladimir Iv.

Moscow State University of Civil Engineering (NIU MGSU), Moscow, Russia,
Corresponding Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, doctor of technical sciences, professor, professor of the Department of Engineering Graphics and Computer Modeling.
Scientific Research Institute of Construction Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow, Russia, chief researcher
E-mail: vlik52@mail.ru

Krylov Sergey B.

Gvozdev Research Institute of Reinforced Concrete, JSC SIC Construction, Moscow, Russia,
Corresponding Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, doctor of technical sciences, professor, head of the Reinforced Concrete Mechanics Laboratory at the Gvozdev Research Institute for Reinforced Concrete.
E-mail: niizhb_lab8@mail.ru

Fedorov Sergey S.

Moscow State University of Civil Engineering (NIU MGSU), Moscow, Russia,
candidate of technical sciences, head of the Department of Engineering Graphics and Computer Modeling.
E-mail: fedorovss@mgsu.ru

В.В. НАДОЛЬСКИЙ^{1,2}¹УО «Брестский государственный технический университет», г. Брест, Республика Беларусь²Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

НЕСОВЕРШЕНСТВА ДЛЯ РАСЧЕТА СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ. ЧАСТЬ 1.

Аннотация. Хорошо известно, что несовершенства всегда присутствуют в элементах конструкций. Несовершенства могут существенно влиять на поведение и несущую способность стальных конструкций, особенно в случае задач, связанных с устойчивостью. Поэтому несовершенства должны учитываться в модели несущей способности и их правильное приложение (задание формы и значения) является ключевым моментом в процессе численного анализа. В последние десятилетия в отечественном научном пространстве уделяется мало внимания актуализации моделей несовершенств для применения в численных моделях, в том числе с учетом современных более точных технологий изготовления и монтажа стальных конструкций. Целью данного исследования является аналитический обзор и анализ научных исследований и технической литературы с последующим синтезом и выработкой рекомендаций по несовершенствам применительно к расчету стальных конструкций посредством технологии компьютерного моделирования, в том числе методом конечных элементов. Результаты исследования содержат указания по способам задания форм и значений несовершенств для разных групп несовершенств. Статья состоит из двух частей. Первая часть посвящена вопросам изучения геометрических несовершенств, остаточных напряжений и правилам комбинации несовершенств, вторая часть статьи – эквивалентным несовершенствам.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, несовершенства, дефекты, остаточные напряжения, метод конечных элементов, искривления балки.

V.V. NADOLSKI^{1,2}¹Brest State Technical University, Brest, Republic of Belarus²Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

IMPERFECTIONS FOR THE CALCULATION OF STEEL STRUCTURES BY THE FINITE ELEMENT METHOD. PART 1.

Abstract. It is well known that imperfections are always present in structural elements. Imperfections can significantly affect the behavior and bearing capacity of steel structures, especially in the case of stability-related tasks. Therefore, inconsistencies must be taken into account in the load-bearing capacity model and their correct application (setting the shape and value) is a key point in the numerical analysis process. In recent decades, much attention has been paid in the domestic scientific space to updating imperfection models for use in numerical models, including taking into account modern more accurate manufacturing and installation technologies for steel structures. The purpose of this study is an analytical review and analysis of scientific research and technical literature, followed by synthesis and elaboration of recommendations on imperfections in relation to the calculation of steel structures using computer modeling technology, including the finite element method. The results of the study contain instructions on how to set the shapes and values of imperfections for different groups of imperfections. The article consists of two parts. The first part is devoted to the study of geometric imperfections, residual stresses and rules for the combination of imperfections, the second part of the article is devoted to equivalent imperfections.

Keywords: computer modeling, imperfections, defects, residual stresses, finite element method, beam curvature.

Введение

Хорошо известно, что несовершенства всегда присутствуют в элементах конструкций. Их амплитуда уменьшается при применении передовых технологий изготовления и монтажа стальных конструкций, однако полностью они не исключаются. Несовершенства могут существенно влиять на поведение и несущую способность стальных конструкций, особенно в случае задач, связанных с устойчивостью [1-10]. Поэтому несовершенства всегда должны учитываться в численной модели и их правильное приложение (задание формы и значения) является ключевым моментом в процессе численного анализа [5, 9, 10].

В качестве источников начальных несовершенств в стальных конструкциях обычно выделяют геометрические, структурные (остаточные напряжения) и конструкционные несовершенства. Геометрические несовершенства предназначены для представления геометрических отклонений реальной конструкции, элемента или сечения от идеальной/проектной геометрии. Структурные несовершенства, главным образом, включают в себя остаточные напряжения, однако в ряде случаев могут включать микродефекты, возникающие в результате технологии производства стальных элементов. Конструкционные несовершенства - это несоответствие граничных условий, непредвиденные и не предусмотренные проектом эксцентриситеты соединений, отклонений фундамента и т.д. Геометрические несовершенства и остаточные напряжения могут быть смоделированы как отдельные несовершенства или как эквивалентные несовершенства, которые охватывают влияние геометрических и структурных несовершенств [9, 10].

Влияние того или иного несовершенства может существенно отличаться для различных типов конструкций. Чувствительность к несовершенствам существенно отличается для конструкций стержневого, пластинчатого или оболочечного типа. Поэтому анализ влияния несовершенств имеет большое значение. Целью данного исследования является аналитический обзор литературы и систематизация результатов исследований несовершенств применительно к расчету стальных конструкций посредством технологии компьютерного моделирования несущей способности, в том числе методом конечных элементов. В последние десятилетия в отечественном научном пространстве уделяется мало внимания актуализации моделей несовершенств с учетом современных более точных технологий изготовления и монтажа стальных конструкций. Из последних наиболее значимых исследований следует отметить следующие отечественные работы [11-17], однако они были выполнены в 1970-1980 годах. В то же время в зарубежной литературе можно отметить значительную активность в этом вопросе, поэтому многие рекомендации, представленные ниже, основаны на обзоре зарубежной литературы. Статья состоит из двух частей. Первая часть посвящена вопросам изучения геометрических несовершенств, остаточных напряжений и правилам комбинации несовершенств, вторая часть статьи – эквивалентным несовершенствам.

Представлен аналитический обзор и анализ научной и технической литературы с последующим синтезом и выработкой рекомендаций по заданию форм и значений геометрических и структурных несовершенств и их комбинаций для расчета стальных конструкций методом конечных элементов.

Форма и значение геометрических несовершенств

В общем случае форма и значение геометрических несовершенств зависят от вида конструкции, метода изготовления и монтажа. *Форма геометрических* несовершенств может быть задана на основании [8-10, 18]:

– измеренных форм несовершенств элемента конструкции, выполненных на конкретных элементах. Измеренные формы несовершенств, как правило, применяют для целей валидации численной модели, если исследуется конкретный образец, или для существующих конструкций. В этих случаях измеренные геометрические несовершенства

(как формы, так и значение) прикладывают вместе с остаточными напряжениями. Если целью расчета является прямая оценка несущей способности (сопротивления) или численное параметрическое исследование, измеренная форма несовершенства может быть применена, однако значение несовершенства должно быть заменено прогнозным значением с учетом статистической обработки или стандартизированным значением;

- предопределенных форм (функций), например, синусоидальной функцией или других тригонометрических функций;

- масштабированных форм упругой потери устойчивости (результат линейного упругого расчета на устойчивость (бифуркационного анализа)). Эти несовершенства определены на математической основе, а методика моделирования хорошо разъяснена и широко используется в практике проектирования [8-10]. В большинстве случаев используют первую форму потери устойчивости в качестве формы несовершенства. В литературе, например [2, 3], можно найти исследования, доказывающие, что приложение форм потери устойчивости как эквивалентных несовершенств со стандартизированными значениями обеспечивает безопасные значения несущей способности. Однако фактическая форма отказа конструкции может отличаться от первой формы потери устойчивости из-за значительных пластических деформаций и перераспределения нагрузки [8]. Поэтому важно сравнить форму приложенного начального несовершенства с полученной формой отказа. Если имеются большие различия (например, отказ другого отсека, другой зоны элемента или конструкции, а не нагруженный несовершенством), то следует также проверить и выбрать в качестве несовершенства вторую или более высокую форму потери устойчивости, в некоторых случаях и комбинацию форм. В некоторых программах автоматическое приложение масштабированной формы потери устойчивости как геометрического или эквивалентного несовершенства предлагается в качестве встроенного инструмента процесса проектирования, поэтому их применение в повседневном процессе проектирования может быть проще других способов задания несовершенств;

- формы отказа. Основой этого несовершенства является предварительный анализ формы отказа, которая записывается как начальная геометрия для последующего расчета. Этот способ задания формы несовершенства не является широко используемым и исследования по его применению продолжаются.

Значение геометрических несовершенств может быть назначено исходя из следующих соображений:

- фактически измеренные значения несовершенства [5, 6, 9, 10], как правило, только для частных случаев (существующая конструкция, серийное производство, исследуемый образец);

- равной 80% от допусков на изготовление и монтаж [2, 3, 5, 9, 10] – наиболее распространенный случай. Значение 80% соответствует приблизительно среднему значению геометрического несовершенства;

- максимальное значение допуска на изготовление и монтаж, в качестве доминирующей базисной переменной.

Остаточные напряжения возникают в процессе изготовления стальных элементов (прокатка стального листа, газовая резка, сварка). Они должны быть представлены начальными деформациями или напряжениями в модели в зависимости от применяемого программного обеспечения, обеспечивая равновесное напряженное состояние при расчете без приложения внешних нагрузок. С точки зрения численного моделирования, остаточные напряжения в основном разделяют на напряжения мембранного и изгибного типа.

Для сварных элементов остаточные напряжения мембранного типа являются определяющими. Максимальная амплитуда растягивающего напряжения ожидается вблизи зоны сварных швов, а максимальное сжимающее напряжение – между зонами сварных швов.

Несколько последних исследований показывают, что максимальное значение растягивающего остаточного напряжения в основном зависит от предела текучести материала. Однако максимальное значение сжимающих напряжений не зависит от марки стали, а зависит от геометрии балки (например, от соотношения ширины и толщины для сварных конструкций) [19]. Для сварных конструкций пиковое значение растягивающего остаточного напряжения может быть принято равным пределу текучести материала для марок стали от S235 до S700. Пиковое значение сжимающего остаточного напряжения зависит от процесса производства и геометрии поперечного сечения.

Для стальных холодноформованных элементов доминирующее влияние оказывают остаточные напряжения изгибного типа. В этом случае остаточные напряжения изменяются по толщине элемента. В схемах остаточных напряжений предполагается линейное изменение, однако хорошо известно, что реальное распределение имеет сильно нелинейный характер.

Влияние остаточных напряжений мембранного типа и изгибного типа на поведение и несущую способность стальных конструкций существенно отличается. Это также является причиной того, что для одинаковых геометрических параметров поперечного сечения при расчете несущей способности должны использоваться различные кривые потери устойчивости в зависимости от различных производственных процессов. Эту особенность также следует учитывать в численных расчетах.

В численной модели остаточные напряжения должны моделироваться самоуравновешенной схемой напряжений с использованием начальных напряжений/деформаций или путем приложения температурных нагрузок, оказывающих аналогичное воздействие. Обычно для получения численного равновесия в модели без приложения других нагрузок на конструкцию требуется шаг равновесия (первый шаг нагрузки). Если остаточные напряжения не самоуравновешены, то элементы будут деформированы, т.е. начальные геометрические несовершенства будут изменены остаточными напряжениями, что может изменить предельное значение несущей способности исследуемого элемента конструкции.

Схемы остаточных напряжений могут быть найдены в рекомендациях ECCS [20], а также в следующих исследованиях. В работе [21] исследовали различные колонны, изготовленные из марок стали S650 и S690. Полная исследовательская программа включала коробчатые, крестообразные и двутавровые сечения. Для всех проанализированных поперечных сечений были проведены измерения остаточных напряжений. В работе [22] исследовали остаточные напряжения на шести сварных элементах коробчатого сечения из высокопрочной стали (S460). Измерения продольных остаточных напряжений выполнены по всему поперечному сечению, включая зоны сварки. По результатам испытаний сделан вывод, что остаточное сжимающее напряжение существенно зависит от геометрии поперечного сечения (толщины стенки и отношения ширины к толщине). Кроме того, максимальные растягивающие остаточные напряжения в угловых зонах оказались меньше предела текучести и не было выявлено четкой корреляции между максимальным растягивающим напряжением и отношением ширины к толщине. В работе [23] также изучалось поведение колонн при потере устойчивости из стали S960. Перед испытаниями изучены остаточные напряжения на шести элементах коробчатого сечения. На основе измерений была разработана модель остаточных напряжений для материала S960, в которой остаточное растягивающее напряжение в зоне сварного шва назначено равным 690 МПа, а максимальное напряжение сжатия в середине пластины вычисляется с помощью уравнения. В работе [24] выполнили исследования остаточных напряжений для сварного и холодноформованного коробчатого сечения из стали S355. В работе [25] была проведена экспериментальная программа для количественного определения остаточных напряжений в профилях из нержавеющей стали. Полное распределение остаточных напряжений было

получено для трех горячекатаных уголков, восьми профилированных листов и семи холоднокатаных коробчатых профилей, в общей сложности было снято более 800 показаний. В горячекатаных профилях и профилированных листах остаточные напряжения обычно не превышают 20% от условного предела текучести, хотя для холоднокатаных коробчатых профилей остаточные мембранные напряжения были относительно низкими, а остаточные изгибные напряжения оказались от 40% до 70% от условного предела текучести.

Как видно из отмеченных исследований, значения и характер остаточных напряжений зависят от процесса изготовления стальных элементов. Поэтому новые, или инновационные, методы производства могут быть учтены при проектировании, однако это требует внедрения соответствующей модели остаточных напряжений, что практически невозможно сделать для формульных моделей несущей способности и с лёгкостью реализуется в численных моделях. В случае прямого определения несущей способности применяемая модель остаточных напряжений должна учитывать неопределенность остаточных напряжений. Поэтому применяемые схемы остаточных напряжений должны быть основаны на статистической оценке. Возможность использования моделей остаточных напряжений, основанных на лабораторных измерениях, не предназначена для ежедневной практики проектирования. Однако при наличии достаточной исследовательской базы, она позволяет корректировать модель несущей способности с использованием конкретных технологий производства. Это позволяет внедрять новые результаты исследований в стандартизированные процессы проектирования.

Разделение несовершенств на группы

Для систематизации исследований геометрические и эквивалентные несовершенства можно разделить на следующие *группы*:

- эквивалентные несовершенства строительной конструкции (каркаса, рамы), также используется термин – глобальные или общие несовершенства конструкции;
- эквивалентные несовершенства элементов, более редкий термин – локальные несовершенства конструкции;
- эквивалентные несовершенства поперечных сечений (частей сечения (пластин) или формы сечения) [2, 9, 10];
- эквивалентные несовершенства пластинчатых конструкций (обычно мостовые конструкции, состоящие из укрепленных или неукрепленных ребрами жесткости пластин), включают в себя несовершенства ребер жесткости и несовершенства пластин [2, 3];
- эквивалентные несовершенства оболочечных конструкций [18].

Данное разделение несовершенств на группы соответствует общепринятым стратегиям проверок на потерю устойчивости стальных конструкций:

- проверка глобальной устойчивости (потеря устойчивости каркаса);
- проверка устойчивости элементов (например, потеря устойчивости при сжатии, изгибе и т.д.);
- проверка потери устойчивости пластин (например, потеря устойчивости стенки и полки, формы сечения холодноформованных конструкций, потеря устойчивости укрепленных или неукрепленных ребрами жесткости пластинчатых конструкций), которая обычно относится к расчету несущей способности сечения по прочности;
- проверка потери устойчивости оболочечных конструкций.

Однако причина выделения групп несовершенств не только в том, чтобы разделить несовершенства по проблемам устойчивости или типам исследуемых конструкций, но и в том, чтобы установить правила комбинирования несовершенств. Правила комбинирования несовершенств используют вышеуказанные группы несовершенств так же, как правила комбинирования нагрузки используют различные случаи нагрузки.

Комбинации несовершенств

Несовершенства следует задавать для каждой исследуемой проблемы устойчивости. Общее правило заключается в том, что проблемы устойчивости, для которых применяются соответствующие несовершенства, могут быть непосредственно проверены численной моделью, а все остальные проблемы устойчивости должны проверяться дополнительно (например, см. указания п.5.2.2(7) EN 1993-1-1). Если выполняется проверка различных форм потери устойчивости в рамках одной численной модели, следует применять формы несовершенств, относящиеся к каждой проблеме устойчивости, и комбинировать формы несовершенств.

Если геометрические несовершенства и остаточные напряжения независимо прикладываются в численной модели, то значения геометрических несовершенств для всех форм должны быть приняты по их номинальным значениям. В том числе это означает, что предельное значение несущей способности должно определяться с использованием комбинации несовершенств, в которой все геометрические несовершенства имеют полные значения.

Эквивалентные несовершенства содержат комбинированный эффект геометрических несовершенств и остаточных напряжений. Если несколько различных эквивалентных несовершенств применяются в одной численной модели для исследования взаимодействия форм потери устойчивости, то нельзя избежать дублирования эффекта остаточных напряжений, что может привести к консервативным значениям несущей способности, как это было доказано в работе [26]. Поэтому комбинации несовершенств, которые должны применяться для решения взаимодействия форм потери устойчивости, являются ключевым вопросом для точного расчета несущей способности при потере устойчивости. Однако в настоящее время не существует общепризнанного и экспериментально или научно обоснованного правила комбинирования несовершенств для анализа взаимодействия форм потери устойчивости (взаимодействие потери устойчивости конструкции, потери устойчивости элемента или потери устойчивости части/частей сечения), чтобы определить точные правила комбинирования несовершенств.

По этой причине в настоящее время ведутся исследования по изучению влияния различных правил комбинирования несовершенств и их более целесообразного применения. Для комбинирования несовершенств стальных конструкций (каркасов) самые последние исследования представлены в статье [27]. Исследование было выполнено для однопролетных, многоэтажных, многопролетных и неравномерных рамных конструкций из конструкционной стали или аустенитных нержавеющей сплавов, а также для разных значений гибкости элементов. Результаты расчетов показали, что для исследованных каркасов (рам) влияние направления несовершенств на предельную нагрузку невелико, и значительных различий не наблюдалось для простых, многоэтажных, многопролетных и нерегулярных рам. Результаты также показали, что использование линейной комбинации первых шести форм потери устойчивости с положительными амплитудами является простым и в то же время консервативным подходом к заданию геометрических несовершенств. Таким образом, вывод исследования заключается в том, что применяемый метод, использующий первые шесть форм потери устойчивости в качестве несовершенств, которые должны быть выбраны в качестве наихудшего сценария, обеспечивает минимальное значение несущей способности рамы. Однако данный подход выглядит применимым только для плоскостных задач.

Для сварных пластинчатых конструкций исследование комбинации несовершенств представлено в работах [28, 29], где сделан вывод, что для трапецевидных ребер жесткости всегда следует учитывать местные несовершенства. Пренебрежение местными несовершенствами формы ребер жесткости приводит к завышению жесткости пластин.

Для сварных колонн коробчатого сечения комбинации несовершенств, касающиеся изгибной формы потери устойчивости элемента и местной потери устойчивости пластин (частей) сечения, были исследованы в работе [30]. Исследование показало, что всегда безопаснее использовать полные значения как глобальных, так и локальных несовершенств, что приводит к снижению несущей способности в среднем на 3–4 % по сравнению с наиболее точным решением.

Обобщая результаты исследований [27 - 30], можно рекомендовать следующие варианты комбинаций несовершенств:

– консервативная линейная суперпозиция эквивалентных несовершенств, относящихся к различным группам (например, несовершенство рамы, несовершенство элемента или несовершенство сечения), т.е. каждое несовершенство следует брать с максимальной амплитудой и линейно суммировать. Это наиболее безопасное решение, соответствующее современному уровню знаний.

– линейная суперпозиция эквивалентных несовершенств и геометрических несовершенств, относящихся к различным группам. Например, амплитуда (значение) эквивалентного несовершенства элемента может быть уменьшена до значения геометрического несовершенства $L/1000$ или до значения допуска на изготовления, в комбинации с эквивалентными несовершенствами формы сечения и/или частей сечения (местными).

– для комбинации несовершенств в пределах одной группы рекомендуется снижать значения несовершенств. Назначается доминирующее (ведущее) несовершенство со 100% значением, а сопутствующее несовершенство со значением, уменьшенным до 70%. Каждое несовершенство по очереди выбирается в качестве ведущего несовершенства, а остальные принимаются в качестве сопутствующих несовершенств. Это правило также может применяться для комбинаций одного типа несовершенства, если одно и то же несовершенство должно быть приложено к разным частям конструкции (или разных пластин сечения). Например, несовершенство местной потери устойчивости поперечного сечения может быть приложено как к стенке, так и к полкам, а их комбинация (в том числе в смысле направлений приложения) должна относиться к ситуации, приводящей к наименьшему значению несущей способности.

Формализовать варианты комбинаций несовершенств можно с помощью следующего выражения:

$$\sum H = \{H_{\text{экр},p,0} + \sum H_{\text{экр},p,i} \cdot 0.7\} + \{H_{\text{экр},эл,0} + \sum H_{\text{экр},эл,i} \cdot 0.7\} + \{H_{\text{экр},с,0} + \sum H_{\text{экр},с,i} \cdot 0.7\}, \quad (1)$$

где $H_{\text{экр},p,0}$ – доминирующее эквивалентное несовершенство рамы; $H_{\text{экр},p,i}$ – сопутствующее эквивалентное несовершенство рамы; $H_{\text{экр},эл,0}$ – доминирующее эквивалентное несовершенство элемента; $H_{\text{экр},эл,i}$ – сопутствующее эквивалентное несовершенство элемента; $H_{\text{экр},с,0}$ – доминирующее эквивалентное несовершенство сечения; $H_{\text{экр},с,i}$ – сопутствующее эквивалентное несовершенство сечения;

Каждое несовершенство обычно может быть приложено в двух направлениях, поэтому, если направление несовершенства, приводящее к наименьшему значению несущей способности, не очевидно, следует провести анализ с использованием несовершенств с различными направлениями и оценить их влияние на несущую способность. Исследуя влияние направлений несовершенств на предельное значение несущей способности, следует также проверить, является ли приложенное несовершенство физически возможным. Физически возможные формы несовершенств в первую очередь зависят от процесса изготовления конструкции. Поэтому необходимо знать технологию производства, чтобы избежать физически невозможных форм несовершенств. В противном случае рекомендуется исследовать все комбинации несовершенств.

Выводы

На основании аналитического обзора технической литературы и нормативных документов применительно к исследованиям и нормированию несовершенств стальных конструкций можно сделать следующие выводы:

– исходя из природы источников начальных несовершенств в стальных конструкциях обычно выделяют следующие виды несовершенств: геометрические несовершенства, структурные (остаточные напряжения) несовершенства и конструкционные несовершенства;

– для задания форм и амплитуд геометрических и эквивалентных несовершенств не существует единых регламентированных подходов, однако существующие результаты исследований позволяют отразить существенные тенденции и зависимости для задания несовершенств в численных моделях. Форма геометрических несовершенств может быть задана на основании: измеренных форм, предопределенных форм (функций), масштабированных форм упругой потери устойчивости и форм отказа. Наиболее предпочтительным является задание форм на основании масштабированных форм упругой потери устойчивости. Значение геометрических несовершенств может быть назначено исходя из следующих соображений: фактически измеренное значение несовершенства, значение равное 80% от допусков на изготовление и монтаж, максимальное значение допуска на изготовление и монтаж. Амплитуда (значение) эквивалентного несовершенства может быть принята на основе предопределенных значений, которые определены на основании калибровки численных моделей по экспериментальным данным. В статье для каждой из групп эквивалентных несовершенств представлены результаты наиболее актуальных исследований;

– моделирование остаточных напряжений является наиболее неопределенным из-за зависимости от форм сечения и технологии изготовления, однако ряд исследований доказывает возможность учета остаточных напряжений посредством эквивалентных несовершенств;

– геометрические и эквивалентные несовершенства разделяют на группы, которые связаны с проверками устойчивости и с правилами комбинаций несовершенств: несовершенства строительной конструкции (каркаса), несовершенства элементов, несовершенства поперечных сечений, пластинчатых конструкций (включая ребер жесткости и несовершенства пластин), несовершенства оболочечных конструкций. В статье предложено несколько вариантов возможных комбинаций несовершенств с позиции форм, направлений и значений несовершенств в зависимости от рассматриваемых групп несовершенств.

В качестве дальнейших исследований большой интерес представляют калибровки значений эквивалентных несовершенств для частных случаев практического применения и с последующей регламентацией в нормативных документах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Graciano C., Ayestarán A. Steel plate girder webs under combined patch loading, bending and shear // *Journal of Constructional Steel Research*. 2013. Vol. 80. P. 202–212. DOI: 10.1016/j.jcsr.2012.09.018.
2. Kövesdi B., Alcaine J., Dunai L., Braun B. Interaction behaviour of steel I-girders Part I: Longitudinally unstiffened girders // *Journal of Constructional Steel Research*. 2014. Vol. 103. P. 327–343. DOI: 10.1016/j.jcsr.2014.06.018.
3. Kövesdi B., Alcaine J., Dunai L., Braun B. Interaction behaviour of steel I-girders; part II: Longitudinally stiffened girders // *Journal of Constructional Steel Research*. 2014. Vol. 103. P. 344–353. DOI: 10.1016/j.jcsr.2014.06.017.
4. Nadolski V., Marková J., Podymako V., Sykora M. Pilot numerical analysis of resistance of steel beams under combined shear and patch loading // *Proceedings of conference Modelling in Mechanics 2022, Ostrava*, 26-27

- May 2022. Ostrava.; VSB - Technical University of Ostrava, Faculty of Civil Engineering, Fakulta stavební, 2021, p. 21-29.
5. Kovacevic S., Markovic N., Sumarac D., Salatic R. Influence of patch load length on plate girders. Part II: Numerical research // *Journal of Constructional Steel Research*. 2019. Vol. 158. P. 213–229. DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.03.025.
 6. Sinur F., Beg D. Moment–shear interaction of stiffened plate girders—Tests and numerical model verification // *Journal of Constructional Steel Research*. 2013. Vol. 85. P. 116–129. DOI: 10.1016/j.jcsr.2013.03.007.
 7. Надольский В.В. Расчет и конструирование фланцевого соединения элементов прямоугольного сечения, подверженных центральному растяжению // *Вестник Полоцкого государственного университета*. 2018. № 16. С. 121–130.
 8. Надольский В.В. Параметры численных моделей несущей способности для стальных элементов // *Строительство и реконструкция*. 2023. № 1(1). С. 43–56. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-105-1-43-56.
 9. Надольский В. В., Вихляев А.И. Оценка несущей способности балок с гофрированной стенкой методом конечных элементов при действии локальной нагрузки // *Вестник МГСУ*. 2022. Т. 17. Вып. 6. С. 693–706. DOI: 10.22227/1997-0935.202.
 10. Надольский В. В., Подымако В.И. Оценка несущей способности стальной балки методом конечных элементов при совместном действии локальных и сдвиговых усилий // *Строительство и реконструкция*. 2022. №2 (100). С.26-43.
 11. Кужава З. Статистическая оценка случайных неправильностей реальных центрально сжатых стержней // *Строительная механика и расчёт сооружений*. 1982. №5. с.61-62.
 12. Шапиро В.Д. Статистическое исследование начальных искривлений при заводском изготовлении стальных стропильных ферм // В кн.: *Проблемы надёжности в строительном проектировании*. Свердловск. 1972. С.268-273.
 13. Корчак М.Д. О влиянии начальных искривлений пояса на устойчивость решетчатого стержня // *Совершенствование и развитие норм проектирования стальных строительных конструкций: Сб. науч. тр. ЦНИИСКА им. Кучеренко*. Москва. 1981. С. 119 - 127.
 14. Броуде Б.М., Моисеев В.И. Устойчивость прямоугольных пластинок с упругим защемлением продольных сторон // *Строительная механика и расчет сооружений*. 1982. № 1. с. 39 - 42.
 15. Белый Г.И., Стегачев П.Б. Пространственное деформирование несущая способность сжатых стержней стальных ферм, имеющих начальные геометрические несовершенства // *Металлические конструкции и испытание сооружений*. 1982. С. 66-75.
 16. Горев В.В., Путилин В.М. О несущей способности и деформативности сжатых сквозных стержней // *Строительная механика и расчет сооружений*. 1976. № 3. С. 34 - 37.
 17. Грудев И.Д., Симон Н.Ю. Расчёт зон пластичности при сжатии первоначально искривлённого стержня // *Известия ВУЗов. Строительство и архитектура*. 1984. №7. С.27-30.
 18. Schmidt H. Stability of steel shell structures: General report // *Journal of Constructional Steel Research*. 2000. Vol. 55(1-3). P. 159-181.
 19. Somodi B., Kövesdi B. Residual stress measurements on welded square box-sections using steel grades of S235-S960 // *Thin-Walled Structures*. 2018. Vol. 123. P. 142-154. DOI: 10.1016/j.tws.2017.11.028..
 20. ECCS TC8, Ultimate limit state calculation of sway frames with rigid joints. Publication No. 33, 1984.
 21. Rasmussen K.J.R., Hancock G.J. Plate slenderness limits for high strength steel sections // *Journal of Constructional Steel Research*. 1992. Vol. 23. P. 73–96. DOI: 10.1016/0143-974X(92)90037-F.
 22. Ban H., Shi G., Shi Y., Wang Y. Overall buckling behavior of 460MPa high strength steel columns: Experimental investigation and design method // *Journal of Constructional Steel Research*. 2012. Vol. 74. P. 140–150. DOI: 10.1016/j.jcsr.2012.0.
 23. Ban H., Shi G., Shi Y., Bradford M.A. Experimental investigation of the overall buckling behaviour of 960 MPa high strength steel columns // *Journal of Constructional Steel Research*. 2013. Vol. 88. P. 256–266. DOI: 10.1016/j.jcsr.2013.05.015.
 24. Pavlovčič L., Froschmeier B., Kuhlmann U., Beg D. Finite element simulation of slender thin-walled box columns by implementing real initial conditions // *Advances in Engineering Software*. 2012. Vol. 44(1). P. 63–74. DOI: 10.1016/j.adv.
 25. Cruise R.B., Gardner L. Residual stress analysis of structural stainless steel sections // *Journal of Constructional Steel Research*. 2008. Vol. 64(3). P. 352–366. DOI: 10.1016/j.jcsr.2007.08.001.
 26. Degée H., Detzel A., Kuhlmann U. Interaction of global and local buckling in welded RHS compression members // *Journal of Constructional Steel Research*. 2008. Vol. 64(7-8). P. 755-766. DOI: 10.1016/j.jcsr.2008.01.032.
 27. Arrayago I., Rasmussen K.J.R. Influence of the imperfection direction on the ultimate response of steel frames in advanced analysis // *Journal of Constructional Steel Research*. 2022. Vol. 190. Paper 107137. Doi: 10.1016/j.jcsr.2022.107.
 28. Timmers R. Influence of the imperfection shapes on the collapse mechanisms of stiffened plates with class 4 trapezoidal stiffeners // *Proceedings of the 8th International Conference on Coupled Instabilities in Metal Structures*, Lodz University of Technology, Poland, July 12-14, 2021. DOI:10.2139/ssrn.3867313.

29. Timmers R., Lener G. Collapse mechanisms and load–deflection curves of unstiffened and stiffened plated structures from bridge design // *Thin Walled Structures*. 2016. Vol. 106. P. 448–458. DOI: 10.1016/j.tws.2016.05.020.

30. Radwan M., Kövesdi B. Equivalent geometrical imperfections for local and global interaction buckling of welded square box section columns // *Structures*. 2023. Vol. 48. P. 1403–1419. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.01.045.

REFERENCES

1. Graciano C., Ayestarán A. Steel plate girder webs under combined patch loading, bending and shear. *Journal of Constructional Steel Research*. 2013. Vol. 80. P. 202–212. DOI: 10.1016/j.jcsr.2012.09.018.
2. Kövesdi B., Alcaine J., Dunai L., Braun B. Interaction behaviour of steel I-girders Part I: Longitudinally unstiffened girders. *Journal of Constructional Steel Research*. 2014. Vol. 103. P. 327–343. DOI: 10.1016/j.jcsr.2014.06.018.
3. Kövesdi B., Alcaine J., Dunai L., Braun B. Interaction behaviour of steel I-girders; part II: Longitudinally stiffened girders. *Journal of Constructional Steel Research*. 2014. Vol. 103. P. 344–353. DOI: 10.1016/j.jcsr.2014.06.017.
4. Nadolski V., Marková J., Podymako V., Sykora M. Pilot numerical analysis of resistance of steel beams under combined shear and patch loading. *Proceedings of conference Modelling in Mechanics 2022*, Ostrava, 26–27 May 2022. Technical University of Ostrava, Faculty of Civil Engineering, Fakulta stavební. 2021, p. 21–29.
5. Kovacevic S., Markovic N., Sumarac D., Salatic R. Influence of patch load length on plate girders. Part II: Numerical research. *Journal of Constructional Steel Research*. 2019. Vol. 158. P. 213–229. DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.03.025.
6. Sinur F., Beg D. Moment–shear interaction of stiffened plate girders—Tests and numerical model verification. *Journal of Constructional Steel Research*. 2013. Vol. 85. P. 116–129. DOI: 10.1016/j.jcsr.2013.03.007.
7. Nadol'skij V.V. Raschet i konstruirovaniye flancevogo soedineniya elementov pryamougol'nogo secheniya, podverzhennykh central'nomu rastyazheniyu [Calculation and design of the flange connection of rectangular cross-section elements subject to central tension]. *Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta*. 2018. № 16. S. 121–130. (rus)
8. Nadol'skij V.V. Parametry chislennykh modeley nesushchej sposobnosti dlya stal'nykh elementov [Parameters of numerical models of bearing capacity for steel elements] *Stroitel'stvo i rekonstrukciya*. 2023. № 1(1). S. 43–56. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-105-1-43-56. (rus)
9. Nadol'skij V. V., Vihlyayev A.I. Ocenka nesushchej sposobnosti balok s gof-rirovannoj stenкой metodom konechnykh elementov pri deystvii lokal'noj nagruzki [Assessment of the bearing capacity of beams with a corrugated wall by the finite element method under local load] *Vestnik MGSU*. 2022. T. 17. Vyp. 6. S. 693–706. DOI: 10.22227/1997-0935.202. (rus)
10. Nadol'skij V. V., Podymako V.I. Ocenka nesushchej sposobnosti stal'noj balki metodom konechnykh elementov pri sovmestnom deystvii lokal'nykh i sdvigovykh usilij [Assessment of the bearing capacity of a steel beam by the finite element method under the combined action of local and shear forces] *Stroitel'stvo i rekonstrukciya*. 2022. №2 (100). S.26–43. (rus)
11. Kuzhava Z. Statisticheskaya ocenka sluchajnykh nepravil'nostej real'nykh central'no szhatykh sterzhnej [Statistical evaluation of random irregularities of real centrally compressed rods]. *Stroitel'naya mekhanika i raschyot sooruzhenij*. 1982. №5. s.61–62. (rus)
12. SHapiro V.D. Statisticheskoe issledovanie nachal'nykh iskrivlenij pri zavodskom izgotovlenii stal'nykh stropil'nykh ferm [Statistical study of initial curvatures in the factory manufacture of steel trusses]. V kn.: *Problemy nadyozhnosti v stroitel'nom proektirovanii*. Sverdlovsk. 1972. S.268–273. (rus)
13. Korchak M.D. O vliyaniy nachal'nykh iskrivlenij poyasa na ustojchivost' re-shetchatogo sterzhnya [On the effect of the initial curvature of the belt on the stability of the lattice rod] *Sovershenstvovanie i razvitie norm proektirovaniya stal'nykh stroitel'nykh konstrukcij*: Sb. nauch. tr. CNIISKa im. Kucherenko. Moskva. 1981. S. 119 - 127. (rus)
14. Broude B.M., Moiseev V.I. Ustojchivost' pryamougol'nykh plastinok s uprugim zashchemleniem prodol'nykh storon [Stability of rectangular plates with elastic clamping of longitudinal sides] *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenij*. 1982. № 1. s. 39 - 42. (rus)
15. Belyj G.I., Stegachev P.B. Prostranstvennoe deformirovaniye nesushchaya spo-sobnost' szhatykh sterzhnej stal'nykh ferm, imeyushchih nachal'nye geometricheskie neso-vershenstva [Spatial deformation bearing capacity of compressed rods of steel trusses having initial geometric irregularities] *Metallicheskie konstrukcii i ispytanie sooruzhenij*. 1982. S. 66–75. (rus)
16. Gorev V.V., Putilin V.M. O nesushchej sposobnosti i deformativnosti szha-tykh skvoznykh sterzhnej [On the bearing capacity and deformability of compressed through rods] *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenij*. 1976. № 3. S. 34 - 37. (rus)

17. Grudev I.D., Simon N.YU. Raschyot zon plastichnosti pri szhatii pervona-chal'no iskrivlyonnogo sterzhnya [Calculation of plasticity zones under compression of a initially curved rod] *Izvestiya VUZov. Stroitel'stvo i arhitektura*. 1984. №7. S.27-30. (rus)
18. Schmidt H. Stability of steel shell structures: General report . *Journal of Constructional Steel Research*. 2000. Vol. 55(1-3). P. 159-181.
19. Somodi B., Kövesdi B. Residual stress measurements on welded square box-sections using steel grades of S235-S960 . *Thin-Walled Structures*. 2018. Vol. 123. P. 142-154. DOI: 10.1016/j.tws.2017.11.028.
20. ECCS TC8, Ultimate limit state calculation of sway frames with rigid joints. Publication No. 33, 1984.
21. Rasmussen K.J.R., Hancock G.J. Plate slenderness limits for high strength steel sections . *Journal of Constructional Steel Research*. 1992. Vol. 23. P. 73–96. DOI: 10.1016/0143-974X(92)90037-F.
22. Ban H., Shi G., Shi Y., Wang Y. Overall buckling behavior of 460MPa high strength steel columns: Experimental investigation and design method . *Journal of Constructional Steel Research*. 2012. Vol. 74. P. 140–150. DOI: 10.1016/j.jcsr.2012.0.
23. Ban H., Shi G., Shi Y., Bradford M.A. Experimental investigation of the overall buckling behaviour of 960 MPa high strength steel columns . *Journal of Constructional Steel Research*. 2013. Vol. 88. P. 256–266. DOI: 10.1016/j.jcsr.2013.05.015.
24. Pavlovčič L., Froschmeier B., Kuhlmann U., Beg D. Finite element simulation of slender thin-walled box columns by implementing real initial conditions . *Advances in Engineering Software*. 2012. Vol. 44(1). P. 63–74. DOI: 10.1016/j.adv.
25. Cruise R.B., Gardner L. Residual stress analysis of structural stainless steel sections . *Journal of Constructional Steel Research*. 2008. Vol. 64(3). P. 352–366. DOI: 10.1016/j.jcsr.2007.08.001.
26. Degée H., Detzel A., Kuhlmann U. Interaction of global and local buckling in welded RHS compression members . *Journal of Constructional Steel Research*. 2008. Vol. 64(7-8). P. 755-766. DOI: 10.1016/j.jcsr.2008.01.032.
27. Arrayago I., Rasmussen K.J.R. Influence of the imperfection direction on the ultimate response of steel frames in advanced analysis . *Journal of Constructional Steel Research*. 2022. Vol. 190. Paper 107137. Doi: 10.1016/j.jcsr.2022.107.
28. Timmers R. Influence of the imperfection shapes on the collapse mechanisms of stiffened plates with class 4 trapezoidal stiffeners . Proceedings of the 8th International Conference on Coupled Instabilities in Metal Structures, Lodz University of Technology, Poland, July 12. 14, 2021. DOI:10.2139/ssrn.3867313.
29. Timmers R., Lener G. Collapse mechanisms and load–deflection curves of unstiffened and stiffened plated structures from bridge design . *Thin Walled Structures*. 2016. Vol. 106. P. 448–458. DOI: 10.1016/j.tws.2016.05.020.
30. Radwan M., Kövesdi B. Equivalent geometrical imperfections for local and global interaction buckling of welded square box section columns . *Structures*. 2023. Vol. 48. P. 1403-1419. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.01.045.

Информация об авторе:

Надольский Виталий Валерьевич

УО «Брестский государственный технический университет» (БрГТУ), г. Брест, Республика Беларусь, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технологии строительного производства» и доцент кафедры «Строительных конструкций», Белорусский национальный технический университет (БНТУ), г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: nadolskiyv@mail.ru

Information about author:

Nadolski Vitali V.

Brest State Technical University, Brest, Belarus, candidate of technical science (PhD), docent, associated professor of the department of Building constructions, and Associate Professor of the Department of Building Structures, Belarusian National Technical University (BNTU), Minsk, Republic of Belarus
E-mail: nadolskiyv@mail.ru

О.А. СИМАКОВ¹, В.А. НЕЩАДИМОВ¹¹ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
г. Москва, Россия

ПРОЕКТИРОВАНИЕ УСИЛЕНИЯ КАМЕННОЙ КЛАДКИ ОДНОСТОРОННИМИ АППЛИКАЦИЯМИ ИЗ ТОРКРЕТ-БЕТОНА

Аннотация. Несущие конструкции из каменной кладки достаточно распространены в том числе в сейсмоопасных районах и зонах, в которых проводились боевые действия. При этом имеющиеся модели кладки, а также технологии усиления в основном ориентированы либо на усиление с целью повышения несущей способности, либо восстановление поврежденных при эксплуатации, фактически статических нагрузок, конструкций. Комплексные методики восстановления, а также модели усиленной кладки, получившей повреждения в результате сейсмических или минно-взрывных воздействий, по большей части не ориентированы на массовое применение и подразумевают в основном перекладку разрушенных участков. В месте с тем имеется необходимость в адаптации существующих высокотехнологичных методик усиления конструкций из каменной кладки под массовое применение с учетом последних наработок в области материаловедения. Наиболее оптимальным вариантом усиления по мнению авторов оказалось применение односторонних аппликаций из торкрет-бетона. Для данного метода была определена и описана модель усиленной каменной кладки с целью проведения расчетного обоснования и разработана комплексная методика расчета и проектирования применительно в том числе к несущим конструкциям многоэтажных зданий. На основании лабораторных исследований было обосновано конструктивное решение по креплению аппликаций только за счет сил адгезии к поверхности базовой кладки. Указанная комплексная методика прошла адаптацию на реальных объектах многоэтажных зданий с несущими стенами из каменной кладки.

Ключевые слова: торкрет-бетон, каменная кладка, усиление, восстановление.

O.A. SIMAKOV¹, V. A. NESHCHADIMOV¹¹National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

DESIGN OF MASONRY STRENGTHENING WITH ONE-SIDED SHOTCRETE APPLICATIONS

Abstract. Load-bearing masonry is quite widespread, including in earthquake-prone areas and zones in which military operations were carried out. At the same time, the existing treasure models, as well as reinforcement technologies, are mainly focused either on strengthening in order to increase the load-bearing capacity, or on restoring structures damaged during operation, actually static loads. Complex retrofitting methods, as well as models of reinforced masonry that have been damaged as a result of seismic or mine-explosive impacts, for the most part are not focused on mass use and imply mainly the re-laying of destroyed areas. At the same time, there is a need to adapt existing high-tech methods of strengthening masonry structures for mass use, taking into account the latest developments in the field of materials science. The most optimal variant of reinforcement, according to the authors, was the use of single-sided shotcrete applications. For this method, a model of reinforced masonry was defined and described in order to carry out a calculation justification and a comprehensive calculation and design methodology was developed, including for load-bearing multi-storey buildings structures. On the basis of laboratory studies, a constructive solution for fixing applications was justified only due to the forces of adhesion to the surface of the base masonry. The specified complex technique was adapted on real objects of multi-storey buildings with load-bearing masonry walls.

Keywords: shotcrete-concrete, masonry, reinforcement, restoration.

Введение

Каменная кладка как материал несущих конструкций применяется в течение значительного периода времени, включая сегодняшние дни, массового применения железобетона и стали. Таким образом, к настоящему моменту сформировался значительный фонд зданий, с несущими конструкциями из каменной кладки. Проводя анализ работ, посвященных оценке, зданий с теми или иными конструктивными схемами и материалами несущих конструкций, а также результатов повреждений данных конструкций [1, 2], можно сделать вывод о наличии значительного количества зданий с несущими конструкциями из каменной кладки, расположенные как в сейсмоопасных районах, так и в зонах, в которых проводились боевые действия. Вполне логично, что часть указанных зданий имеют повреждения несущих конструкций, требующих восстановления необходимого уровня несущей способности.

С целью восстановления нормативного технического состояния необходимо точное представление как о механизмах работы конструкции до повреждения, так и в процессе разрушения. Основные механизмы разрушения каменной кладки несущих конструкций зданий определены и хорошо описаны [3-7]. В общем виде можно выделить следующие сценарии разрушения при действии:

1. Сдвигающих усилий в плоскостях, параллельных горизонтальному шву;
2. Сдвигающих усилий перпендикулярных горизонтальному шву;
3. Растягивающих напряжений перпендикулярных горизонтальному шву (по неперевязанному сечению кладки);
4. Растягивающих напряжений, действующих параллельно горизонтальному шву (по перевязанному сечению кладки).

Указанные механизмы характерны для случаев превышения несущей способности конструкций из каменной кладки, в особенности при действии статических нагрузок. В то же время следует выделить отдельные механизмы разрушения и повреждения кладки, связанные с последствиями динамических воздействий (в основном сейсмические и минно-взрывные воздействия). Характерной чертой результатов данных воздействий является нарушение адгезионного взаимодействия между базовыми материалами кладки и между элементами, соответственно меняется механизм работы конструкции – наиболее подходящая модель в данном случае соответствует модели В.Э. Вильдемана, Г.Г. Кашеваровой, О.В. Кабанцева «каменная кладка как кусочно-однородный разномодульный композит с разрывными полями адгезионного взаимодействия элементов композита» [4, 5, 8-9].

Особенностью ранее проведенных исследований и разработанных методик усиления в основном являлись решения по усилению каменных конструкций с целью повышения несущей способности в том числе при сейсмических воздействиях, а не восстановлению каменной кладки получившей повреждения в результате динамических воздействий (как правило, восстановление разрушенной кладки в ходе статических воздействий выполняется путем перекладки отдельных фрагментов или конструкций). Особенности восстановления каменной кладки, получившей повреждения в результате динамических воздействий, теоретически описаны, но отсутствует четкая методика расчета, а также необходимый опыт.

Усиливаемые конструкции из каменной кладки

Характерные повреждения каменной кладки в результате различных динамических воздействий (сейсмические и минно-взрывные воздействия) представлены на рис. 1.

Как ранее было отмечено, особенностью результатов минно-взрывных воздействий является нарушение адгезионного взаимодействия между базовыми материалами кладки, выражающиеся в:

- расслоении кладки;
- объемном трещинообразовании высокой интенсивности.



Рисунок 1 - Характерные повреждения кладки в результате сейсмических и минно-взрывных воздействий

В этой связи необходимо восстановление монолитности каменной кладки с целью дальнейшей надежной работы при статических нагрузках.

Одним из вариантов усиления является хорошо зарекомендовавший в течение более 100 лет метод односторонних аппликаций из торкрет-бетона. К настоящему моменту основной областью использования данного метода применительно к каменной кладке является:

- устройство односторонних аппликаций с целью усиления кладки по критериям главных растягивающих напряжений;
- устройство встроенных пилонов и ребер жесткости (выполняются железобетонные конструкции, фактически снимающие нагрузки с кладки).

Вместе с тем, проведенные аналитические и лабораторные исследования [10 – 15] показали как достаточный уровень адгезии торкрет-бетона к базовому материалу кладки, так и достаточный уровень надежности работы усиленной конструкции. Необходима проверка на срез по механизмам, обеспечивающим совместность работы аппликации и кладки: адгезия; разрушение по материалу основания; разрушение по микрошпонке в горизонтальном кладочном шве).

В этой связи обоснованным решением по восстановлению конструкций из каменной кладки, получивших повреждения в результате динамических воздействий, может являться односторонняя аппликация из торкрет-бетона по схеме на рис. 2.

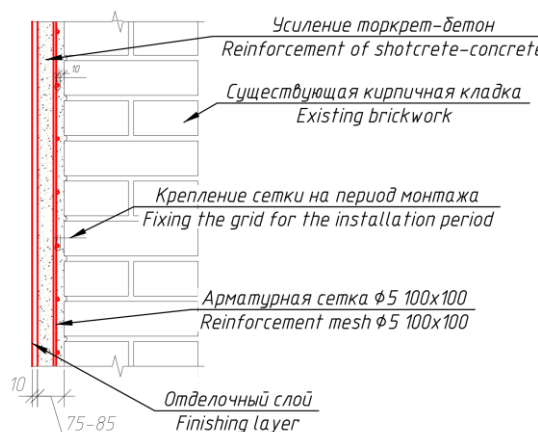


Рисунок 2 - Восстановление каменной кладки односторонней аппликацией из торкрет-бетона

Моделирование усиления конструкций из каменной кладки

Рассматриваемая методика моделирования усиления каменной кладки торкрет-бетоном должна включать следующие основные этапы переходной расчетной ситуации (период усиления конструкции):

- разгрузка каменной кладки путем снятия временных нагрузок;
- установка временных опор (возможно дополнительное разгружение кладки);

- усиление кладки торкрет-бетоном (догружение конструкции);
- работа усиленной каменной кладки, догружение ранее снятых нагрузок (демонтаж временных опор).

В соответствии с требованиями Российского законодательства важным аспектом расчета усиления реальных зданий и сооружений является учет изменения НДС с учетом сложившегося в конструкциях НДС и этапности проведения работ, что требует учета в методике расчетного обоснования.

При проведении работ по усилению разработан следующий порядок производства работ:

Этап 1. Частичная разгрузка вертикальных несущих конструкций путем максимально возможного снижения нагрузок (установка временных конструкций под перекрытия);

Этап 2. Демонтаж разрушенных участков кладки (с дальнейшим восстановлением путем перекладки), при расслоении конструкции демонтаж наружной версты

Этап 3. Усиление локальных наиболее нагруженных участков примыкания стен.

Этап 4. Устройство односторонних аппликаций из торкрет-бетона.

Этап 5. Демонтаж временных конструкций опор начиная с верхних этажей.

В общем виде данные этапы можно представить графически для многоэтажного здания – рис. 3.

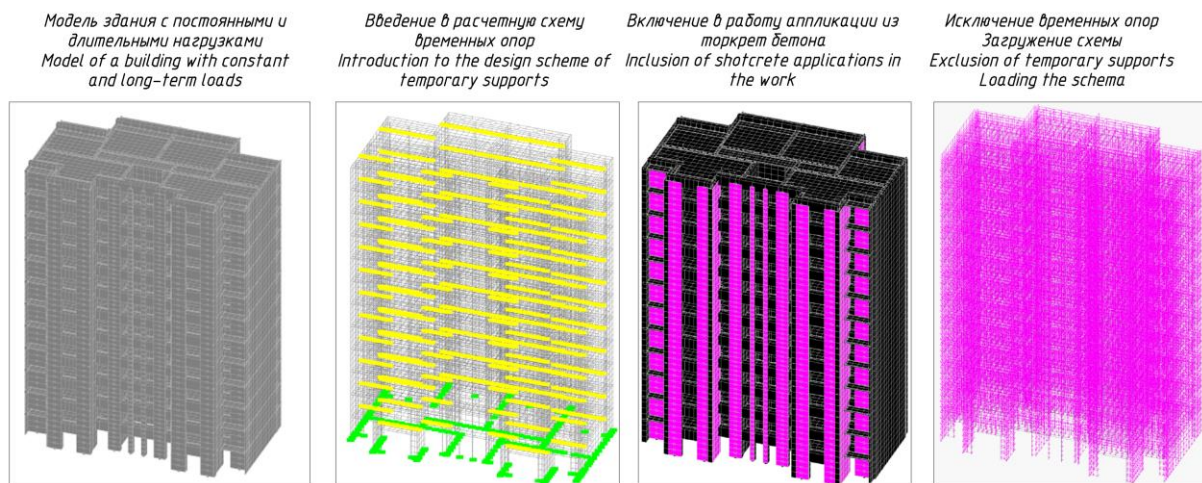


Рисунок 3 - Этапы проведения работ по усилению несущих конструкций многоэтажного здания

Вместе с тем, необходимо отметить несоответствие численного моделирования методом конечных элементов каменной кладки действующим Российским стандартам, в частности СП 15.13330. В соответствии с принятыми в нормах методиками моделирование и последующий анализ каменной кладки, представленной пластинчатыми и объемными элементами, невозможен. В этой связи необходима инженерная методика расчета усиления каменной кладки, адаптированная к действующим нормам.

Инженерная методика расчета

Расчет внецентренно сжатых неармированных элементов каменных конструкций производится в соответствии с требованиями Российского стандарта в области проектирования конструкций из каменной кладки СП 15.13330 по формуле (1):

$$N \leq m_g \varphi_1 R A_c \omega, \quad (1)$$

где ω – коэффициент, определяемый в общем виде по формуле (2) для всех видов кладки:

$$\omega = 1 + \frac{e_0}{2\gamma} \leq 1,45, \quad (2)$$

A_c – площадь сжатой части рассматриваемого сечения элемента из каменной кладки. При этом учитывается равномерное распределение напряжений по сечению, а также

приложение рассматриваемой продольной силы в центре тяжести данной сжатой зоны. Положение границы сжатой зоны (h_c) определяется в общем виде по формуле (3)

$$A_c = A \left(1 - \frac{e_0}{y} \right), \quad (3)$$

где A – площадь сечения элемента каменной кладки;

R – расчетное сопротивление сжатию каменной кладки определяем в соответствии с положениями действующего стандарта в области проектирования конструкций из каменной кладки – СП 15.13330;

φ_1 – усредненный коэффициент продольного изгиба определяемые по формуле (4).

$$\varphi_1 = \frac{\varphi_c + \varphi}{2}, \quad (4)$$

где φ_c и φ – коэффициенты продольного изгиба для сжатой части сечения и всего сечения, определяемые по фактической высоте элемента H по таблицам СП 15.13330.

m_g – коэффициент, учитывающий влияние расчетной продольной силы N_g от длительной нагрузки, действующей с эксцентриситетом e_g .

Для экспресс-проверки несущей способности внецентренно сжатого элемента каменной кладки прямоугольного сечения можно воспользоваться формулой (5), полученной из формул (1) - (4) при $m_g = 1$ и $y = \frac{h}{2}$ с учетом положений стандарта в области нормирования надежности строительных конструкций - ГОСТ 27751-2014:

$$N \leq \frac{Rb(\varphi_c + \varphi)(h - 2e_0)(h + e_0)}{2h\gamma_n}, \quad (5)$$

где b и h – размеры поперечного сечения элемента каменной кладки, (h – ширина (высота) сечение в плоскости действия изгибающего момента от действия продольной силы N с эксцентриситетом e_0);

γ_n – коэффициент надежности по ответственности, принимаемый в зависимости от класса сооружений по ГОСТ 27751-2014.

Если условие (5) не выполняется - требуется усиление элемента каменной кладки, в том числе методом торкретирования. Определить толщину торкретбетона в предположении его работы на растяжение можно по формуле:

$$h_b \geq \frac{NR_{bt}h^2\gamma_n}{R^2bm_g\varphi_1(h - 2e_0)(h + e_0)} - \frac{R_{bt}h}{R} \quad (6)$$

или

$$h_b \geq \frac{2NR_{bt}h^2\gamma_n}{R^2b(\varphi_c + \varphi)(h - 2e_0)(h + e_0)} - \frac{R_{bt}h}{R},$$

при $m_g = 1$.

Проверка несущей способности усиленного торкрет-бетоном элемента каменной кладки выполняется по формулам (1) – (4) для приведенного расчетного сечения, показанного на рисунке рис. 4:

$$A = bh + b_{red}h_b, \quad (7)$$

где b_{red} – приведённая ширина торкретбетона относительно его расчетной прочности на сжатие или на растяжение по отношению к расчетной прочности каменной кладки на сжатие, определяемая по формуле (8).

$$b_{red} = \frac{R}{R_b}. \quad (8)$$

Здесь и далее $R_b = R_{bt}$ при $h_c \leq h$ или $R_b = R_{bn}$ при $h_c > h$ – расчетное сопротивление торкретбетона на растяжение или на сжатие, соответственно.

Таким образом, для выполнения поверочного расчета необходимо в первую очередь определить на растяжении или на сжатие будет работать торкретбетон. Для этой цели необходимо найти центр тяжести приведенного сечения y в предположении, что торкретбетон будет работать на растяжение по формуле (9) и эксцентриситет приложения продольной нагрузки e_0 относительно этого центра тяжести.

$$y = \frac{h_b^2 b_{red} + 2hb_{red}h_b + bh^2}{2b_{red}h_b + 2bh} = \frac{Rh_b^2 + 2Rhh_b + R_{bt}h^2}{2Rhh_b + 2R_{bt}h}, \quad (9)$$

где y – расстояние до центра тяжести сечения элемента в сторону эксцентриситета от сжатого его края;

h и b – размеры расчетного простенка каменной кладки;

h_b – толщина торкретбетона определенная по формуле (6).

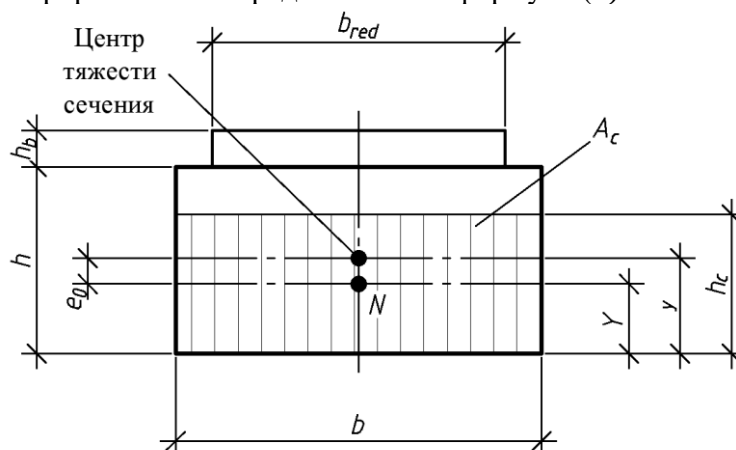


Рисунок 4 - Расчетная схема поперечного сечения каменной кладки, усиленной торкрет бетоном с внешней стороны

Продольная сила N с эксцентриситетом e_0 относительно центра тяжести приведенного сечения определяются в процессе сбора нагрузок в уровне расчетного сечения каменной кладки по формулам (10-11):

$$N = \sum F_i, \quad (10)$$

$$e_0 = y - Y, \quad (11)$$

где F_i – расчетная нагрузка от собственного веса торкретбетона и каменной кладки, и от междуэтажных перекрытий и конструкций кровли, расположенных выше расчетного сечения;

Y – расстояние до продольной силы N от сжатого края, которое определяется по формуле (12):

$$Y = \frac{\sum F_i y_i}{N}; \quad (12)$$

y_i – расстояние до продольной нагрузки F_i от сжатого края сечения элемента.

В большинстве случаев при усилении внецентренно сжатых каменных элементов стен с внешней стороны торкретбетон будет работать на растяжение и выполняется условие (13):

$$h > h_c = \frac{A \left(1 - \frac{2e_0}{h+h_b} \right)}{b} = \frac{Rh_b + R_{bt}h - 2Re_0}{R_{bt}} - \frac{2he_0(R_{bt} - R)}{R_{bt}(h + h_b)}. \quad (13)$$

Более точно h_c определяется по формуле (14):

$$h_c = \frac{A \left(1 - \frac{e_0}{y} \right)}{b} = \frac{Rh_b + R_{bt}h - 2Re_0}{R_{bt}} - \frac{2he_0(R_{bt} - R)(2Rh_b + R_{bt}h)}{R_{bt}(Rh_b^2 + 2Rhh_b + R_{bt}h^2)}. \quad (14)$$

Условие обеспечения прочности (1) с учетом формул (2) – (11), принимает следующий вид:

$$N \leq \frac{m_g \varphi_1 R b (R h_b + R_{bt} h) (y - e_0) (2y + e_0)}{2 R_{bt} y^2 \gamma_n}, \quad (15)$$

где m_g и φ_1 – коэффициенты, определяемые по формулам по СП 15.13330.

Условие прочности (15) с учетом формул положений СП 15.13330 может быть представлено в развернутой форме:

$$N \leq \frac{-0,5 R b (\varphi_c + \varphi) (h [\eta K_N - 1] + 1,2 \eta K_N e_g) (R h_b + R_{bt} h) (y - e_0) (y + 0,5 e_0)}{R_{bt} h y^2 \gamma_n}, \quad (16)$$

где $K_N = \frac{N_g}{N}$ – коэффициент длительной части расчетной нагрузки N_g действующей на расчетное сечение с эксцентриситетом e_g ;

При малых значениях расчетной продольной силы N_g ею можно пренебречь. В этом случае коэффициент $m_g=1$, а условие (15) примет вид (17):

$$N \leq \frac{R b (\varphi_c + \varphi) (R h_b + R_{bt} h) (y - e_0) (2y + e_0)}{4 R_{bt} y^2 \gamma_n}. \quad (17)$$

Для экспресс-оценки несущей способности внецентренно сжатого элемента каменной кладки, усиленной торкретбетоном, достаточно определить площадь сжатой зоны каменной кладки A_c по формуле

$$A_c = A \left(1 - \frac{2e_0}{h + h_b} \right) = \frac{b(R h_b + [R_{bt} h - 2R e_0])}{R_{bt}} - \frac{2b h e_0 (R_{bt} - R)}{R_{bt} (h + h_b)}, \quad (18)$$

или по более точной формуле

$$A_c = A \left(1 - \frac{e_0}{y} \right) = \frac{b(R h_b + [R_{bt} h - 2R e_0])}{R_{bt}} - \frac{2b h e_0 (R_{bt} - R) (2R h_b + R_{bt} h)}{R_{bt} (R h_b^2 + 2h h_b + R_{bt} h^2)}, \quad (19)$$

и воспользоваться формулой (1) с коэффициентом γ_n или упрощенной формулой:

$$N \leq \frac{R A_c}{1,1 \gamma_n}. \quad (20)$$

Оценка несущей способности элементов каменной кладки в процессе и после проведения мероприятий по их усилению торкретированием.

Напряженно-деформированное состояние каменная кладка в разные периоды проведения мероприятий по её усилению методом торкретирования существенно меняется, что определяет необходимость оценки, несущей способности элементов каменной кладки на всех этапах усиления.

В этой связи оценочные расчеты тесно связаны с технологией усиления элементом каменной кладки торкретированием, которая предусматривает следующие этапы восстановительных работ:

Максимальную разгрузку междуэтажных перекрытий с устройством разгрузочных подпорных стоек вдоль несущих стен с внутренней стороны на всю высоту здания;

Очистка нарушенной версты с наружной стороны каменной кладки с уменьшением размеров её поперечного сечения;

Нанесение торкретбетона на очищенную поверхность каменной кладки торкретбетона, который увеличит нагрузку на каменную кладку в период его нанесения;

Демонтаж разгрузочных подпорных стоек несущих стен после набора требуемой прочности торкретбетона с последующим загрузением междуэтажных перекрытий полезной нагрузкой.

На первом этапе восстановительных работ необходимо оценить общее техническое состояние здания с целью обеспечения безопасности проведения восстановительных работ. Данные оценки выходят за рамки настоящих рекомендаций.

Для выполнения второго и третьего этапов восстановительных работ необходимо определить минимальную толщину элементов каменной кладки, которая обеспечит несущую способность наиболее нагруженных элементов при действующих пониженных нагрузках и нагрузок от торкретбетона на этапе его нанесения на стены с наружной стороны.

Для обеспечения совместной работы каменной кладки и торкретбетона необходимо оценить разность напряжений в каменной кладке на границе сжатой зоны, которая возникнет после набора прочности торкретбетона, демонтажа подпорных стоек и нагружения стен полезной нагрузкой.

Толщина элементов каменной кладки после демонтажа наружной версты должна удовлетворять условию (1). При $m_g=1$ данное условие может принять следующий вид:

$$h \geq \frac{2\varphi_1 R Y^2 b}{3\varphi_1 R Y b - \gamma_n N_{min}}, \quad (21)$$

где Y – расстояние до продольной силы N_{min} от сжатого края, определяемое в общем случае по формуле (12) или по формуле (22).

$$Y = \frac{F_p h_p + F_b h_b + h(F_k + 2F_b)}{2N_{min}}, \quad (22)$$

$N_{min} = F_p + F_b + F_k$ – минимальная нагрузка, определенная с учетом максимальной разгрузки междуэтажных перекрытия и определенной по формуле (6) толщине торкретбетона;

F_p – суммарная пониженная нагрузка со всех междуэтажных плит перекрытий с шириной опирания на стену h_p , а также с нагрузка с мауэрлата кровли опиранием на стену как у плит перекрытия;

F_b – суммарная расчетная нагрузка от веса торкретбетона толщиной h_b

F_k – расчетная нагрузка от веса каменной кладки толщиной h .

φ_1 – коэффициент определяется по формуле (4), в которой принимается $\lambda_{hc} = \frac{H}{h_c} = \frac{H}{2Y}$.

В сжатой зоне каменной кладке на момент включения в работу торкретбетона будет сформированы следующие напряжения

$$\sigma_{min} = \frac{N_{min}}{2Yb} = \frac{N_{min}^2}{b(F_p h_p + F_b h_b + h[F_k + 2F_b])}. \quad (23)$$

Аналогичным образом определяются напряжения в каменной кладке после демонтажа разгрузочных подпорных стоек несущих стен и нагружением междуэтажных перекрытий полезной нагрузкой.

$$\sigma = \frac{N}{2Yb} = \frac{N^2}{b(F_p' h_p + F_b h_b + h[F_k + 2F_b])} \quad (24)$$

$N = F_p' + F_b + F_k$ – расчетные нагрузки на элемент каменной кладки;

F_p' – суммарная расчетная нагрузка со всех междуэтажных плит перекрытий с шириной опирания на стену h_p , а также с нагрузка с мауэрлата кровли опиранием на стену как у плит перекрытия.

Напряжение сжатой зоны каменной кладки не должно превышать, расчетное сопротивление сжатию каменной кладки R определенное в соответствии с требованиями действующих норм - СП 15.13330.

$$R \geq \sigma. \quad (25)$$

Зная напряжения в сжатой зоне каменной кладки до и после включения в работу торкретбетона можно определить приращения напряжений по формуле:

$$\Delta\sigma = \sigma - \sigma_{min}, \quad (26)$$

а также разность напряжений на границе сжатой зона Y , которое не должно превышать предел прочности кирпича при изгибе

Технология проведения работ по усилению конструкций

На данный момент по предложенной методике выполнено усиление каменной кладки несущих конструкций ряда объектов, в том числе, расположенных на присоединенных территориях – г. Мариуполь (рис. 5).



Рисунок 5 - Расчетная схема поперечного сечения каменной кладки, усиленной торкрет бетоном с внешней стороны

Работы были проведены в полном соответствии с предложенной методикой, включающей:

- максимальную разгрузку вертикальных конструкций (в том числе установку временных опор под перекрытия);
- демонтаж отслоившейся наружной версты кладки, восстановление разрушенных участков конструкций;
- устройство внешних аппликаций из торкрет-бетона;
- демонтаж временных стоек в соответствии с разработанной программой.

По результатам проведения работ предложенная технология показала высокую эффективность.

Выводы

По результатам проведенных исследований, результаты которых представлены в статье, можно сформулировать основные положения по моделированию и расчету усиления несущих конструкций из каменной кладки, имеющих дефекты и повреждения, методом устройства односторонних аппликаций из торкрет-бетона:

1. Применение торкрет-бетона для усиления несущих конструкций из каменной кладки является эффективным и обоснованным решением, не требующим дополнительных специальных мероприятий по устройству специальных связей с базовым материалом кладки (достаточный уровень обеспечивается силами адгезии торкрет-бетона к базовому материалу кладки и микрошпоночными сдвиговыми соединениями).

2. Моделирование усиления конструкций, в особенности вертикальных конструкций многоэтажных зданий, следует выполнять с учетом сложившегося в существующих конструкциях НДС и этапов проведения работ по усилению конструкций.

3. Расчет конструкций каменной кладки с односторонней внешней аппликаций возможно выполнять по разработанным и приведенным в статье инженерным методикам, в полной мере соответствующим действующим нормативным документам.

4. Предложенная технология усиления каменной кладки показала высокую технологичность и эффективность на реальных экспериментальных объектах, получивших повреждения несущих конструкций из каменной кладки в результате минно-взрывных воздействий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кабанцев О.В., Тонких Г. П. и др. Пособие по оценке сейсмостойкости и сейсмоусилению общежитий зданий с несущими стенами из каменной кладки. Москва: 26 ЦНИИ МО РФ, 2002.
2. Симаков О.А. Анализ факторов, вызывающих необходимость усиления железобетонных конструкций // Строительство и реконструкция. 2019. №1. С.76-84. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2019-81-1-76-84>
3. Кабанцев О.В. Прочность и деформативность каменной кладки при двухосном напряженном состоянии // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 7, С. 16–23.
4. Kabantsev O. V. Дискретная модель каменной кладки в условиях двухосного напряженного состояния // Вестник ТГАСУ. 2015. № 4. С. 113–134.
5. Кабанцев О.В., Тамразян А.Г. Моделирование упруго-пластического деформирования каменной кладки в условиях двухосного напряженного // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, 2015. № 3. Т. 11. С. 87–100.
6. Kabantsev, O.V. Modeling Nonlinear Deformation and Destruction Masonry under Biaxial Stresses. Part 1. Masonry as Simulation Object // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 725-726. Pp. 681-696
7. Kabantsev O. Modeling Nonlinear Deformation and Destruction Masonry under Biaxial Stresses. Part 2. Strength Criteria and Numerical Experiment Object // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 725-726. Pp. 808-819.
8. Вильдеман В.Э., Соколкин Ю.В., Ташкинов А.А. Механика неупругого деформирования и разрушения композиционных материалов. М. : Наука, 1997. 228 с.
9. Кашеварова Г.Г., Зобачева А.Ю., Дубинский С.И. Моделирование процесса разрушения кирпичной кладки зданий в натурных и численных экспериментах // Строительная механика и расчет сооружений. 2011. №1. С. 69-73.
10. Тонких Г.П., Кабанцев О.В., Симаков О.А., Симаков А.Б., Баев С.М., Панфилов П. С. Экспериментальные исследования сейсмоусиления каменной кладки наружными бетонными аппликациями // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2011. № 2. С.35-42. EDN: QCWDBZ
11. Кабанцев О.В., Тонких Г.П., Симаков О.А., Симаков А.Б., Баев С.М. Повышение сейсмостойкости каменных конструкций односторонними аппликациями из торкрет-бетона //Аэропорты. Прогрессивные технологии. 2011. №2. С. 26-32. EDN: TSQAKV
12. Кабанцев О. В., Симаков О. А., Нещадимов В. А., Штырлов Д. А. Усиление несущих стен из каменной кладки поврежденных многоэтажных зданий // Промышленное и гражданское строительство. 2023. № 7. С. 29-35. doi: 10.33622/0869-7019.2023.07.29-35
13. Maheri M.R., Najafgholipour M.A., Zarandi S. Seismic rehabilitation of URM heritage-listed Namazi school building using multiple retrofitting techniques // Journal of Building Engineering. 2023. Volume 79. 15 November 2023. 107782. <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.107782>
14. Rezaee S.R.S., Soltani M., Nikooravesh M. Cyclic in-plane behavior of unreinforced and confined masonry walls retrofitted by shotcrete: Experimental investigation // Engineering Structures Volume 264, 1 August 2022, 114432/ <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114432>
15. Aminulai H.O., Baiguera M., Crump D.A., Sextos A., Kashani M.M. Experimental qualification of seismic strengthening of URM buildings in Nepal // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2023. Volume 173. October 2023. 108130. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2023.108130>

REFERENCES

1. Kabantsev O. V, Tonkich G.P., etc. The Grant according to seismic stability and to seismic-strengthening the general armies buildings with bearing walls from a stone laying. Moscow, 26 TSNII MO the Russian Federation, 2002.
2. Simakov O.A. Analysis of factors causing the need for strengthening of reinforced concrete constructions. *Building and Reconstruction*. 2019. No.1. Pp. 76-84. (In Russ.) <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2019-81-1-76-84>
3. Kabantsev O. V. Strength and deformability of masonry under biaxial stress state. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and Civil Engineering]*, 2016, no. 7, pp. 16–23. (In Russian)
4. Kabantsev O. V. A discrete model of masonry under conditions of biaxial stress state. *Vestnik of TSUAB*. 2015. no. 4. Pp.113–134. (In Russian).
5. Kabantsev O. V., Tamrazyan A. G. Modeling of elastic-plastic deformation of masonry under conditions of biaxial stress state. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2015. Iss. 3. Vol. 11. Pp. 87–100. (In Russian).

6. Kabantsev, O.V. Modeling Nonlinear Deformation and Destruction Masonry under Biaxial Stresses. Part 1. Masonry as Simulation Object. *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 725-726. Pp. 681-696
7. Kabantsev O. Modeling Nonlinear Deformation and Destruction Masonry under Biaxial Stresses. Part 2. Strength Criteria and Numerical Experiment Object. *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 725-726. Pp. 808-819.
8. Vil'deman V. E., Sokolkin Yu. V., Tashkinov A. A. Mekhanika neuprugogo deformirovaniya i razrusheniya kompozitsionnykh materialov [Mechanics of inelastic deformation and fracture of composite materials]. Moscow, Nauka Publ., 1997. 228 p. (In Russian)
9. Kashevarova G. G., Zobacheva A. Yu. Modeling of process of destruction of brickwork. *PNRPU Construction and Architecture Bulletin*. 2010. no. 1. Pp. 106–116. (In Russian).
10. Tonkikh G. P., Kabantsev O. V., Simakov O. A., Simakov A. B., Baev S. M., Panfilov P. S. Experimental study of seismic strengthening of masonry exterior concrete applications. *Seysmostoykoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzheniy*. 2011. no. 2. Pp. 35–42. (In Russian).
11. Tonkikh G.H., Simakov O.A., Kabantsev O.V., Bayev S.M., Experimental studies of masonry aseismic reinforcement using external concrete applications *Seysmostoykoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenij*, 2011. No. 2. Pp: 35-41 (In Russian)
12. Kabancev O. V., Simakov O. A., Neshchadimov V. A., SHtyrlov D. A. Usilenie nesushchih sten iz kamennoj kladki povrezhdennykh mnogoetazhnykh zdaniy [Reinforcement of Bearing Masonry Walls of Damaged Multi-Storey Buildings]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and Civil Engineering]*. 2023. No. 7. Pp. 29-35. doi: 10.33622/0869-7019.2023.07.29-35 (In Russian)
13. Maheri M.R., Najafgholipour M.A., Zarandi S. Seismic rehabilitation of URM heritage-listed Namazi school building using multiple retrofitting techniques. *Journal of Building Engineering*. 2023. Volume 79. 15 November 2023. 107782. <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.107782>
14. Rezaee S.R.S., Soltani M., Nikooravesh M. Cyclic in-plane behavior of unreinforced and confined masonry walls retrofitted by shotcrete: Experimental investigation. *Engineering Structures*. 2022. Volume 264, 1 August 2022. 114432/ <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114432>
15. Aminulai H.O., Baiguera M., Crump D.A., Sextos A., Kashani M.M. Experimental qualification of seismic strengthening of URM buildings in Nepal. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2023. Volume 173. October 2023. 108130. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2023.108130>

Информация об авторе:

Симаков Олег Александрович

Национальный Исследовательский Московский Государственный Строительный Университет, г. Москва, Россия,

кандидат технических наук, доцент кафедры Железобетонных и каменных конструкций.

E-mail: simakov-ne@mail.ru

Нешчадимов Виктор Александрович

Национальный Исследовательский Московский Государственный Строительный Университет, г. Москва, Россия,

кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры Железобетонных и каменных конструкций.

E-mail: 5059119@mail.ru

Information about author:

Simakov Oleg A.

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures.

E-mail: simakov-ne@mail.ru

Neshchadimov V. A.

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,

Candidate of Technical Sciences, assistant professor of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures.

E-mail: 5059119@mail.ru

М.Ю. ТРОШИН¹, А.В. ТУРКОВ¹, А.В. ЗАЕВ¹¹ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г. Орел, Россия

ВЛИЯНИЕ ШАГА ДОСОК В ПОПЕРЕЧНОМ СЛОЕ НА ДЕФОРМАТИВНОСТЬ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В ТРЕХСЛОЙНОЙ CLT-ПАНЕЛИ, ЖЕСТКО ЗАЩЕМЛЕННОЙ С ДВУХ СТОРОН

Аннотация. Плиты из древесины перекрестно клееной, или CLT-панели, изготавливаются путем склеивания накрест нескольких слоев досок, что обеспечивает их высокой несущей способностью и устойчивостью на изгиб. Помимо количества слоев в панели, на деформативность и несущую способность оказывают влияние геометрические параметры плиты, состав и способ крепления слоев друг к другу, способ опирания конструкции и т.д. Ввиду того, что материал не так давно стал применяться в строительстве, многие вопросы остаются малоизученными, а потому существует возможность и необходимость оптимизировать некоторые аспекты как в самих CLT-панелях, так и в способе их взаимодействия с другими строительными конструкциями. В настоящей статье было изучено влияние шага досок в поперечном слое на деформативность и распределение напряжений в трехслойной CLT-панели, жестко защемленной с двух сторон. Были проведены численные исследования методом конечных элементов (МКЭ) с использованием вычислительного комплекса SCAD+. Расчетная модель плиты в настоящем исследовании представляет собой составную ортотропную пластину с жесткими связями между слоями. Результатом исследования являются числовые данные, отражающие зависимость распределения нормальных напряжений OX и OY и поперечной деформации плиты от шага ламелей (досок) в поперечном слое. Также получены проекции расчётной модели с изополями нормальных напряжений на растянутом и сжатом слое плиты. Это позволяет выделить общие закономерности распределения напряжений и изменения деформаций при вариации геометрических параметров при данном виде опирания для использования их при проектировании строительных конструкций с применением плит из древесины перекрестно клееной, или CLT-панелей, а также при оптимизации конструкции с целью увеличения эффективности затрат ресурсов.

Ключевые слова: деревянные конструкции, CLT-панели, древесина, распределение напряжений, прогиб, составные пластины.

M.YU. TROSHIN¹, A.V. TURKOV¹, A.V. ZAEV¹¹Oryol State University named after I.S. Turgenev, Oryol, Russia

THE EFFECT OF THE PITCH OF THE BOARDS IN THE TRANSVERSE LAYER ON THE DEFORMABILITY AND STRESS DISTRIBUTION IN A THREE-LAYER CLT PANEL RIGIDLY CLAMPED ON BOTH SIDES

Abstract. CLT panels are made by gluing several layers of boards crosswise, which provides them with high load-bearing capacity and bending resistance. In addition to the number of layers in the panel, the deformability and bearing capacity are influenced by the geometric parameters of the plate, the way the layers are attached to each other, the way the structure is supported, etc. Due to the fact that the material has recently been used in construction, many issues remain poorly understood, and therefore there is an opportunity and need to optimize some aspects both in the CLT panels themselves and in the way they interact with other building structures.

In this article, the influence of the pitch of boards in the transverse layer on the deformability and stress distribution in a three-layer CLT panel rigidly pinched on both sides was studied. Numerical studies of the finite element method (FEM) were carried out using the computing complex SCAD+. The computational model of the plate in this study is a composite orthotropic plate with rigid connections between the layers. The result of the study is numerical data reflecting the dependence of the distribution of normal stresses O_X and O_Y and the transverse deformation of the plate on the pitch of the lamellae (boards) in the bottom layer. Projections of the computational model with normal stress isofields on the stretched and compressed plate layer are also obtained. This makes it possible to identify general patterns of stress distribution and deformation changes with variations in geometric parameters for this type of support for their use in the design of building structures using CLT panels as well as in the optimization of the structure in order to increase the cost efficiency of resources.

Keywords: timber structures, CLT panels, timber, stress distribution, deflection, composite plates

Введение

Плиты из древесины перекрестно клееной, или CLT-панели, изготавливаются путем склеивания перекрёстно нескольких слоев досок, что обеспечивает их высокую несущую способность при изгибе за счет выраженных анизотропных свойств отдельных слоев и их взаимным расположением [1].

Строительные конструкции с применением плит из древесины перекрестно клееной стали применяться с середины 1990-х в странах западной Европы. Несмотря на это, такие плиты пока не стали широко распространёнными, а ввиду анизотропных свойств и многослойности создается большое количество конструктивных решений самих плит и их креплений к другим конструкциям. В связи с этим, существует необходимость изучения влияния различных видов опирания и изменений в слоях CLT-панели на деформативность и распределение напряжений в плите.

Ранее авторами проводились исследования плит из древесины перекрестно-клееной на деформативность и несущую способность с помощью вычислений с использованием метода конечных элементов (МКЭ), произведенных в SCAD+ [2-4]. В данных расчетах конструкция была смоделирована из объемных конечных элементов. В настоящей статье была смоделирована расчетная схема в виде ортотропной составной пластины, основываясь на исследованиях А.Р. Ржаницына [5]. Также в работах различных авторов изучались соединения [6], нагружения [7-8] и методы расчета [9-14] CLT-панелей.

Целью исследования является оценка влияния шага в поперечном слое плиты, жестко защемленной с двух сторон на распределение напряжений и деформативность в слоях. Результаты исследования позволяют выделить общие закономерности изменения поперечных деформаций и распределения нормальных напряжений в продольных и поперечном слоях трехслойной плиты из древесины перекрестно клееной, жестко защемленной с двух сторон, в зависимости от шага ламелей в поперечном слое.

Материалы и методы

Исследования были проведены в вычислительном комплексе SCAD+. Расчетная схема определена как составная пластина с ортотропными свойствами в перекрестных слоях. Для обеспечения высокой точности вычислений были выбраны пластинчатые КЭ размером 50х50 мм. Связи между слоями представляют собой стержни с очень высокой жесткостью $E_A = 5 \cdot 10^4$ кН во избежание их влияния на прогиб плиты и разделены на два вида: связи сдвига, препятствующие сдвигающим деформациям слоёв, и поперечные связи, не позволяющие сближаться или отдаляться слоям друг от друга. Общий вид КЭ в слоях составной пластинки представлен на рисунке 1.

Плиты жестко заделаны на опорах. Нагружение плиты задается равномерно-распределенной нагрузкой на верхний слой составной пластины равной 2,85 кН/м. Конструкция имеет длину 5890 мм и ширину 1140 мм. Ламели в слоях имеют ширину 190мм

и толщину 42 мм. Расчетная схема представляет собой статически неопределимую балку, изображенную на рисунке 2.



Рисунок 1 – Конечные элементы в слоях составной пластинки в трехслойной CLT-панели

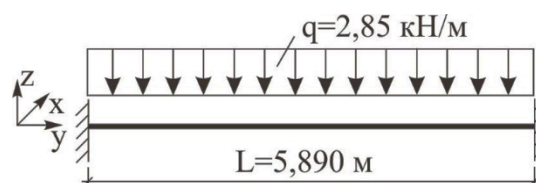


Рисунок 2 – Расчетная схема жестко защемленной CLT панели

CLT-панель является конструкцией с ортотропными свойствами слоёв, поэтому слоям составной пластинки назначены жесткости с различным значением модулей упругости вдоль осей ОХ и ОУ, модуля сдвига и коэффициентов Пуассона, числовые значения которых приняты в соответствии с нормативной документацией СП 64.13330.2017 «Деревянные конструкции»:

1) В продольном направлении: $E_x=4 \times 10^5$ кН/м², $E_y=1 \times 10^7$ кН/м², $G_{xy}=5 \times 10^5$ кН/м², $\nu_{xy}=0,45$, $\nu_{yx}=0,018$.

2) В поперечном направлении: $E_{x90}=1 \times 10^7$ кН/м², $E_{y90}=4 \times 10^5$ кН/м², $G_{xy90}=5 \times 10^5$ кН/м², $\nu_{xy90}=0,018$, $\nu_{yx90}=0,45$.

Результаты и обсуждение

Исследованы трехслойной плиты из перекрестной древесины с продольным расположением досок в наружных слоях (слои 1 и 3 по порядковому номеру) с шагом ламелей 0, 50, 100, 150 мм в поперечном слое (слой 2 по порядковому номеру). Был произведен линейный расчет с точностью контроля 10% в SCAD+, и полученные данные по максимальным прогибам, а также максимальным растягивающим и сжимающим нормальным напряжениям вдоль ОУ и ОХ. Значения вынесены в таблицу 1.

Таблица 1 – Трехслойная плита из древесины перекрестно-клееной с изменяемым шагом ламелей в поперечном слое

Номера исследуемых слоев	Шаг в поперечном слое, мм	u, мм	$\sigma_{хрст.}$, кН/м ²	$\sigma_{хсжат.}$, кН/м ²	$\sigma_{урст.}$, кН/м ²	$\sigma_{усжат.}$, кН/м ²
1,3	0	-4,90	35,40	-35,40	1969,75	-1969,73
	50	-4,95	35,34	-34,55	1969,07	-1924,63
	100	-5,02	35,32	-36,08	1967,96	-2008,53
	150	-5,10	35,27	-34,41	1965,20	-1917,49
2	0	-4,90	29,02	-29,01	39,12	-39,13
	50	-4,95	28,72	-30,04	39,48	-42,19
	100	-5,02	29,66	-28,29	39,64	-35,75
	150	-5,10	33,26	-36,71	41,62	-65,41

По полученным данным построен график зависимости максимального прогиба плиты при изменении расстояния между досками в среднем (поперечном) слое (рисунок 3).

Так же построены графики зависимости растягивающих и сжимающих нормальных напряжений в слоях плиты при изменении шага досок. Анализ данной зависимости позволяет зафиксировать, каким образом распределяются напряжения в теле плиты. Графики изображены на рисунках 4-5.

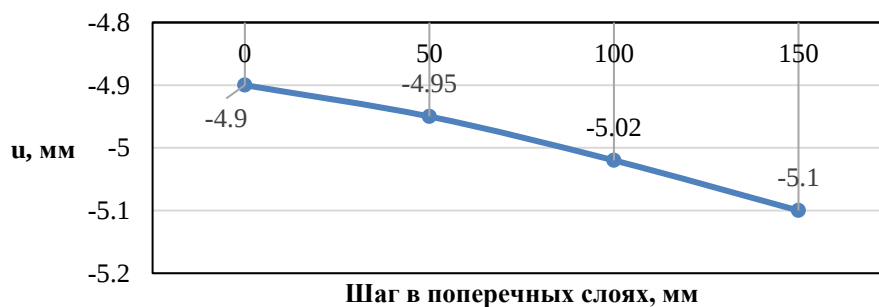


Рисунок 3 – Зависимость максимального прогиба от шага досок в поперечном слое CLT панели при жестком защемлении

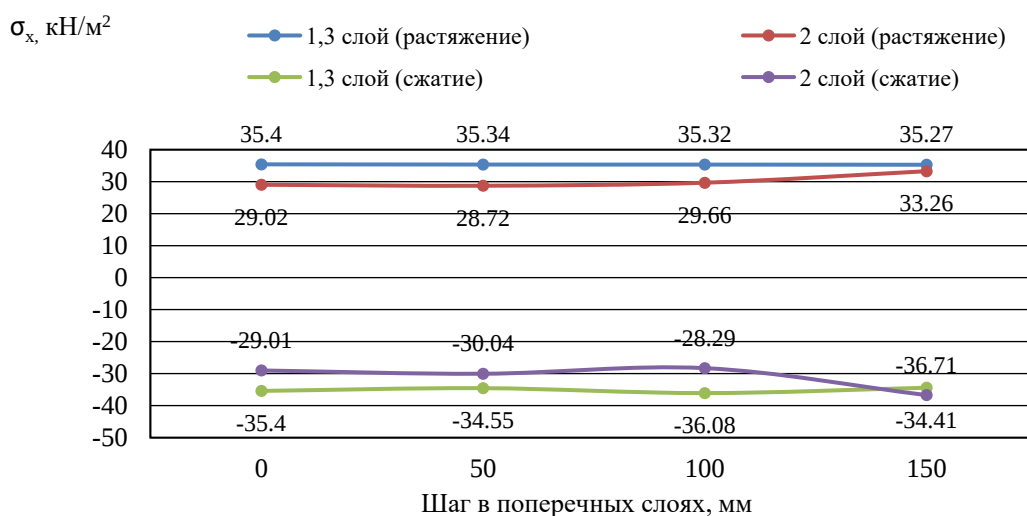


Рисунок 4 – Зависимость растягивающих и сжимающих нормальных напряжений σ_x от шага досок в поперечном слое

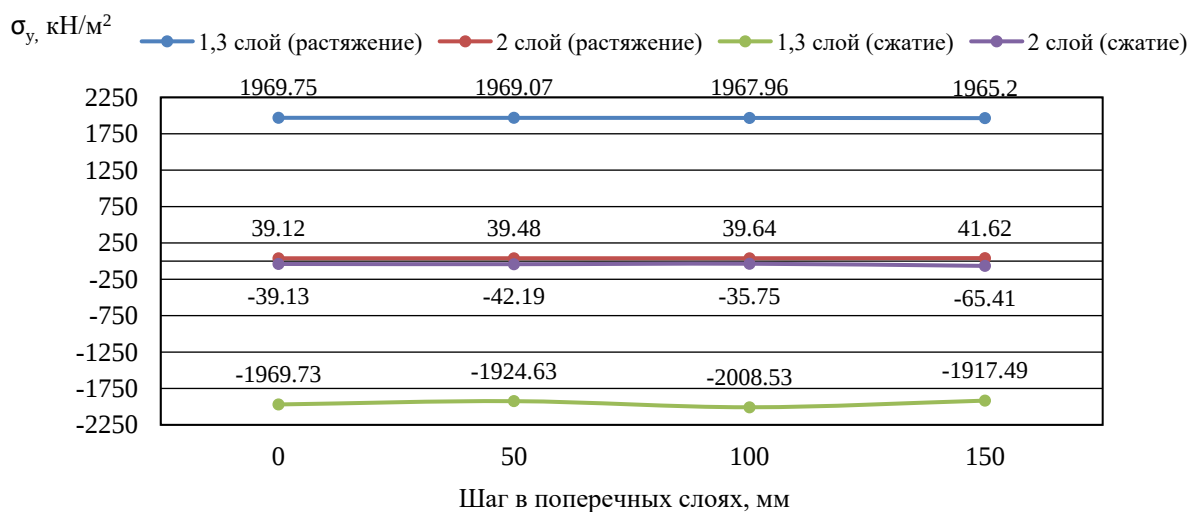


Рисунок 5 – Зависимость растягивающих и сжимающих нормальных напряжений σ_y от шага досок в поперечном слое

Для оценки распределения напряжений в слоях плиты с помощью программного комплекса SCAD+ были получены проекции на плоскость XOY с отображенными изополями напряжений. Ввиду того, что напряжения σ_y значительно выше напряжений σ_x , изополя получены только для σ_y на растянутом и сжатом слое (см. рисунок 6).

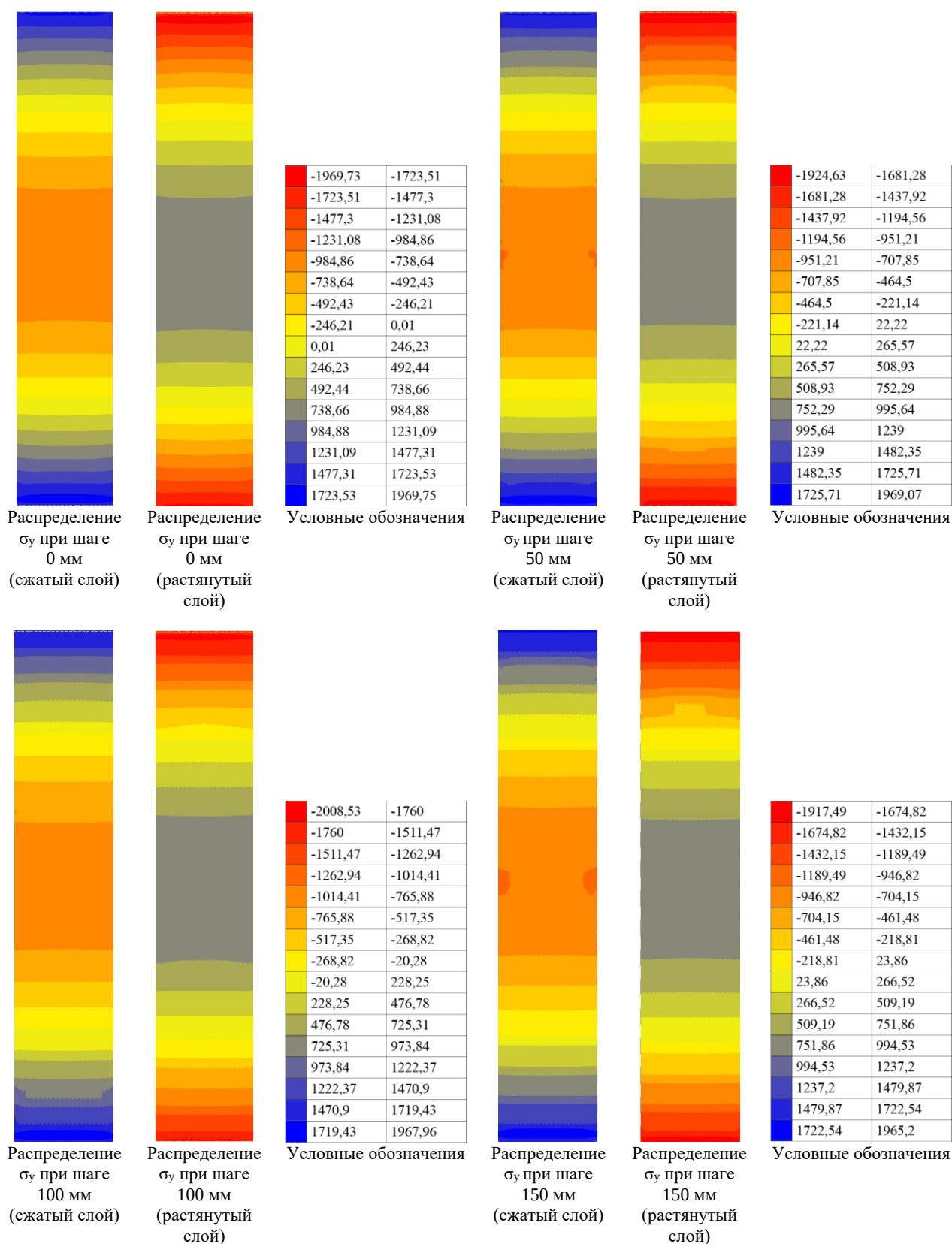


Рисунок 6 – Распределение нормальных напряжений σ_y в зависимости от шага досок в поперечном слое

Выводы

По результатам расчета трехслойной плиты из древесины перекрестно-клееной, смоделированной, жёстко защемленной с двух сторон, при действии статической равномерно-распределенной нагрузки выявлено, что:

- при увеличении расстояний между ламелями в поперечном слое величина прогибов плиты практически не изменялась. Это вызвано малым влиянием шага в среднем слое на момент инерции плиты, а, соответственно, на ее жесткость;
- наибольшие нормальные напряжения вдоль пролёта возникают в слоях с продольным расположением досок (наружные). При этом, шаг досок в среднем слое не оказывает существенного влияния ни на растягивающие, ни на сжимающие значения напряжений;
- при изменении шага досок в поперечном слое вид распределения нормальных напряжений вдоль пролёта практически не изменяется. При этом, наибольшие значения при данном виде опирания регистрируются ближе к опорам;
- нормальные напряжения вдоль пролёта возрастают в поперечном слое с увеличением шага досок, однако величина мала по сравнению с величиной в наружных слоях (разница в 30 раз);
- изменение шага в поперечном слое не оказывает значительного влияния на нормальные напряжения поперёк пролёта в слоях;
- распределение нормальных напряжений поперёк пролёта незначительно меняется с увеличением шага досок в поперечном слое. Максимальные значения при заделках на опорах так же, как и в случае с нормальными напряжениями вдоль пролёта, сосредоточены в месте защемления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ашкенази Е.К. Анизотропия древесины и древесных материалов. М.: Лесная промышленность, 1978. 224 с.
2. Трошин М.Ю., Турков А.В. Влияние шага поперечных слоев на деформативность и распределение напряжений в трехслойных плитах древесины перекрестно-клееной // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации: VII Международная научно-практическая конференция, приуроченная к проведению в Российской Федерации Десятилетия науки и технологий 24-25 ноября 2022 года – Омск, 2022 – С.515-519.
3. Трошин М.Ю., Турков А.В. Влияние толщины поперечных и продольных слоев на деформативность и распределение напряжений в трехслойных плитах древесины перекрестно-клееной // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 3. С. 391–400. <https://doi.org/doi:10.22227/1997-0935.2023.3.391-400>.
4. Трошин М.Ю., Турков А.В. Влияние шага поперечных слоев на деформативность и распределение напряжений в пятислойных плитах древесины перекрестно-клееной. Строительство и реконструкция. 2023;(3):35-41. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2023-107-3-35-41>.
5. Ржаницын А.Р. Составные стержни и пластинки. – Москва: Стройиздат, 1986. – 316 с.
6. Yinlan Shen, Schneider Johannes, Stierner Siegfried F., Xueyong Ren. Failure Modes and Mechanical Properties of Bracket Anchor Connections for Cross-Laminated-Timber // MATEC Web of Conferences 275. 2019. Pp. 1-7. doi:10.1051/mateconf/201927501011.
7. Ioannis P. Christovasilis, Michele Brunetti, Maurizio Follesa, Michela Nocetti, Davide Vassallo. Evaluation of the Mechanical Properties of Cross Laminated Timber with Elementary Beam Theories compression // Engineering Structures. 2016. V. 122. Pp. 202-213. <https://doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.06.082>.
8. Бубис А.А., Гизятуллин И.Р., Хворова А.Н., Петров И.Ю. Особенности поведения древесины перекрёстно-клееной (ДПК/CLT) при статических и динамических нагрузках, моделирующих сейсмические воздействия // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2022. № 2. С. 62-80. <https://doi:10.37153/2618-9283-2022-2-62-80>.
9. Рогожина А.В. Расчет деформативности CLT-панели перекрытия // Инженерный вестник Дона. 2022. № 6. URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_89_5_Rogozhina.pdf_10c4252bae.pdf (дата обращения: 30.11.2023).
10. Филимонов М.А., Смирнов П.Н. Исследования прочностных и упругих характеристик плит из

- древесины перекрестно-клееной (ДПК/CLT) Российского производства // Сейсмическое строительство. Безопасность сооружений. 2022. № 2. С. 81-97. <https://doi:10.37153/2618-9283-2022-2-81-97>.
11. Мамедов Ш.М., Шабикова Е.Г., Нижегородцев Д.В., Казакевич Т.Н. Методика расчета панелей из перекрестно-клееной древесины / Вестник гражданских инженеров. 2020. № 5(82). С. 66-71. <https://doi:10.23968/1999-5571-2020-17-5-66-71>.
 12. Чебыкин А.А., Фрицлер Ю.А., Кудрявцев С.В. Определение расчетных характеристик сечений древесных клееных плит из перекрестных досок // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2017. № 2. С. 83-85. URL:<https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-raschetnyh-harakteristik-secheniy-drevesnyh-kleenyh-plit-iz-perekrestnyh-dosok/viewer> (дата обращения: 28.11.2023).
 13. Погорельцев А.А., Филимонов М.А., Смирнов П.Н. Определение прочностных и упругих характеристик древесины перекрестно клееной (ДПК/CLT) и классификация по классам прочности. М.: Научно-исследовательский центр "Строительство", 2020. 175 с.
 14. Погорельцев А.А., Смирнов П.Н., Филимонов М.А. Проведение исследований по определению несущей способности стеновых панелей и плит перекрытия из древесины перекрестно клееной (ДПК/CLT) и разработка методики. М.: Научно-исследовательский центр "Строительство", 2020. 268 с.
 15. Филатов В.В. К расчету составных пластин по теории А.Р.Ржаницына. // Труды международной научно-технической конф. «Вычислительная механика деформируемого твердого тела». Москва: МИИТ, 2006. Том 2. С. 414-416.
 16. Gagnon, S. and M. Popovski. Structural Design of Cross-Laminated Timber Elements. In: Chapter 3, CLT Handbook. FPInnovations. Québec, Québec, Canada. 2011.
 17. Abejón R., Moya L. Cross-laminated timber: Perspectives from a bibliometric analysis (2006–2018) / Wood Material Science & Engineering. 2021. V.17. Issue 6. Pp. 429-450. <https://doi:10.1080/17480272.2021.1955295>.
 18. Alexander Opazo-Vega, Franco Benedetti, Mario Nuñez-Decap, Nelson Maureira-Carsalade, Claudio Oyarzo-Vera. Non-Destructive Assessment of the Elastic Properties of Low-Grade CLT Panels // Forests. 2021. No. 12. <https://doi.org/10.3390/f12121734>.
 19. Змеев М.В. Определение толщины перекрытия из перекрестно-клееных досок на примере CLT-плит Binderholz (Austria) из условия жесткости // Инженерный вестник Дона. 2020. № 11. URL:http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_35_10_Zmeev.pdf_91b8606af3.pdf (дата обращения: 30.11.2023).
 20. Щелокова Т.Н. Современные тенденции улучшения свойств древесины и деревянных строительных конструкций // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. № 6. С. 39-45. URL: <http://dspace.bstu.ru/bitstream/123456789/1514/1/6.%20Щелокова.pdf> (дата обращения: 27.11.2023).

REFERENCES

1. Ashkenazi E.K. Anizotropiya drevesiny i drevesnyh materialov [Anisotropy of wood and wood materials]. M.: Lesnaya promyshlennost' [Forest industry], 1978. 224 p. (rus)
2. Turkov, A. V., & Troshin, M. Y. (2022). The effect of the step of transverse layers on the deformability and stress distribution in three-layer slabs of cross-laminated timber. *Arkhiturno-stroitel'nyy i dorozhno-transportnyy kompleksy: problemy, perspektivy, innovatsii. Sbornik materialov VII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, priurochennoy k provedeniyu v Rossiyskoy Federatsii Desyatiletia nauki i tekhnologii*, November, 24-25. Omsk, Siberian state automobile and highway university Publ., 515-519 pp. (rus).
3. Troshin, M. Yu., & Turkov, A. V. (2023). The effect of thickness of transverse and longitudinal layers on deformability and stress distribution in three-layer panels made of cross-laminated timber. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*, 18(3), 391-400 pp. <https://doi.org/doi:10.22227/1997-0935.2023.3.391-400>. (rus).
4. Troshin M.Y., Turkov A.V. The effect of the step of transverse layers on the deformability and stress distribution in five-layer slabs of CLT-panels. *Building and Reconstruction*. 2023;(3):35-41. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2023-107-3-35-41/> (rus).
5. Rzhantsyn, A. R. (1986). *Sostavnye sterzhni i plastinki*. Moscow, Stroyizdat Publ., 316 p. (rus).
6. Yinlan Shen, Schneider Johannes, Stierner Siegfried F., Xueyong Ren. Failure Modes and Mechanical Properties of Bracket Anchor Connections for Cross-Laminated-Timber. *MATEC Web of Conferences* 2019. 275. Pp. 1-7. doi:10.1051/mateconf/201927501011
7. Ioannis P. Christovasilis, Michele Brunetti, Maurizio Follesa, Michela Nocetti, Davide Vassallo. Evaluation of the Mechanical Properties of Cross Laminated Timber with Elementary Beam Theories compression. *Engineering Structures*. 2016. V. 122. Pp. 202-213. <https://doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.06.082>.
8. Bubis A.A., Giziattullin I.R., Hvorova A.N., Petrov I.Yu. Osobennosti povedeniya drevesiny perekryostno-kleenoj (DPK/CLT) pri staticheskikh i dinamicheskikh nagruzkah, modeliruyushchih sejsmi-cheskie vozdeystviya [Peculiarities of behavior of cross-laminated timber (CLT) under static and dynamic loads simulating seismic impacts]. *Sejsmicheskoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenij [Earthquake engineering. Construction safety]*.

2022. No. 2. Pp. 62-80. <https://doi:10.37153/2618-9283-2022-2-62-80>. (rus).

9. Rogozhina A.V. Raschet deformativnosti CLT-paneli perekrytiya [Calculation of the deformability of the CLT overlap panel]. *Inzhenernyy vestnik Dona [Engineering Journal of Don]*. 2022, No. 6. URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_89_5_Rogozhina.pdf_10c4252bae.pdf (date of application: 30.11.2023). (rus).

10. Filimonov M. A., Smirnov P.N. Issledovaniya prochnostnyh i uprugih harakteristik plit iz drevesiny perekrestno-kleenoy (DPK/CLT) Rossijskogo proizvodstva [Research of strength and elastic characteristics of russian-made cross laminated timber slabs]. *Seismicheskoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenij [Earthquake engineering. Construction safety]*. 2022, No. 2. 81-97. <https://doi:10.37153/2618-9283-2022-2-81-97> (rus).

11. Mamedov SH.M, SHabikova E.G., Nizhegorodcev D.V., Kazakevich T.N. Metodika rascheta panelej iz perekrestno-kleenoy drevesiny [Method for calculating cross laminated timber panels]. *Vestnik grazhdanskih inzhenerov [Bulletin of civil engineers]*. 2020. No. 5(82). Pp. 66-71. <https://doi:10.23968/1999-5571-2020-17-5-66-71> (rus).

12. Chebykin A.A., Fricler YU.A., Kudryavcev S.V. Opredelenie raschetnyh harakteristik sechenij drevesnyh kleenyyh plit iz pere-krestnyh dosok [Evaluation of cross section design properties for plates from cross laminated timber]. *Akademicheskij vestnik UralNIiproekt RAASN [Academic Bulletin of UralNIiproekt RAASN]*. 2017. No. 2. Pp. 83-85. URL:<https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-raschetnyh-harakteristik-secheniy-drevesnyh-kleenyyh-plit-iz-perekrestnyh-dosok/viewer> (date of application: 28.11.2023). (rus).

13. Pogorel'cev A.A. Opredelenie prochnostnyh i uprugih harakteristik drevesiny perekrestno kleenoy (DPK/CLT) i klassifi-kaciya po klassam prochnosti [Determination of strength and elastic characteristics of cross-glued wood (WPC/CLT) and classification by strength classes] / A.A. Pogorel'cev, M.A. Filimonov, P.N. Smirnov – M.: Nauchno-issledovatel'skij centr "Stroitel'stvo" [Scientific Research Center "Construction"], 2020. 175 p. (rus).

14. Pogorel'cev A.A., Smirnov P.N., Filimonov M.A. Provedenie issledovaniy po opredeleniyu nesushchej sposobnosti stenovyh panelej i plit perekrytiya iz drevesiny perekrestno kleenoy (DPK/CLT) i razrabotka metodiki rascheta [Conducting research to determine the bearing capacity of wall panels and floor slabs made of cross-glued wood (WPC/CLT) and developing a calculation methodology]. Moscow: Nauchno-issledovatel'skij centr "Stroitel'stvo" [Scientific Research Center "Construction"], 2020. 268 p. (rus).

15. Filatov V.V. K raschetu sostavnykh plastin po teorii A.R.Rzhanitsyna [Calculation of composite plates according to the theory of A.R.Zhanitsyn]. *Trudy mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konf. "Vychislitel'naya mekhanika deformiruyemogo tverdogo tela" [Proceedings of the international scientific and technical conf. "Computational mechanics of a deformable solid"]*. Moscow: MIIT, 2006. Vol. 2. Pp. 414-416. (rus).

16. Gagnon S., Popovski M. Structural Design of Cross-Laminated Timber Elements. In: Chapter 3, CLT Handbook. *FPInnovations. Québec, Québec, Canada*. 2011.

17. Abejón R., Moya L. Cross-laminated timber: Perspectives from a bibliometric analysis (2006–2018) / *Wood Material Science & Engineering*. 2021. V.17. Issue 6. Pp. 429-450. <https://doi:10.1080/17480272.2021.1955295>.

18. Alexander Opazo-Vega, Franco Benedetti, Mario Nuñez-Decap, Nelson Maureira-Carsalade, Claudio Oyarzo-Vera. Non-Destructive Assessment of the Elastic Properties of Low-Grade CLT Panels. *Forests*. 2021. No. 12. <https://doi.org/10.3390/f12121734>.

19. Zmeev M.V. Opredelenie tolshchiny perekrytiya iz perekrestno-kleenyyh dosok na primere CLT-plit Binderholz (Austria) iz uslo-viya zhestkosti [Determination of the floor thickness of cross-glued boards on example of CLT-plates Binderholz (Austria)]. *Inzhenernyy vestnik Dona [Engineering Journal of Don]*. 2020. No. 11. URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_35_10_Zmeev.pdf_91b8606af3.pdf (date of application: 30.11.2023). (rus).

20. Shchelokova T.N. Sovremennye tendencii uluchsheniya svoystv drevesiny i derevyannyh stroitel'nyh konstrukcij [Modern trends of improvement of wood properties and wood constructions]. *Vestnik BGTU im. V.G. SHuhova [Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov]*. 2018. No.6. 39-45. URL: <http://dspace.bstu.ru/bitstream/123456789/1514/1/6.%20Шелокова.pdf> (date of application: 27.11.2023). (rus).

Информация об авторах:

Трошин Михаил Юрьевич

ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г. Орёл, Россия, аспирант кафедры строительных конструкций и материалов.
E-mail: mtr997@mail.ru

Турков Андрей Викторович

ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г. Орёл, Россия, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры строительных конструкций и материалов.
E-mail: aturkov@bk.ru

Заев Алексей Владимирович

ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г. Орёл, Россия,
аспирант кафедры строительных конструкций и материалов
E-mail: alexvzj@yandex.ru

Information about authors:

Troshin Mikhail Yr.

Oryol state University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia,
postgraduate student, of the department of Building Structures and Materials
E-mail: mtr997@mail.ru

Turkov Andrey V.

Oryol state University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia,
doctor of technical sciences, associate professor, professor of the department of Building Structures and Materials
E-mail: aturkov@bk.ru

Zaev Alexey V.

Oryol state University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia,
postgraduate student, of the department of Building Structures and Materials
E-mail: alexvzj@yandex.ru

В.И. КОЛЧУНОВ¹, С.Ю. САВИН¹, М.А. АМЕЛИНА¹

¹ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
г. Москва, Россия

УСТОЙЧИВОСТЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ КОЛОННЫ, ПОДВЕРЖЕННОЙ СЖАТИЮ С КРУЧЕНИЕМ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОСОБОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Аннотация. При аварийных ситуациях, связанных с внезапными отказами отдельных несущих элементов конструктивных систем зданий, в силу особенностей объемно-планировочных решений в отдельных колоннах могут дополнительно возникать крутящие моменты. Таким образом, колонны могут оказаться в условиях сложного напряженно-деформированного состояния. Целью данного исследования являлось построение полуквантитативной расчетной модели для анализа устойчивости железобетонных колонн, подверженных сжатию с кручением в результате особого воздействия. Для достижения поставленной цели были сформулированы исходные гипотезы, составлены определяющие соотношения для расчета устойчивости железобетонной колонны, подверженной сжатию с кручением. Для обоснования достоверности предложенной модели была выполнена ее валидация путем сопоставления с результатами моделирования в программном комплексе Ansys. Анализ данных показал, наибольшая разница между результатами составила 8.08% для случая $P = 0.4 \cdot P_{cr,e} = 126.6$ кН. Наименьшая разница 3.6% составила для случая $P = 0.9 \cdot P_{cr,e} = 284.85$ кН. Показано, что по мере роста крутящего момента происходит снижение значения критической силы, вызывающей потерю устойчивости. Это связано как с действием крутящей пары сил при искривлении стержня, так и со снижением механических характеристик бетона при совместном действии нормальных и касательных напряжений.

Ключевые слова: устойчивость, сжатие, кручение, железобетон, колонна, особое воздействие

V.I. KOLCHUNOV¹, S.Y. SAVIN¹, M.A. AMELINA¹

¹National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

STABILITY OF A REINFORCED CONCRETE COLUMN UNDER COMPRESSION WITH TORSION CAUSED BY ACCIDENTAL ACTION

Abstract. Under emergency situations associated with sudden failures of the load-bearing elements of the structure, torques may additionally occur in the columns due to the specifics of the structural design of the buildings. Thus, the columns may be in a complex stress-strain state. The objective of this study was to develop a semi-analytical design model for analysis of the stability of reinforced concrete columns subjected to compression with torsion as a result of an accidental action. For achieving the objective, authors formulated the initial hypotheses, developed the determining equations for calculating the stability of a reinforced concrete column subjected to compression with torsion. To validate the reliability of the proposed model, it has been compared with the results of modeling in the software complex Ansys. Analysis of the data showed that the largest difference between the results was up to 8.08% for the case $P = 0.4 \cdot P_{cr,e} = 126.6$ kN. The smallest difference of 3.6% was for the case $P = 0.9 \cdot P_{cr,e} = 284.85$ kN. It has been shown that as the torque increases, there is a decrease in the value of the critical force causing loss of stability. This is due both to the action of the torsional pair of forces during the distortion of the rod and to the decrease in the mechanical properties of concrete under the combined action of normal and tangential stresses.

Keywords: stability, compression, torsion, reinforced concrete, column, accidental action

Введение

При аварийных ситуациях, связанных с внезапными отказами отдельных несущих элементов конструктивных систем зданий, в силу особенностей объемно-планировочных решений в отдельных колоннах могут дополнительно возникать крутящие моменты. Таким образом, колонны могут оказаться в условиях сложного напряженно-деформированного состояния, в результате чего исходные предпосылки и допущения, используемые для расчета в рамках нелинейной деформационной модели, построенной на использовании диаграмм для одноосного напряженно-деформированного состояния, могут приводить к завышению несущей способности конструкций, а следовательно – снижать уровень механической безопасности конструктивной системы здания или сооружения запроектированных на основе традиционных подходов к расчетному обоснованию.

В результате аварийного воздействия могут реализоваться специфические механизмы сопротивления конструкций, либо могут быть превышены допустимые границы использования упрощенных моделей сопротивления. В связи с этим требуют более глубокого обоснования модели и критерии, используемые при оценке несущей способности отдельных конструкций и живучести сооружения в целом. В частности, при аварийной ситуации допускается переход конструкций перекрытий к механизму сопротивления по типу висячей системы. Рассматривая причины и механизм разрушения Всемирного торгового центра, Bazant et al. [1] отмечали, что начальные механические повреждения от столкновения самолета с сооружением, а также последовавший за этим пожар привели к тому, что перекрытия перешли к вантовому механизму сопротивления. В результате этого перекрытия потянули за собой колонны, что привело к потере их устойчивости. Pham et al. [2] была исследована модель двухпролетной железобетонной рамы на внезапное удаление колонны среднего ряда с переходом ригелей к сопротивлению по типу висячей системы. По результатам испытаний был отмечен разрыв верхней арматуры в опорных сечениях у крайних колонн и нижней арматуры в опорных сечениях у средней колонны, для которой моделировалось внезапное выключение. Также было отмечено разрушение бетона сжатой зоны в колонне крайнего ряда в уровне примыкания к ней ригеля. Это было обусловлено изменением эффективной расчетной длины колонны и дополнительным поперечным воздействием от ригеля после его перехода к работе по типу висячей системы. Таким образом, фундаментальные вопросы, связанные с потерей устойчивости стержней и стержневых систем становятся всё более актуальными в связи с необходимостью обеспечения механической безопасности и живучести конструктивных систем при особых воздействиях.

Устойчивость стержневых элементов в геометрически нелинейной постановке при действии крутящих моментов рассмотрена в работах Лалина В.В. и др. [3]. Исследования, посвященные устойчивости и деформированию стержневых железобетонных конструкций, были проведены В.М. Бондаренко [4], В.С. Фёдоровым [5], Р.С. Санжаровским [6] и др. В работах А.Ю. Солдатова [7] был рассмотрен вопрос об устойчивости железобетонных стержневых конструкций с учётом физической нелинейности. Автором был разработан специальный алгоритм с применением метода конечных элементов, учитывающий внецентренное сжатие, а также ползучесть бетона. В работах В.В. Улитина [8] был проведён анализ устойчивости составных стержней с учетом физической нелинейности материала. Мануйловым, Косицыным и Бегичевым [9] выполнен анализ критериев устойчивости стержневых элементов из упругопластического материала. Р.С. Санжаровский и А.Д. Беглов [10] подробно изучили нелинейную теорию расчёта стержневых железобетонных конструкций на устойчивость при кратковременных и длительных нагрузках. Были проведены аналитические исследования и численные эксперименты, которые позволяют оценить влияние различных видов нелинейности на прочность и устойчивость железобетонных конструкций. А.Г. Тамразяном [11] проведено исследование механизма истощения несущей способности сжатых и внецентренно сжатых железобетонных

элементов. Отмечается, что в ряде случаев потеря устойчивости может быть причиной разрушения как центрально, так и внецентренно сжатых элементов с малыми эксцентриситетами. В статье [12] представлены экспериментальные данные и результаты численного исследования устойчивости железобетонной рамы при внезапном отказе угловой колонны. В качестве критерия потери устойчивости использован критерий отпорности.

Уместно заметить, что в рассмотренных выше работах не учитывалось влияние на устойчивость факторов сложного напряженно-деформированного состояния при сжатии с кручением. Сопротивление железобетонных несущих элементов рамных каркасов зданий при сложном напряженно-деформированном состоянии, вызванном изгибом с кручением, было исследовано в работах Колчунова Вл.И. и др. [13-15]. Авторами построена пространственная поверхность деформаций путем аппроксимации расчетного сечения малыми квадратами. Рассматривается деформационный эффект депланации берегов трещины, описываемый двухконсольным элементом механики разрушения [16]. Принятые гипотезы и построенные на их основе модели были верифицированы авторами путем проведения экспериментальных исследований для балок как из обычного, так и высокопрочного бетона. В результате экспериментального и численного моделирования выявлена особенность трещинообразования в балках из высокопрочного бетона, состоящая в образовании единичной трещины перед разрушением.

Lei et al. [17] выполнили экспериментальные исследования и мезомасштабное численное моделирование влияния размерного эффекта и различного процента поперечного армирования балок из базальтофибробетона на их сопротивление изгибу с учетом действия крутящих моментов. Авторами подтверждено влияние размерного эффекта на несущую способность балок из базальтофибробетона. Также установлено, что с увеличением процента поперечного армирования балок возрастали значения усилий, при которых в элементе образовывались трещины. За счет этого создавалось дополнительное обжатие базальтофибробетона в центральной части сечения. Это в свою очередь приводило к повышению прочности бетона центральной части сечения в условиях трехосного напряженно деформированного состояния.

Схожими с авариями воздействиями при отказе одного из несущих элементов/конструкций по характеру отклика конструктивной системы являются сейсмические воздействия. В работе Deng et al. [18] представлена расчетная модель и результаты экспериментального исследования силового сопротивления железобетонной колонны, подверженной внецентренному сжатию с кручением в результате сейсмического воздействия. Предложенная Deng et al. модель учитывает образование пространственной трещины по спиральной поверхности. Основной эффект от действия крутящего момента, выявленный в экспериментальных исследованиях и численном моделировании состоял в снижении механических характеристик бетона и продольной арматуры.

Chen et al. [19] на основании результатов эксперимента отмечают ухудшение сопротивления железобетонных колонн сейсмическим воздействиям по мере увеличения отношения крутящего момента к изгибающему. При этом диссипация энергии воздействия улучшалась по мере роста продольной силы в колонне. Подобное исследование для модели стеклофибробетонной опоры моста, выполнено Selmy & El-Salakawi [20]. Показано, что при комбинированном действии продольной силы, изгибающих и крутящих моментов крутильная жесткость падает быстрее, чем изгибная, по мере увеличения перемещений/углов закручивания.

На основании представленного краткого обзора состояния исследований можно сделать вывод о том, что до настоящего времени в проводимых исследованиях устойчивости железобетонных конструкций при особых воздействиях не учитывались сложнапряженные состояния, в частности, такие как внецентренное сжатие с кручением.

Поэтому, вопросы, связанные с конструктивной безопасностью железобетонных систем в данном направлении исследования остаётся не полностью раскрытым.

В связи с этим целью данного исследования являлось построение полуаналитической расчетной модели для анализа устойчивости железобетонных колонн, подверженных сжатию с кручением в результате особого воздействия. Для достижения поставленной цели были сформулированы исходные гипотезы, составлены определяющие соотношения для расчета устойчивости железобетонной колонны, подверженной сжатию с кручением. Для обоснования достоверности предложенной модели была выполнена ее валидация путем сопоставления с результатами моделирования в программном комплексе Ansys.

Модели и методы исследования

Исходные предпосылки и допущения

Рассматривается железобетонная колонна, подверженная сжатию с кручением (рис. 1) в результате особого воздействия, вызванной внезапным отказом одного из несущих элементов.



Рисунок 1 – Расчетная схема колонны при действии продольной силы и крутящего момента

В рамках данного исследования приняты следующие исходные допущения и предпосылки.

1) Собственный вес конструкции колонны не учитывается. Это позволяет не учитывать силы инерции в самой колонне при структурной перестройке несущей системы здания, а силы инерции от деформирования конструктивной системы заменить статическим эквивалентом.

2) Параметры эквивалентного воздействия устанавливаются на энергетической основе [21]. В первом приближении предполагается, что коэффициент динамичности к статической нагрузке на колонну составляет 1.3, что близко к верхней границе диапазона согласно исследованиям Алмазова, Расторгуева, Плотникова [22,23] и является более консервативным значением, чем установленное значение 1.25 в экспериментальных исследованиях полномасштабной модели каркаса с

плоскими перекрытиями, выполненных Adam et al. [24].

3) Потеря устойчивости рассматривается с позиции смены формы равновесия упругопластического стержневого элемента (бифуркационный критерий).

4) Рассматривается железобетонный элемент без трещин до момента потери устойчивости.

5) Предполагается, что влияние стесненной деформации на характер распределения нормальных напряжений подчинено принципу Сен-Венана, т.е. ограничивается припорным участком, равным наименьшему размеру поперечного сечения элемента. Следовательно, можно пренебречь влиянием стесненной деформации на удалении от закреплений вплоть до момента потери устойчивости;

6) Разрушение бетона определяется критерием прочности при трехосном напряженно-деформированном состоянии, принятым по теории пластичности бетона и железобетона Г.А. Гениева [25]:

$$\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - (\sigma_x \cdot \sigma_y + \sigma_y \cdot \sigma_z + \sigma_z \cdot \sigma_x) + 3 \cdot (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) - (R_b - R_{bt}) \cdot (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \leq R_b \cdot R_{bt}. \quad (1)$$

При этом применительно к рассматриваемой железобетонной колонне, подверженной сжатию с кручением, будет справедлива гипотеза о ненадавливании, из которой следует $\sigma_y =$

$\sigma_z = 0$. Данная гипотеза нарушается лишь в сечениях с хомутами за счет стесненного деформирования, локально повышающего прочность бетона, однако не оказывает существенного влияния на несущую способность. Также предполагается отсутствие поперечных сил Q_z , Q_y и связанных с ними касательных напряжений τ_{yz} , τ_{zy} вплоть до момента выпучивания колонны. С учетом этого критерий прочности может быть представлен в виде:

$$\begin{cases} R_{b,\sigma_x} = \frac{R_b - R_{bt}}{2} + \sqrt{\frac{(R_b - R_{bt})^2}{4} - 3 \cdot (\tau_{xy}^2 + \tau_{zx}^2) + R_b \cdot R_{bt}}, \\ R_{b,\tau_{xy}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{R_b \cdot R_{bt} + (R_b - R_{bt}) \cdot \sigma_x - \sigma_x^2 - 3 \cdot \tau_{zx}^2}, \\ R_{b,\tau_{xz}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{R_b \cdot R_{bt} + (R_b - R_{bt}) \cdot \sigma_x - \sigma_x^2 - 3 \cdot \tau_{xy}^2}. \end{cases} \quad (2)$$

Тогда физические соотношения для связи напряжений, деформаций и относительных углов закручивания будут представлены в виде:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= E_{c1} \cdot \frac{k \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_{c1} - \varepsilon^2}{\varepsilon_{c1} + (k - 2) \cdot \varepsilon}, \\ \tau_{xy} &= -\frac{E_{c1} \cdot \theta}{2 \cdot (1 + \nu)} \cdot \frac{k \cdot \varepsilon_{c1} - \varepsilon}{\varepsilon_{c1} + (k - 2) \cdot \varepsilon} \cdot \left(\frac{\partial \psi}{\partial y} + z \right), \\ \tau_{xz} &= \frac{E_{c1} \cdot \theta}{2 \cdot (1 + \nu)} \cdot \frac{k \cdot \varepsilon_{c1} - \varepsilon}{\varepsilon_{c1} + (k - 2) \cdot \varepsilon} \cdot \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} - y \right). \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь $\theta = \frac{d\varphi}{dx}$ – относительный угол закручивания по длине элемента, ψ – функция депланации сечения при $\theta = 1$; E_{c1} – модуль деформации бетона при напряжениях, равных пределу прочности на сжатие; ε_{c1} – относительная деформация, соответствующая пределу прочности на сжатие; $k = E_{ci}/E_{c1}$ – коэффициент, равный отношению начального модуля упругости к модулю деформации при напряжениях, равных пределу прочности на сжатие. При этом E_{c1} , ε_{c1} , k являются функциями фактической прочности R_{b,σ_x} в условиях сложного напряженного состояния – сжатия с кручением. В первом приближении приняты линейные аппроксимации связи $E_{c1} - R_{b,\sigma_x}$, $\varepsilon_{c1} - R_{b,\sigma_x}$, $k - R_{b,\sigma_x}$ на основе данных Model Code 2010 [26] (рисунок 2):

$$\begin{aligned} E_{c1} &= 10^9 \cdot (0.2869 \cdot R_{b,\sigma_x} + 8.171), \\ \varepsilon_{c1} &= 10^{-3} \cdot (0.0104 \cdot R_{b,\sigma_x} + 1.912), \\ k &= -0.011 \cdot R_{b,\sigma_x} + 2.366. \end{aligned} \quad (4)$$

Введем функцию напряжений Φ , для которой выполняются следующие условия:

$$\tau_{xy} = -\frac{\partial \Phi}{\partial z}, \quad \tau_{xz} = \frac{\partial \Phi}{\partial y}. \quad (5)$$

Будем искать функцию напряжений для прямоугольного сечения в следующей форме:

$$\Phi = A \left(z^2 - \frac{b^2}{4} \right) \left(y^2 - \frac{h^2}{4} \right). \quad (6)$$

Поскольку рассматриваемое прямоугольное сечение является односвязной областью, функция напряжений должна удовлетворять граничным условиям на контуре: $\Phi_{contour} = 0$.

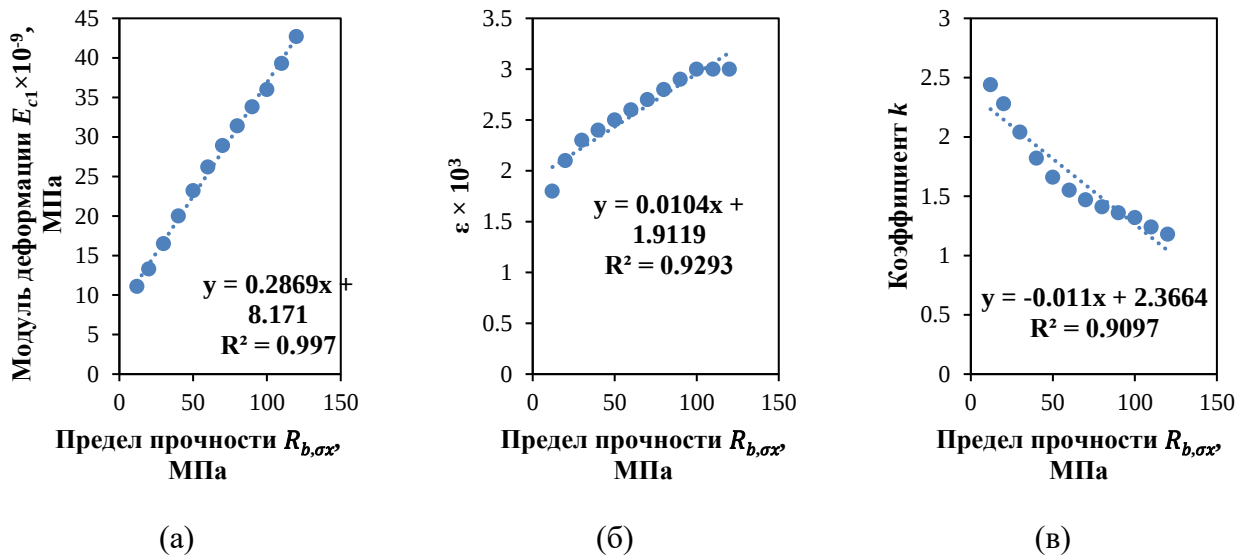


Рисунок 2 – Аппроксимация параметров выражения связи напряжений и деформаций

Подставляя (5) в дифференциальные уравнения равновесия Навье [27,28], получим:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = -\frac{E_{c1} \cdot \theta}{2 \cdot (1 + \nu)} \cdot \frac{k \cdot \varepsilon_{c1} - \varepsilon}{\varepsilon_{c1} + (k - 2) \cdot \varepsilon}; \quad (7)$$

Отсюда найдем выражение для константы А:

$$A = \frac{-\frac{E_{c1} \cdot \theta}{2 \cdot (1 + \nu)} \cdot \frac{k \cdot \varepsilon_{c1} - \varepsilon}{\varepsilon_{c1} + (k - 2) \cdot \varepsilon}}{\left(z^2 - \frac{b^2}{4}\right) + \left(y^2 - \frac{h^2}{4}\right)}. \quad (8)$$

Уравнения равновесия упругопластического стержневого элемента, подверженного сжатию с кручением

Деформированное состояние стержневого элемента при сжатии с кручением описывается системой дифференциальных уравнений (9):

$$\begin{cases} D_z \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = -M_t \cdot \frac{\partial w}{\partial x} - P \cdot v; \\ D_y \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = -M_t \cdot \frac{\partial v}{\partial x} - P \cdot w, \end{cases} \quad (9)$$

где v, w перемещения вдоль осей y и z оси стержневого элемента.

Решением уравнения в линеаризированной постановке [29] является следующее выражение:

$$P_{cr} = P_{cr}(M_t) = \frac{4 \cdot D_{min}^2 \cdot \pi^2 - M_t^2 \cdot l_0^2}{4 \cdot l_0^2 \cdot D_{min}}. \quad (10)$$

В выражение (10) входит касательно-модульная жесткость сечений D_{min} , которая определяется характером напряженно-деформированного состояния элемента и наименьшим моментом инерции сечения.

Сечение элемента разбивается на элементарные площадки (рисунок 3), в пределах которых предполагается $R_{b,\sigma_x} = const$.

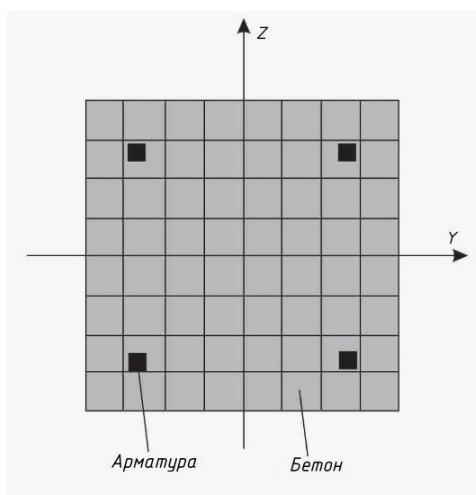


Рисунок 3 – Схема расчетного сечения железобетонной колонны

Напряженно-деформированное состояние элемента найдем из условия равновесия внешних сил и усилий, действующих в рассматриваемом сечении:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{ext} = P_{int} = \iint_{F_1} E_{c11} \cdot \frac{k_1 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_{c11} - \varepsilon^2}{\varepsilon_{c11} + (k_1 - 2) \cdot \varepsilon} dz dy + \dots \\ \quad + \iint_{F_n} E_{c1n} \cdot \frac{k_n \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_{c1n} - \varepsilon^2}{\varepsilon_{c1n} + (k_n - 2) \cdot \varepsilon} dz dy + \\ \quad + E_s \cdot A_{s,tot} \cdot \varepsilon, \\ M_{t,ext} = M_{t,int} = 2 \iint_F \Phi dz dy. \end{array} \right. \quad (11)$$

Деформированное состояние элемента характеризуется $\varepsilon = \varepsilon_{min}$, $\theta = \theta_{min}$, для которого касательно-модульная жесткость относительно оси y определяется из выражения:

$$\begin{aligned} D_{min} &= D_{min}(P, M_t) \\ &= \iint_{F_1} \frac{d}{d\varepsilon} \left(E_{c11} \cdot \frac{k_1 \cdot \varepsilon_{c11} - \varepsilon}{\varepsilon_{c11} + (k_1 - 2) \cdot \varepsilon} \right) \cdot y^2 dz dy + \dots \\ &\quad + \iint_{F_n} \frac{d}{d\varepsilon} \left(E_{c1n} \cdot \frac{k_n \cdot \varepsilon_{c1n} - \varepsilon}{\varepsilon_{c1n} + (k_n - 2) \cdot \varepsilon} \right) \cdot y^2 dz dy + E_s \cdot A_{s,tot} \cdot \left(\frac{h}{2} - a \right)^2. \end{aligned} \quad (12)$$

Алгоритм расчета устойчивости при сжатии с кручением

Для реализации расчетной модели, предложенной в разделах 2.1 – 2.2, разработан алгоритм расчёта устойчивости (рисунок 4):

1. На основе исходных данных о конструктивном решении (l_0 , $b \times h$, A_s), физических соотношений для материала ($\sigma = f(\varepsilon)$) и параметров воздействия (P , M_t) определяется деформированное состояние элемента из решения системы уравнений (11).

2. Для деформированного состояния элемента при заданных параметрах воздействия вычисляется касательно-модульная жесткость по формуле (12) с учетом разбиения сечения на конечное число подобластей, в пределах каждой из которых механические характеристики материала считаются постоянными.

3. Определение критической силы, соответствующей заданному напряженно-деформированному состоянию.

4. Сравнение вычисленной критической силы с действующей продольной силой

5а. Если вычисленная критическая сила больше, чем действующая в элементе продольная сила, то устойчивость обеспечена.

5б. Если вычисленная критическая сила меньше или равна действующей в элементе продольной силе, то устойчивость не обеспечена.

6. Если устойчивость не обеспечена, то изменяются конструктивные параметры элемента: изменяются размеры поперечного сечения, процент армирования или класс бетона по прочности на сжатие.

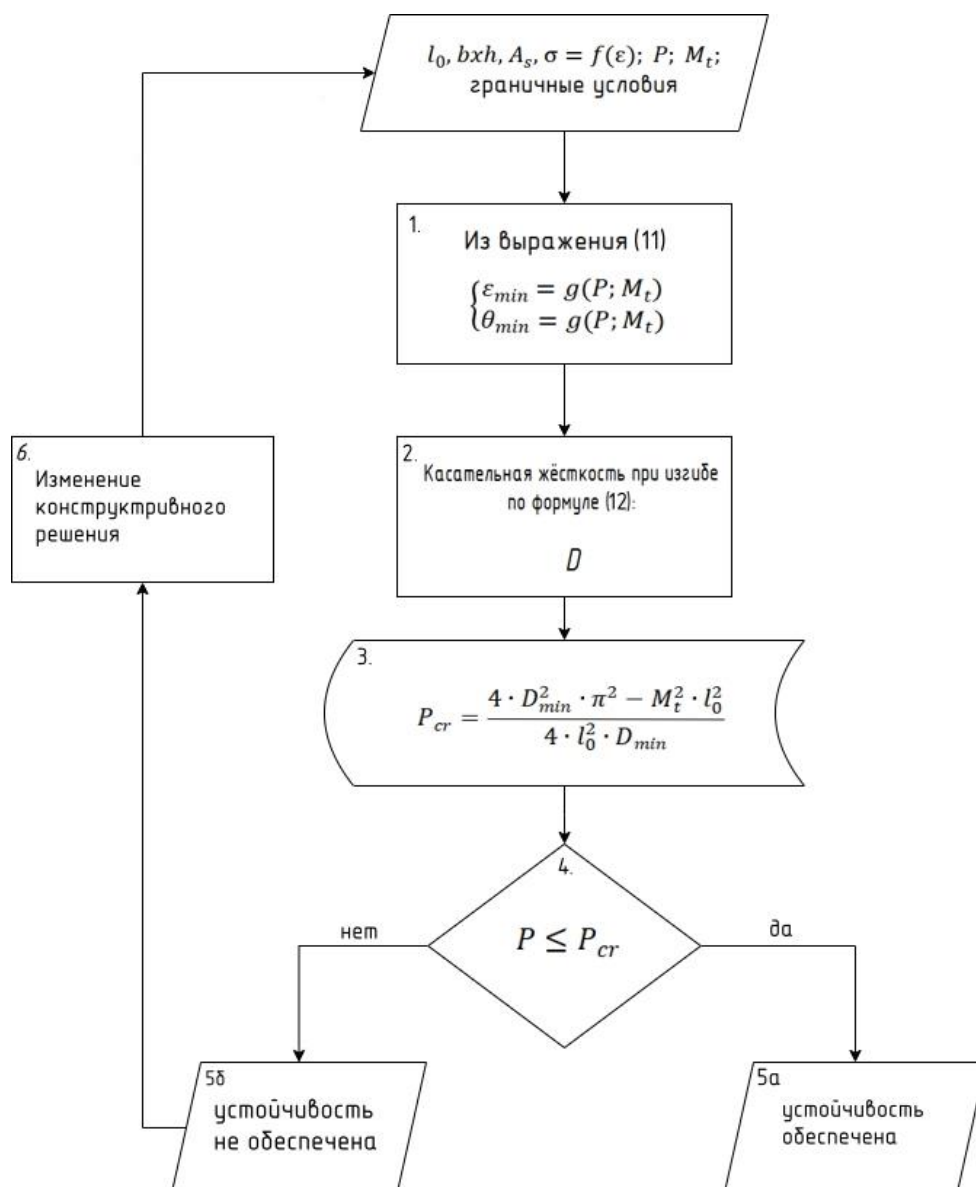


Рисунок 4 – Схема алгоритма расчёта устойчивости железобетонной колонны при сжатии с кручением

Результаты исследования и их анализ

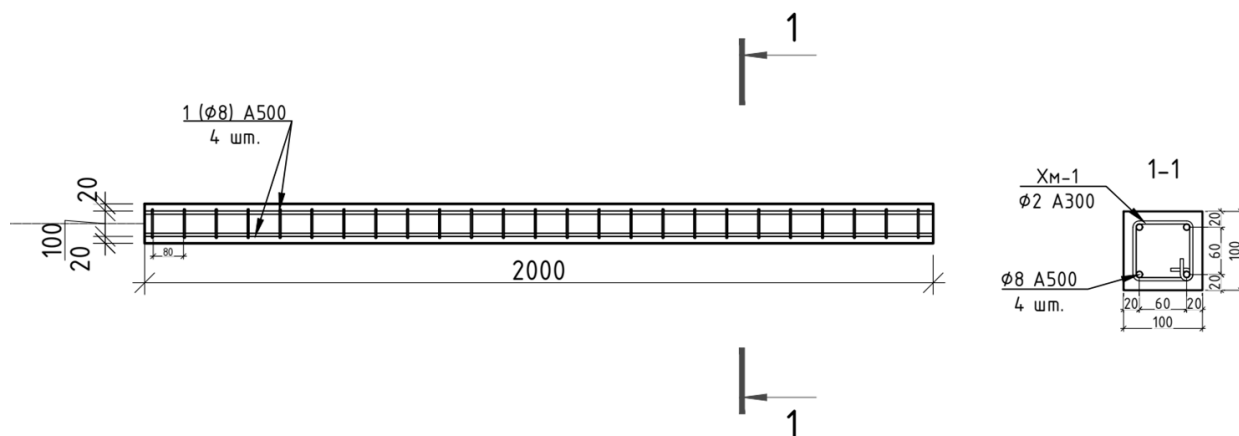
Описание конструктивного решения железобетонной колонны

С использованием модели, предложенной в разделе 2, выполнен расчет устойчивости железобетонной колонны при сжатии с кручением в программном комплексе MathCAD. Рассматривается железобетонная колонна сечением 100×100 мм. Схема армирования колонны и её расчетная схема приведена на рисунке 5. Один конец колонны жестко

защемлен, а другой свободен от закреплений. К свободному концу колонны приложена сосредоточенная сила в центре сечения и крутящий момент.

Принятые материалы: бетон В80 ($R_{bn} = 41$ МПа), арматура - А500 ($R_{sn} = 500$ МПа).

а)



б)

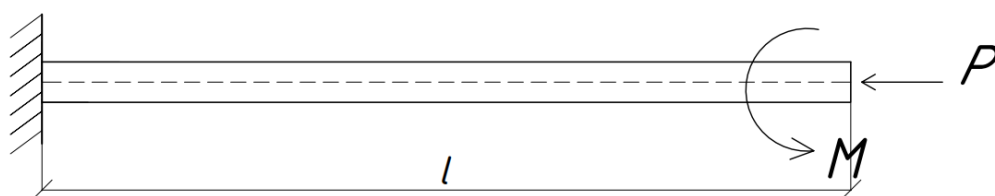


Рисунок 5 – Схема армирования железобетонной колонны (а) и ее расчетная схема (б)

Описание конечно-элементной модели, принятой для валидации предложенного численно-аналитического решения

Для оценки достоверности предложенной расчетной модели устойчивости железобетонной колонны при сжатии с кручением было выполнено численное моделирование с использованием модуля Buckling программного комплекса Ansys. В рамках численного моделирования для бетона были использованы конечные элементы SOLID 185. Стержни продольной и поперечной арматуры смоделированы конечным элементом REINF 264. На основе анализа чувствительности результатов к густоте сетки разбиения модели на конечные элементы был принят шаг разбиения 10 мм. Общий вид модели представлен на рисунке 6.

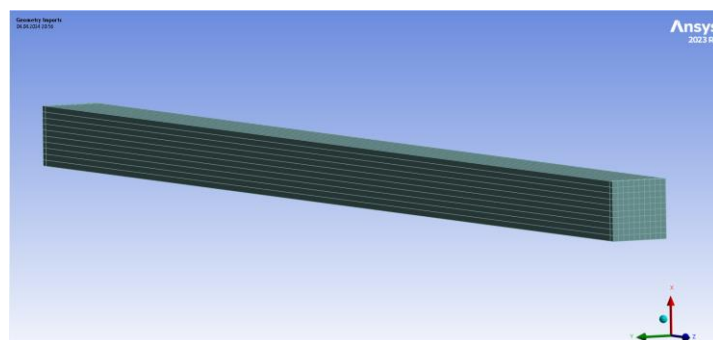


Рисунок 6 – Конечно-элементная модель железобетонной колонны в ПК Ansys

Для описания нелинейной работы бетона при сложном напряженном состоянии использовалась модель Menterey-Willam, параметры которой назначались на основе нелинейной зависимости σ - ϵ при одноосном сжатии и растяжении по приложению Г СП 63.13330.2018 (рисунок 7, а), а параметры поверхности текучести при двухосном напряженном состоянии по [25] (рисунок 7, б). Коэффициент Пуассона принят равным 0,15. Для арматурной стали была принята билинейная диаграмма (рисунок 7, в).

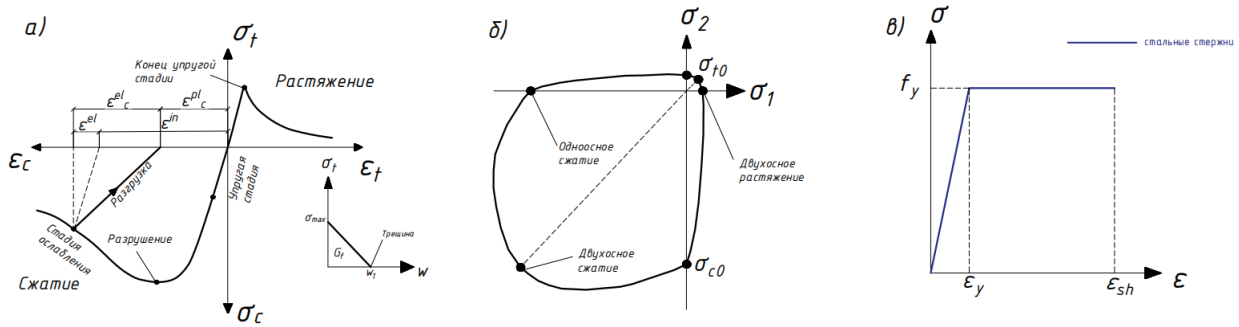


Рисунок 7 – Диаграмма состояния бетона при одноосном напряженном состоянии (а); сечение поверхности текучести модели Menterey-Willam для двухосного напряженно-деформированного состояния (б); диаграмма состояния арматурной стали А500 (в)

В построенной конечно-элементной модели продольная сила прикладывалась в центре сечения на свободном от закрепления конце колонны. Крутящий момент заменялся сосредоточенными силами, приложенными по касательной к граням в узлах сечения на свободном конце колонны (см. рисунок 8): $M_{t,cr} = \sum_{i=1}^n (P \cdot 0,5h)$, где P – сосредоточенная сила, приложенная в узле на контуре по касательной к поверхности, h – размер поперечного сечения, n – число углов на контуре, в которых приложены силы.

В модуле *Buckling* программного комплекса Ansys моменту потери устойчивости соответствует достижения полными деформациями (*'total deformation'*) формы потери устойчивости значений больше единицы.

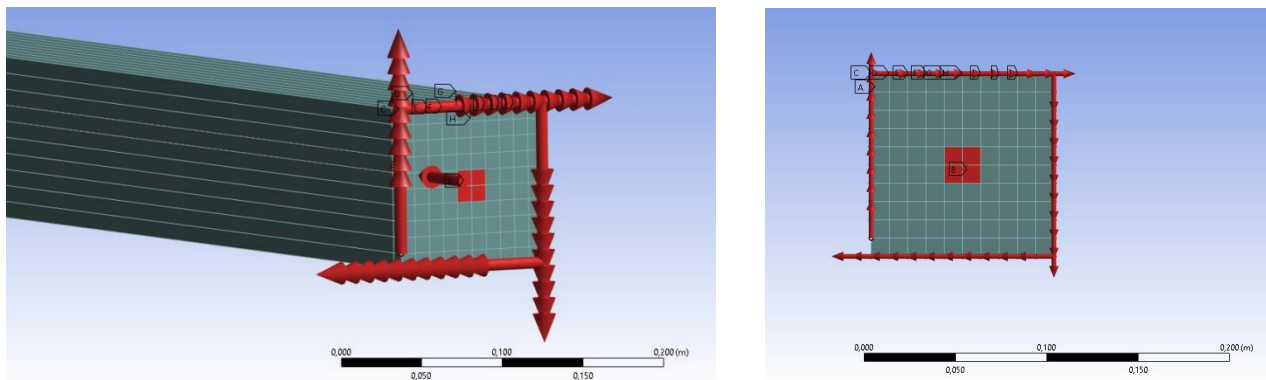


Рисунок 8 – Схема приложения нагрузки к модели колонны в ПК Ansys

Сравнение результатов по предложенной модели и МКЭ

В соответствии с алгоритмом, представленным в разделе 2.3, выполним расчет устойчивости железобетонных элементов, подверженных сжатию с кручением, для фиксированных значений продольной силы: $P = 0,9P_{cr,e}$, $0,8P_{cr,e}$, $0,7P_{cr,e}$, $0,6P_{cr,e}$, $0,4P_{cr,e}$, $0,2P_{cr,e}$ где $P_{cr,e}$ – критическая сила при потере устойчивости центрально сжатого элемента.

Для выполнения расчета в первом приближении сечение было разбито на 4 подобласти. С учетом этого касательно-модульная жёсткость сечения при изгибе будет представлять собой сумму интегралов по заданным подобластям (13):

$$\begin{aligned}
 D = & \int_{0.25h}^{0.5h} \int_{0.25b}^{0.5b} \left(\frac{d}{d\varepsilon} \left(\frac{k \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_{c1} - \varepsilon^2}{\varepsilon_{c1} + (k-2) \cdot \varepsilon} \cdot E_{c1} \right) \right) y^2 dz dy \\
 + & \int_{0.25h}^{0.5h} \int_0^{0.25b} \left(\frac{d}{d\varepsilon} \left(\frac{k \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_{c1} - \varepsilon^2}{\varepsilon_{c1} + (k-2) \cdot \varepsilon} \cdot E_{c1} \right) \right) y^2 dz dy \\
 + & \int_{0.25h}^{0.5h} \int_{-0.25b}^0 \left(\frac{d}{d\varepsilon} \left(\frac{k \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_{c1} - \varepsilon^2}{\varepsilon_{c1} + (k-2) \cdot \varepsilon} \cdot E_{c1} \right) \right) y^2 dz dy \\
 + & \int_{0.25h}^{0.5h} \int_{-0.5b}^{-0.25b} \left(\frac{d}{d\varepsilon} \left(\frac{k \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_{c1} - \varepsilon^2}{\varepsilon_{c1} + (k-2) \cdot \varepsilon} \cdot E_{c1} \right) \right) y^2 dz dy + E_s A_{s,tot} \cdot \left(\frac{h}{2} - a \right)^2.
 \end{aligned} \tag{13}$$

При $M_t = 0$ критическая сила равна (14):

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 D}{l^2}; \tag{14}$$

Критический момент при фиксированной сжимающей силе P равен (15):

$$M_{t,cr} = 2 \cdot \left(D \cdot \left(\frac{\pi^2 \cdot D}{l^2} - P \right) \right)^{0.5} \tag{15}$$

На основании решения уравнения (15) построен график зависимости $P_{cr} - M_t$ (Рисунок 9).

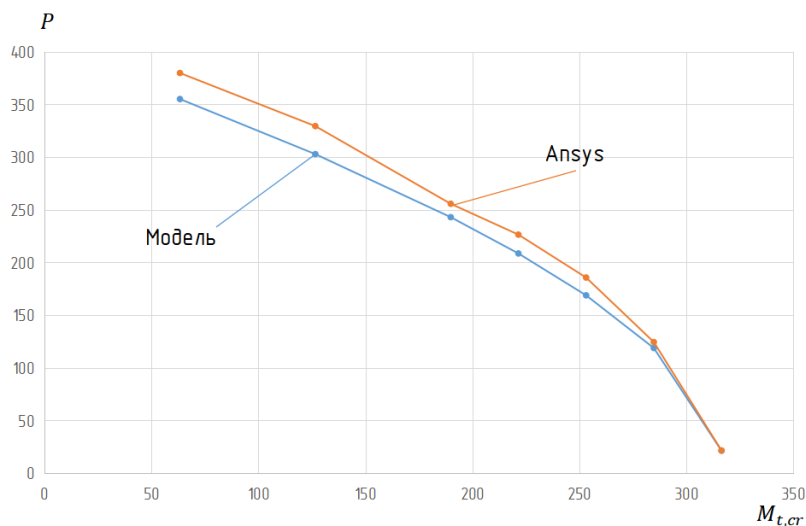


Рисунок 10 – График зависимости $P - M_{t,cr}$

На рисунке 10 представлена форма потери устойчивости по результатам расчета в модуле Buckling программного комплекса Ansys для следующих параметров воздействия: $P = 314,2$ кН, $M_t = M_{t,cr}$.

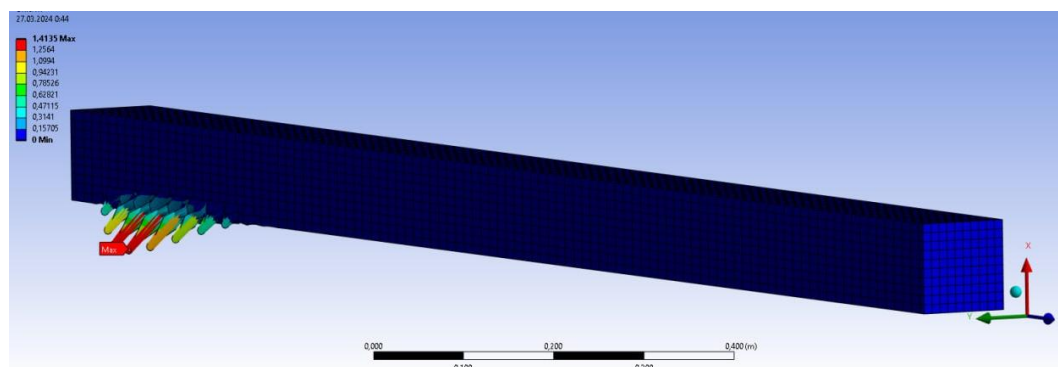


Рисунок 10 – форма потери устойчивости железобетонной колонны при $P = 314,2$ кН, $M_t = M_{t,cr}$

Сопоставление результатов расчета по предложенной численно-аналитической модели и с использованием ПК Ansys приведено на рисунке 11.

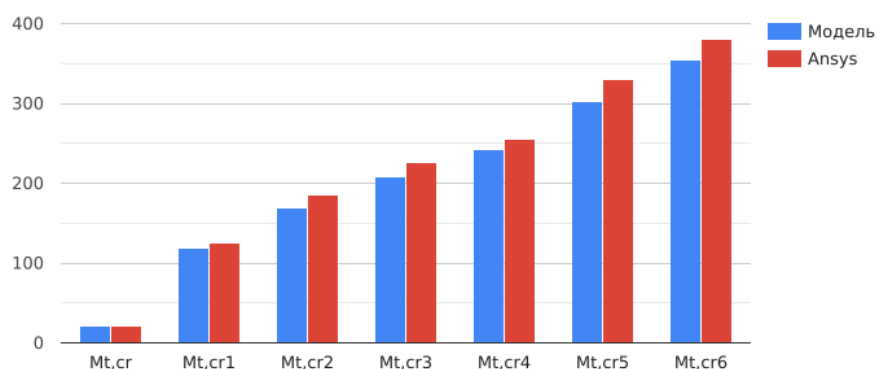


Рисунок 11 – Значения критических усилий $P - M_{t,cr}$, полученных по предложенной модели и в модуле Buckling ПК Ansys

Из анализа данных на рисунке 11 видно, наибольшая разница составила 8.08% для случая $P = 0.4 \cdot P_{cr,e} = 126.6$ кН. Наименьшая разница 3.6% составила для случая $P = 0.9 \cdot P_{cr,e} = 284.85$ кН. Полученная разница между результатами расчета по предложенной численно-аналитической модели и в ПК Ansys учитывается в запас несущей способности элементов, подверженных сжатию с кручением. По мере роста крутящего момента происходит снижение значения критической силы, вызывающей потерю устойчивости. Это связано как с действием крутящей пары сил при искривлении стержня, так и со снижением механических характеристик бетона при совместном действии нормальных и касательных напряжений.

Выводы

1. Сформулированы исходные гипотезы о напряженно-деформированном состоянии железобетонной колонны, испытывающей сжатие с кручением. На их основе предложена полуаналитическая расчетная модель для анализа устойчивости железобетонных колонн, подверженных сжатию с кручением в результате особого воздействия.
2. Выполнена валидация предложенной расчетной модели устойчивости железобетонных колонн, подверженных сжатию с кручением в результате особого воздействия в модуле Buckling программного комплекса Ansys. Анализ данных показал, наибольшая разница составила 8.08% для случая $P = 0.4 \cdot P_{cr,e} = 126.6$ кН. Наименьшая разница 3.6% составила для случая $P = 0.9 \cdot P_{cr,e} = 284.85$ кН.

3. Показано, что по мере роста крутящего момента происходит снижение значения критической силы, вызывающей потерю устойчивости. Это связано как с действием крутящей пары сил при искривлении стержня, так и со снижением механических характеристик бетона при совместном действии нормальных и касательных напряжений.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-49-10010, <https://rscf.ru/project/24-49-10010/>

This work was supported by the Russian Science Foundation grant No. 24-49-10010, <https://rscf.ru/project/24-49-10010/>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bažant Z.P., Verdure M. Mechanics of Progressive Collapse: Learning from World Trade Center and Building Demolitions // *J Eng Mech*. 2007. Vol. 133, № 3. P. 308–319.
2. Pham A.T. et al. Blast-induced dynamic responses of reinforced concrete structures under progressive collapse // *Magazine of Concrete Research*. 2022. Vol. 74, № 16. P. 850–863.
3. Лалин В.В., Семенов Д.А. Задача о кручении: постановка в напряжениях и решение методом граничных элементов // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. - 2023. - Т. 19. - №4. - С. 339-348. doi: 10.22363/1815-5235-2023-19-4-339-348.
4. Бондаренко В. М. К вопросу об устойчивом и неустойчивом сопротивлении железобетонных конструкций, поврежденных коррозией // *Известия Орел ГТУ, науч.журнал, серия «Строительство и транспорт»*. 2009. № 1/21(533). С. 9-17.
5. Фёдоров В.С., Левитский В.Е. Оценка огнестойкости внецентренно сжатых железобетонных колонн по потере устойчивости // *Строительная механика и расчет сооружений*. 2012. №2. С. 53-60.
6. Санжаровский Р.С., Веселов А.А. Теория расчета строительных конструкций на устойчивость и современные нормы. М., СПб.: АСВ, 2002. 128 с.
7. Солдатов А.Ю. Анализ устойчивости железобетонных стержневых конструкций с учетом физической нелинейности // *Строительная механика и расчет сооружений*. 2012. №1. С. 30-34.
8. Улитин В.В. Деформационный критерий при анализе устойчивости и продольного изгиба в условиях физической нелинейности // *Строительная механика и расчет сооружений*. 2012. №1. С. 34-39.
9. Manuylov G., Kosytsyn S., Begichev M. On the calculations for the stability of beams, frames, and cylindrical shells in the elasto-plastic stage // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2022. Vol. 18, № 3. P. 25–36.
10. Беглов А.Д., Санжаровский Р.С. Теория расчета железобетонных конструкций на прочность и устойчивость. Современные нормы и евростандарты. М.: АСВ, 2006. 221 с.
11. Тамразян А.Г. К устойчивости внецентренно сжатых железобетонных элементов с малым эксцентриситетом с учетом реологических свойств бетона // *Железобетонные конструкции*. 2023. №2(2). С. 48-57.
12. Savin S. et al. Experimental and Numerical Investigations of RC Frame Stability Failure under a Corner Column Removal Scenario // *Buildings*. 2023. Vol. 13, № 4. P. 908.
13. Kolchunov V.I. Deplanation Hypotheses for Angular Deformations in Reinforced Concrete Structures Under Combined Torsion and Bending // *Building and reconstruction*. 2022. Vol. 100, № 2. P. 3–12.
14. Kolchunov V.I., demyanov A.I., Protchenko M.V. Moments in reinforced concrete structures under bending with torsion // *Building and reconstruction*. 2021. Vol. 95, № 3. P. 27–46.
15. Kolchunov V., Dem'yanov A., Protchenko M. The new hypothesis angular deformation and filling of diagrams in bending with torsion in reinforced concrete structures // *Journal of Applied Engineering Science*. 2021. Vol. 19, № 4. P. 972–979.
16. Бондаренко В.М., Колчунов В.И. Расчетные модели силового сопротивления железобетона. Москва: Издательство АСВ, 2004. 472 р.
17. Lei Y. et al. Comparison of torsional damage and size effects of BFRP- and steel-reinforced concrete beams with different stirrup ratios // *Eng Struct*. 2023. Vol. 285. P. 116042.
18. Deng J., Cao S., Peng Z. Crack-based model for seismic behaviour of concrete columns under combined compression-bending and torsion // *Structures*. 2023. Vol. 56. P. 104998.
19. Chen Y. et al. Bending restoring force model of angle-steel reinforced concrete columns under combined torsion // *Structures*. 2023. Vol. 55. P. 2186–2198.

20. Selmy Y.M., El-Salakawy E.F. Behaviour of circular concrete bridge columns internally reinforced with GFRP under reversed-cyclic loading including torsion // *Structures*. 2024. Vol. 59. P. 105680.
21. Savin S.Y., Fedorova N. V., Kolchunov V.I. Dinamic Forces in the Eccentrically Compressed Members of Reinforced Concrete Frames Under Accidental Impacts // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. ASV Publishing House, 2022. Vol. 18, № 4. P. 111–123.
22. Алмазов В.О., Плотников А.И., Расторгуев Б.С. Проблемы сопротивления зданий прогрессирующему разрушению // *Вестник МГСУ*. 2011. № 2–1. P. 16–20.
23. Алмазов В.О., Као З.К. Динамика прогрессирующего разрушения монолитных многоэтажных каркасов. Москва: Издательство АСВ, 2014. 128 p.
24. Adam J.M. et al. Dynamic performance of a real-scale reinforced concrete building test under a corner-column failure scenario // *Eng Struct*. Elsevier Ltd, 2020. Vol. 210. P. 110414.
25. Geniyev G.A., Kisyuk V.N., Tyupin G.A. Teoriya plastichnosti betona i zhelezobetona [Plasticity theory of concrete and reinforced concrete]. Moscow: Stroyizdat, 1974. 316 p.
26. FIB Model Code 2010. CEB and FIP, 2011.
27. Старовойтов Э. И. Сопротивление материалов. М.: Физматлит, 2008
28. Феодосьев В. И. Сопротивление материалов: Учебник для вузов. 10-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999.
29. Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем. Москва: Издательство “Наука,” 1967. 984 с.

REFERENCES

1. Bažant Z.P., Verdure M. Mechanics of Progressive Collapse: Learning from World Trade Center and Building Demolitions. *J Eng Mech*. 2007. Vol. 133, № 3. P. 308–319.
2. Pham A.T. et al. Blast-induced dynamic responses of reinforced concrete structures under progressive collapse. *Magazine of Concrete Research*. 2022. Vol. 74, № 16. P. 850–863.
3. Lalin V.V., Semenov D.A. Torsion problem: stress statement and solution by the boundary element method. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2023. Vol. 19, No. 4. Pp. 339-348. doi: 10.22363/1815-5235-2023-19-4-339-348.
4. Bondarenko V. M. To the question of stable and unstable resistance of reinforced concrete structures damaged by corrosion. *Izvestiya Orel GTU, scientific journal, series "Construction and transport"*. 2009. no 1/21(533). Pp. 9-17.
5. Fedorov V.S. Levitsky V.E. Fire resistance assessment of the off-centered compressed reinforced concrete columns by stability loss. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy [Structural mechanics and calculation of structures]*. 2012. №2. C. 53-60. (in Russian)
6. Sanzharovsky R.S., Veselov A.A. Theory of calculation of building structures for stability and modern norms. Moscow, SPb.: ASV, 2002. 128 p.
7. Soldatov A.Yu. Stability analysis of the reinforced concrete rod structures taking into account the physical nonlinearity. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy*. 2012. No. 1. Pp. 30-34. (in Russian)
8. Ulitin V.V. Deformation criterion in the analysis of stability and longitudinal bending in the conditions of physical nonlinearity. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy [Structural mechanics and calculation of structures]*. 2012. No. 1. Pp. 34-39.
9. Manuylov G., Kosytsyn S., Begichev M. On the calculations for the stability of beams, frames, and cylindrical shells in the elasto-plastic stage. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2022. Vol. 18, № 3. P. 25–36.
10. Beglov A.D., Sanzharovsky R.S. Theory of calculation of the reinforced concrete structures for strength and stability. Modern Norms and Eurostandards. Moscow: ASV, 2006. 221 p.
11. Tamrazyan A.G. To stability of the off-centered compressed reinforced concrete elements with a small eccentricity taking into account the rheological properties of concrete. *Reinforced Concrete Structures*. 2023. No. 2(2). Pp. 48-57.
12. Savin S. et al. Experimental and Numerical Investigations of RC Frame Stability Failure under a Corner Column Removal Scenario. *Buildings*. 2023. Vol. 13, № 4. P. 908.
13. Kolchunov V.I. Deplanation Hypotheses for Angular Deformations in Reinforced Concrete Structures Under Combined Torsion and Bending. *Building and reconstruction*. 2022. Vol. 100, № 2. P. 3–12.
14. Kolchunov V.I., demyanov A.I., Protchenko M.V. Moments in reinforced concrete structures under bending with torsion. *Building and reconstruction*. 2021. Vol. 95, № 3. P. 27–46.
15. Kolchunov V., Dem'yanov A., Protchenko M. The new hypothesis angular deformation and filling of diagrams in bending with torsion in reinforced concrete structures. *Journal of Applied Engineering Science*. 2021. Vol. 19, № 4. P. 972–979.
16. Bondarenko V.M., Kolchunov V.I. Raschetnye modelov silovogo resistenzii zhelezotona [Calculating models of force resistance of reinforced concrete]. Moscow: ASV Publishing House, 2004. 472 p.

17. Lei Y. et al. Comparison of torsional damage and size effects of BFRP- and steel-reinforced concrete beams with different stirrup ratios. *Eng Struct.* 2023. Vol. 285. P. 116042.
18. Deng J., Cao S., Peng Z. Crack-based model for seismic behaviour of concrete columns under combined compression-bending and torsion. *Structures.* 2023. Vol. 56. P. 104998.
19. Chen Y. et al. Bending restoring force model of angle-steel reinforced concrete columns under combined torsion. *Structures.* 2023. Vol. 55. P. 2186–2198.
20. Selmy Y.M., El-Salakawy E.F. Behaviour of circular concrete bridge columns internally reinforced with GFRP under reversed-cyclic loading including torsion. *Structures.* 2024. Vol. 59. P. 105680.
21. Savin S.Y., Fedorova N. V., Kolchunov V.I. Dinamic Forces in the Eccentrically Compressed Members of Reinforced Concrete Frames Under Accidental Impacts. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering.* 2022. Vol. 18, № 4. P. 111–123.
22. Almazov, V.O.; Plotnikov, A.I.; Rastorguev, B.S. Problems of building resistance to progressive destruction. *Vestnik MSCU.* 2011. № 2-1. P. 16-20.
23. Almazov V.O., Kao Z.K. Dynamics of progressive destruction of monolithic multistorey frames. Moscow: ASV Publishing House, 2014. 128 p.
24. Adam J.M. et al. Dynamic performance of a real-scale reinforced concrete building test under a corner-column failure scenario. *Eng Struct.* 2020. Vol. 210. P. 110414.
25. Geniyev G.A., Kisyuk V.N., Tyupin G.A. Teoriya plastichnosti betona i zhelezobetona [Plasticity theory of concrete and reinforced concrete]. Moscow: Stroyizdat, 1974. 316 p.
26. FIB Model Code 2010. CEB and FIP, 2011.
27. Starovoitov E. I. Mechanics of Materials. Moscow: Fizmatlit, 2008
28. Feodosiev V. I. Mechanics of Materials: Textbook for Universities. 10th edition, revised and added. Moscow: Bauman MSTU Publishing House, 1999.
29. Volmir A.S. Stability of deformable systems. Moscow: Nauka Publishing House, 1967. 984 p.

Информация об авторах

Колчунов Виталий Иванович

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,
профессор кафедры железобетонных и каменных конструкций.
E-mail: asiorel@mail.ru

Савин Сергей Юрьевич

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций.
E-mail: savinsyu@mgsu.ru

Амелина Маргарита Андреевна

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,
аспирант кафедры железобетонных и каменных конструкций
E-mail: margo.dremova@mail.ru

Information about authors:

Kolchunov Vitaly Iv.

Moscow State University of Civil Engineering (NRU MSUCE), Moscow, Russia,
Doctor of Tech. Sc., professor of the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures.
E-mail: asiorel@mail.ru

Savin Sergey Yu.

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
candidate of technical science, associate professor of the department of Reinforced Concrete and Masonry Structures.
E-mail: savinsyu@mgsu.ru

Amelina Margarita A.

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
Post graduate student of the department of Reinforced Concrete and Masonry Structures.
E-mail: margo.dremova@mail.ru

А.А. СОЛОВЬЕВА¹, С.А. СОЛОВЬЕВ¹¹ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет», г. Вологда, Россия

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ СТЕРЖНЕЙ СТАЛЬНЫХ ФЕРМ ПРИ НЕПОЛНОЙ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Аннотация. В статье представлен вероятностный подход к анализу надежности стержней стальных ферм при неполной статистической информации. Проиллюстрирован подход к восстановлению плотности вероятностей случайной величины методом ядерной оценки плотности при малом количестве испытаний/измерений случайной величины. Для повышения достоверности расчета оценка параметров плотности распределения представлена в интервальной форме, что позволяет сформировать р-блок для моделируемой случайной величины. Оценка вероятности безотказной работы позволяет в количественной форме получить представление об уровне безопасности стальных ферм, выявить наиболее ненадежные фермы для мониторинга их технического состояния или рассчитать эффект от усиления фермы по критерию надежности. В представленном подходе вероятность безотказной работы оценивается в виде интервала значений. Если нижняя граница интервала не позволяет сделать вывод об уровне безопасности эксплуатации фермы, то он может быть повышен путем получения дополнительной статистической информации или путем усиления фермы или снижения допустимой нагрузки на нее.

Ключевые слова: надежность, вероятностное проектирование, вероятность отказа, ферма, неопределенность, безопасность, ядерная оценка плотности.

A.A. SOLOVEVA¹, S.A. SOLOVEV¹¹Vologda State University, Vologda, Russia

RELIABILITY ANALYSIS OF STEEL TRUSS BARS WITH IMPRECISE STATISTICAL DATA

Abstract. The article describes the probabilistic approach of reliability analysis for steel truss bars with imprecise statistical data. An approach to recovery the probability density of a random variable by the kernel density estimation method is illustrated for a small number of tests/measurements cases. The estimation of the distribution density parameters is presented in an interval form, which makes it possible to form a p-box for the random variable. Evaluation of the probability of non-failure allow to get a quantitative assessment for the safety of steel trusses, to identify the most unreliable trusses for monitoring their technical condition or to calculate the effect of strengthening the truss according to the reliability criterion. The probability of non-failure is estimated in the interval form. If the lower limit of the interval does not allow to get a conclusion about the truss safety level, then it can be increased by obtaining additional statistical data or by strengthening the truss or reducing the permissible load.

Keywords: reliability, probabilistic design, probability of failure, truss, uncertainty, safety, kernel density estimate.

Введение

Обеспечение надежности элементов строительных конструкций является ключевой задачей на всех стадиях жизненного цикла здания или сооружения. В соответствии с Eurocode 0 «Basis of structural design», надежность обычно выражается в вероятностных терминах. Одной из самых распространенных мер надежности в инженерно-строительной практике является вероятность безотказной работы или вероятность отказа.

Определение вероятности безотказной работы для эксплуатируемых элементов строительных конструкций сопряжено со сложностями выявления полной статистической информации, требуемой для расчета надежности путем использования классических вероятностно-статистических подходов. Для получения полной статистической информации требуется испытания большого количества контрольных образцов, данные многолетних наблюдений и т.д. Получение такой информации может быть затруднительно, невозможно или экономически нецелесообразно. Как отмечено в [1], «в строительной практике, помимо случайности, которая может быть смоделирована теорией вероятностей с помощью функций распределения вероятностей, мы сталкиваемся с эпистемологической неопределенностью, вызванной такими вещами, как потеря информации, неполные знания и неизбежные ошибки, допущенные человеком. Данные позиции не могут быть достаточно хорошо смоделированы случайностью и вероятностными моделями».

Для повышения практической значимости методов анализа надежности строительных конструкций были разработаны алгоритмы расчета, построенные на альтернативных теориях анализа данных: теории возможностей, теории случайных множеств, теории нечетких множеств и др. [2-6].

Существуют также подходы к восстановлению статистических показателей случайных величин по цензурированной или ограниченной выборке: ядерная оценка плотности, метод рекуррентных ядерных оценок, метод стохастической регуляризации. В данной работе предлагается рассмотреть подход к анализу надежности стержней стальных ферм при неполной статистической информации с комбинацией положений теории возможностей и ядерной оценки плотности. Так как ферма представляет собой шарнирно-стержневую систему, где, как правило, отказ одного элемента приводит к отказу всей системы, в статье предложена методика оценки надежности фермы как последовательной механической системы.

Модели и методы

Одной из главных проблем в практических задачах вероятностного анализа надежности, как было отмечено выше, является высокая трудоемкость (а иногда и невозможность) получения полной статистической информации о случайной величине в математической модели предельных состояний. Например, по 3-5 значениям случайной величины сложно выявить приближенную действительную функцию распределения вероятностей приняв точные значения ее параметров. Принятие гипотезы о распределении в данном случае может привести к большим ошибкам в оценке вероятности безотказной работы.

Одним из возможных путей оценки вида распределения при ограниченной (неполной) статистической информации является непараметрический подход – ядерная оценка плотности (или метод окна Парзена-Розенблатта) [7, 8]. Ядерная оценка плотности – это непараметрический способ оценки плотности вероятности случайной величины. Пусть имеется выборочная совокупность данных случайной величины $\tilde{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$. Оценка $\hat{f}_X(x)$ плотности распределения случайной величины $f_X(x)$ может быть выражена следующим образом:

$$\hat{f}_X(x) = \frac{1}{h \cdot n} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - x_i}{h}\right), \quad (1)$$

где n – число испытаний/измерений случайной величины $\tilde{x}$; h – сглаживающий параметр, называемый «ширина полосы» (bandwidth), принимаемый $h > 0$; K – ядро, которое представляет собой неотрицательную функцию.

Существуют различные виды ядерных функций K : прямоугольная $K(t) = \begin{cases} 0,5 & \text{если } |t| < 1 \\ 0 & \text{если } |t| \geq 1 \end{cases}$, треугольная $K(t) = \begin{cases} 1-|t| & \text{если } |t| < 1 \\ 0 & \text{если } |t| \geq 1 \end{cases}$, параболическая (Епанечникова) $K(t) = \begin{cases} \frac{3}{4\sqrt{5}} \left(1 - \frac{1}{5}t^2\right)^2 & \text{если } |t| < \sqrt{5} \\ 0 & \text{если } |t| \geq \sqrt{5} \end{cases}$, нормальная и др. [9].

Т.к. множество распределений случайных величин имеют вид распределения близкий к нормальному, то в качестве ядерной функции зачастую применяется стандартная нормальная (гауссовская) функция $K(t) = \phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}t^2}$.

Для оценки параметра h распределений близких к нормальным используется следующее уравнение:

$$h = 1,06 \cdot n^{\frac{-1}{5}} \cdot S_x, \quad (2)$$

или правило Сильвермана [10]:

$$h = 0,9 \cdot n^{\frac{-1}{5}} \cdot \min\left(S_x, \frac{IQR}{1,34}\right), \quad (3)$$

где S_x – среднееквадратическое отклонение выборочной совокупности данных; n – число данных в выборочной совокупности; IQR – межквартильный размах: принимается равной разнице между 75-м и 25-м перцентилями (между третьим и первым квартилями $IQR = Q_3 - Q_1$).

В выражение для оценки плотности (1) также могут быть добавлены веса для выборочных значений x_i , если данные были получены различными измерительными приборами или используется информация от различных экспертов:

$$\hat{f}_X(x) = \frac{1}{h \cdot n} \sum_{i=1}^n w_i \cdot K\left(\frac{x - x_i}{h}\right), \quad (4)$$

где w_i – вес значения x_i , $\sum_{i=1}^n w_i = 1$.

В [11] приводится формула оценки плотности распределения случайной величины методом ядерной оценки при нормальной ядерной функции $K(t)$ в виде:

$$\hat{f}_X(x) = \frac{1}{S_x \cdot n \cdot \sqrt{2\pi}} \sum_{i=1}^n \exp\left[-\frac{(x - x_i)^2}{2 \cdot S_x^2}\right]. \quad (5)$$

Оценка параметра S_x при малой выборки также бывает затруднительна. В [11] приведен следующий подход к назначению среднееквадратического отклонения в случае малых выборок: среднееквадратическое отклонение определяют из условия:

$$\int_{-\infty}^a \hat{f}_X(x, S_x) dx + \int_b^{+\infty} \hat{f}_X(x, S_x) dx = p(\alpha, n), \quad (6)$$

где $p(\alpha, n) = 1 - \alpha^{\frac{1}{n}}$, α – доверительная вероятность; $a = x_{\min} - \frac{1}{2N-2}(x_{\max} - x_{\min}) -$

нижняя граница изменчивости случайной величины; $b = x_{\max} + \frac{1}{2N-2}(x_{\max} - x_{\min}) -$

Функции распределения возможностей позволяют также сформировать р-блок в условиях неполной статистической информации. Наиболее широкое распространение в инженерно-строительной практике получили экспоненциальные граничные функции распределения возможностей с аналитическим видом:

$$\underline{F}_x(x) = \begin{cases} \exp\left[-\left(\frac{a_x - x}{b_x}\right)^2\right], & \text{если } x < a_x, \\ 1, & \text{если } x \geq a_x \end{cases}, \quad (9)$$

$$\overline{F}_x(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } x < a_x \\ 1 - \exp\left[-\left(\frac{a_x - x}{b_x}\right)^2\right], & \text{если } x \geq a_x \end{cases}. \quad (10)$$

где $a_x = 0,5 \cdot (x_{\max} + x_{\min})$ – условное «среднее»; $b_x = 0,5 \cdot (x_{\max} - x_{\min}) / \sqrt{-\ln \alpha}$ – мера «рассеяния», где $x_{\max}$ и $x_{\min}$ – наибольшее и наименьшее значение во множестве значений $\{x\}$ нечеткой переменной X , полученных из результатов измерений (испытаний); $\alpha \in [0; 1]$ – уровень среза (риска), значением которого задаются.

Введем обозначения $\delta_{4-6} \cdot \tilde{P} + N_{sw,4-6} = X$, $\tilde{\sigma}_{s,ult} \cdot A_{4-6} = Y$. Тогда математическую модель предельного состояния (8) можно записать в виде:

$$X \leq Y. \quad (11)$$

Т.к. в левой и правой частях неравенства (11) приведено по одной случайной величине, вероятность безотказной работы можно вычислить по формуле:

$$\begin{cases} \underline{P} = \int_0^{+\infty} \underline{f}_y(x) \cdot \overline{F}_x(x) dx \\ \overline{P} = \int_0^{+\infty} \overline{f}_y(x) \cdot \underline{F}_x(x) dx \end{cases}. \quad (12)$$

В случае если нагрузка описывается функциями распределения возможностей (9)-(10), а прочность стали описывается плотностью распределения, восстановленной методом ядерной оценки плотности (5), уравнения для расчета вероятности безотказной работы могут быть представлены в виде:

$$\begin{cases} \underline{P} = \int_0^{a_x} \frac{1}{S_y \cdot n \cdot \sqrt{2\pi}} \sum_{i=1}^n \exp\left[-\frac{(x-y_i)^2}{2 \cdot \underline{S}_y^2}\right] \cdot \exp\left[-\left(\frac{a_x - x}{b_x}\right)^2\right] dx + \int_{a_x}^{\infty} \frac{1}{S_y \cdot n \cdot \sqrt{2\pi}} \sum_{i=1}^n \exp\left[-\frac{(x-y_i)^2}{2 \cdot \underline{S}_y^2}\right] dx \\ \overline{P} = \int_0^{a_x} \frac{1}{S_y \cdot n \cdot \sqrt{2\pi}} \sum_{i=1}^n \exp\left[-\frac{(x-y_i)^2}{2 \cdot \underline{S}_y^2}\right] \cdot 0 dx + \int_{a_x}^{\infty} \frac{1}{S_y \cdot n \cdot \sqrt{2\pi}} \sum_{i=1}^n \exp\left[-\frac{(x-y_i)^2}{2 \cdot \underline{S}_y^2}\right] \left[1 - \exp\left[-\left(\frac{a_x - x}{b_x}\right)^2\right]\right] dx \end{cases}, \quad (13)$$

где $y_i = \sigma_{s,ult,i} \cdot A_{4-6}$ – i -е значение предельного продольного усилия $\tilde{N}_{ult}$; $S_y = S_{\sigma,s,ult} \cdot A_{4-6}$ – среднеквадратическое отклонение предельного продольного усилия.

Рассмотрим пример. Пусть по результатам обследования установлено, что стержень 4-6 фермы имеет сечение 80х80х4 с площадью поперечного сечения $A_{4-6} = 11,75 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$. Было получено 5 контрольных образцов стали стержня 4-6 по результатам испытаний которых получены следующие значения прочности $\tilde{\sigma}_{s,ult} = \{303; 305; 298; 310; 325\}$ МПа. Пусть оценка среднеквадратического отклонения прочности стали составляет $S_{\sigma,s,ult} \in [5; 15]$ МПа.

На основании вышеописанных данных можно получить 5 значений оценки предельного продольного усилия в стержне 4-6 по критерию прочности стали $\tilde{N}_{ult} = \{350,15; 356,03; 358,38; 364,25; 381,88\}$ кН. Оценка среднеквадратического отклонения предельного усилия составляет $S_{N,ult} = S_y = S_{\sigma,s,ult} \cdot A_{4-6} \in [5,86; 17,63]$ кН.

Пусть по результатам оценки усилия в стержне $\tilde{N}_{4-6}$ от нагрузки $\tilde{P}$ установлено, что $x_{\max} = 340$ и $x_{\min} = 300$ кН, тогда параметры функций распределения возможностей составят $a_x = 320$ кН, $b_x = 13,18$ кН при $\alpha = 0,10$.

Тогда по формуле (13) можно вычислить вероятность безотказной работы: $P \in [\underline{P}; \bar{P}] = [0,94610; 0,99999]$.

Вероятность безотказной работы $[0,94610; 0,99999]$ не говорит о низкой надежности элемента, а подразумевает широкий интервал неопределенности вследствие недостатка статистической информации. С практической точки зрения может быть принято два решения: усилить сечение элемента при имеющихся статистических данных, чтобы нижняя граница вероятности безотказной работы была близка к требуемому уровню надежности [15], или уменьшить неопределенность данных путем проведения дополнительных испытаний / измерений статистических данных случайных величин, что позволит сократить область р-блока и получить более узкие границы вероятности безотказной работы. Выбор решения будет зависеть от технико-экономического сравнения данных вариантов.

Уровень неопределенности (размытости) данных для нагрузки и усилия в стержне контролируется параметром α . Существуют различные рекомендации по его назначению [16]. Объективно он должен снижаться с ростом числа испытаний и повышение точности измерений. На рис. 2 приведена графическая зависимость нижнего уровня вероятности безотказной работы $\underline{P}$ для рассмотренного примера в зависимости от уровня среза (риска) α .

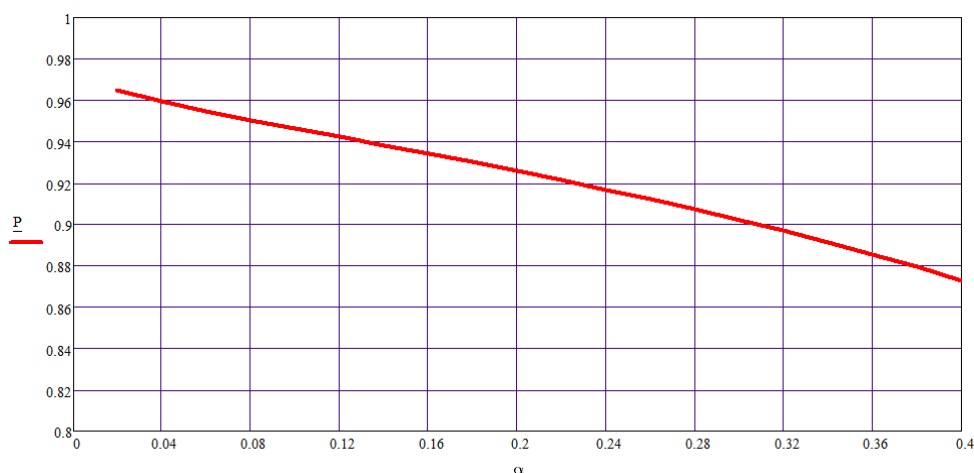


Рисунок 2 – Зависимость $\underline{P}$ - α для примера

Рост числа испытаний контрольных образцов стали сужает интервал оценки среднеквадратического отклонения $S_{\sigma,s,ult} \in [\underline{S}_{\sigma,s,ult}; \bar{S}_{\sigma,s,ult}]$, а также уточняет оцениваемую плотность распределения (5), что также приводит к росту нижней границы вероятности безотказной работы $\underline{P}$.

Выше описан подход к анализу надежности одного стержня фермы по критерию прочности материала. Для комплексной оценки надежности, каждый элемент фермы следует проверить на надежность по всем критериям работоспособности, предусмотренными

нормативными документами для расчетной ситуации (расчетная ситуация - учитываемый при расчете сооружений комплекс наиболее неблагоприятных условий, которые могут возникнуть при его возведении и эксплуатации, в соответствии с ГОСТ 27751-2014). Для центрально-сжатого элемента это прочность, устойчивость элемента в плоскости и из плоскости, гибкость. В результате будем иметь несколько интервалов надежности элемента по различным критериям предельных состояний. Т.к. наступление любого предельного состояния в элементе фермы можно считать критерием отказа всей фермы, то стержень фермы можно представить в виде условной последовательной системы, состоящей из элементов – значений надежности стержня по отдельным критериям предельного состояния $[P_i; \bar{P}_i]$. В соответствии с [17], надежность такой системы можно вычислить по формуле:

$$\begin{cases} \underline{P} = \max\left(0, \sum_{i=1}^n \underline{P}_i - (n-1)\right), \\ \bar{P} = \min(\bar{P}_i) \end{cases} \quad (14)$$

где $\underline{P}_i$ и $\bar{P}_i$ – нижняя и верхняя граница вероятности безотказной работы стержня фермы по i -му критерию работоспособности; n – число элементов (критериев) в последовательной системе.

Выводы

При неполной статистической информации о случайных величинах необходимо использовать новые теории анализа данных, т.к. принятие неподтвержденных статистических гипотез в рамках классических вероятностно-статистических методов может привести к ошибкам в оценке надежности элементов строительных конструкций. В статье рассмотрен метод анализа надежности стержней стальных ферм при комбинации положений теории возможностей и методов восстановления плотности случайной величины. Надежность в таком случае представлена в виде интервала значений, внутри которого находится действительное, но неизвестное вследствие недостатка данных, значение надежности.

Вероятность безотказной работы $[0,94610; 0,99999]$, полученная в численном примере, не отражает низкого уровня вероятности безотказной работы стержня фермы, а подразумевает широкий интервал неопределенности значений вследствие недостатка статистической информации. С практической точки зрения может быть принято два решения: усиление сечение элемента или изменение расчетной схемы при имеющихся статистических данных, чтобы нижняя граница вероятности безотказной работы была близка к проектному уровню надежности, или снижение эпистемологической неопределенности данных путем проведения дополнительных испытаний / измерений статистических данных случайных величин, что позволит сократить область р-блока и получить более узкие границы вероятности безотказной работы. Выбор решения будет зависеть от технико-экономического сравнения данных вариантов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pidong W., Zhang J., Hao Z., Jiwei Q. A new structural reliability index based on uncertainty theory // Chinese Journal of Aeronautics. 2017. No. 30(4). Pp. 1451-1458.
2. Savoia M. Structural reliability analysis through fuzzy number approach, with application to stability // Computers & Structures. 2002. Vol. 80. No. 12. Pp. 1087-1102.
3. Li H., Nie X. Structural reliability analysis with fuzzy random variables using error principle // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2018. Vol. 67. Pp. 91-99.
4. Ni Z., Qiu Z. Hybrid probabilistic fuzzy and non-probabilistic model of structural reliability // Computers & Industrial Engineering. 2010. Vol. 58. No. 3. Pp. 463-467.

5. Yang X., Liu Y., Ma P. Structural reliability analysis under evidence theory using the active learning kriging model // *Engineering Optimization*. 2017. Vol. 49. No. 11. Pp. 1922-1938.
6. Соколов В. А. Диагностика технического состояния конструкций зданий и сооружений с использованием методов теории нечетких множеств // *Инженерно-строительный журнал*. 2010. №.5. С. 31-37.
7. Rosenblatt M. Remarks on Some Nonparametric Estimates of a Density Function // *Annals of Mathematical Statistics*. 1956. No. 27. Pp. 832-837.
8. Parzen E. On Estimation of a Probability Density Function and Mode // *Annals of Mathematical Statistics*. 1962. No. 33. Pp. 1065-1076.
9. Węglarczyk S. Kernel density estimation and its application // *ITM Web of Conferences*. EDP Sciences. 2018. Vol. 23. Pp. 00037.
10. Silverman B.W. *Density Estimation for Statistics and Data Analysis*. London: Chapman & Hall/CRC, 1986. 45 p.
11. Pradlwater H.J, Schueller G.I. The use of Kernel densities and confidence intervals to cope with insufficient data in validation experiments // *Computer Methods and Applied Mechanics and Engineering*. 2008. No. 197. Pp. 2550-2560.
12. Соловьева А. А., Соловьев С. А. Исследование развития моделей случайных величин в расчетах надежности строительных конструкций при неполной статистической информации // *Вестник МГСУ*. 2021. Т. 16. №. 5. С. 587-607.
13. Saad A., Fruehwirth T., Gervet C. The p-box cdf-intervals: A reliable constraint reasoning with quantifiable information // *Theory and Practice of Logic Programming*. 2014. Vol. 14. No. 4-5. Pp. 461-475.
14. Уткин В. С., Уткин Л. В. Расчет надежности строительных конструкций при различных способах описания неполноты информации. Вологда: ВоГТУ, 2009. 126 с.
15. Paulpandian M. K. S. Application of reliability index in statistical model to assess durability of concrete made with plastic waste aggregates subjected to carbonation // *Environmental Science and Pollution Research*. 2022. Vol. 29. No. 12. Pp. 17456-17463.
16. Уткин В. С., Соловьев С. А., Ярыгина О. В. Расчет несущих элементов конструкций по заданному значению надежности при неполной статистической информации // *Строительство и реконструкция*. 2020. №.1. С. 81-91.
17. Гуров С.В., Уткин Л.В. Надежность систем при неполной информации. СПб: Любович, 1999. 166 с.

REFERENCES

1. Pidong W., Zhang J., Hao Z., Jiwei Q. A new structural reliability index based on uncertainty theory. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2017. No. 30(4). Pp. 1451-1458.
2. Savoia M. Structural reliability analysis through fuzzy number approach, with application to stability. *Computers & Structures*. 2002. Vol. 80. No. 12. Pp. 1087-1102.
3. Li H., Nie X. Structural reliability analysis with fuzzy random variables using error principle. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2018. Vol. 67. Pp. 91-99.
4. Ni Z., Qiu Z. Hybrid probabilistic fuzzy and non-probabilistic model of structural reliability. *Computers & Industrial Engineering*. 2010. Vol. 58. No. 3. Pp. 463-467.
5. Yang X., Liu Y., Ma P. Structural reliability analysis under evidence theory using the active learning kriging model. *Engineering Optimization*. 2017. Vol. 49. No. 11. Pp. 1922-1938.
6. Sokolov V.A. Diagnostika tekhnicheskogo sostoyaniya konstrukcij zdaniy i sooruzhenij s ispol'zovaniem metodov teorii nechetkih mnozhestv [Diagnostics of the technical condition of buildings and structures constructions using methods of the fuzzy sets theory]. *Magazine of Civil Engineering*. 2010. No.5. Pp. 31-37. (rus.)
7. Rosenblatt M. Remarks on Some Nonparametric Estimates of a Density Function. *Annals of Mathematical Statistics*. 1956. No. 27. Pp. 832-837.
8. Parzen E. On Estimation of a Probability Density Function and Mode. *Annals of Mathematical Statistics*. 1962. No. 33. Pp. 1065-1076.
9. Węglarczyk S. Kernel density estimation and its application. *ITM Web of Conferences*. EDP Sciences. 2018. Vol. 23. Pp. 00037.
10. Silverman B.W. *Density Estimation for Statistics and Data Analysis*. London: Chapman & Hall/CRC, 1986. 45 p.
11. Pradlwater H.J, Schueller G.I. The use of Kernel densities and confidence intervals to cope with insufficient data in validation experiments. *Computer Methods and Applied Mechanics and Engineering*. 2008. No. 197. Pp. 2550-2560.
12. Soloveva A.A., Solovev S.A. Issledovanie razvitiya modelej sluchajnyh velichin v raschetah nadezhnosti stroitel'nyh konstrukcij pri nepolnoj statisticheskoj informacii [A research into the development of models of random variables as part of the structural reliability analysis performed in the absence of some statistical information]. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2021. No. 16(5). Pp. 587-607. (rus.).

13. Saad A., Fruehwirth T., Gervet C. The p-box cdf-intervals: A reliable constraint reasoning with quantifiable information. *Theory and Practice of Logic Programming*. 2014. Vol. 14. No. 4-5. Pp. 461-475.
14. Utkin V. S., Utkin L. V. Raschet nadezhnosti stroitel'nyh konstrukcij pri razlichnyh sposobah opisaniya nepolnoty informacii [Structural reliability analysis with different approaches to describing the incompleteness of data]. Vologda: VoGTU, 2009. 126 p. (rus.).
15. Paulpandian M. K. S. Application of reliability index in statistical model to assess durability of concrete made with plastic waste aggregates subjected to carbonation // *Environmental Science and Pollution Research*. 2022. Vol. 29. No. 12. Pp. 17456-17463.
16. Utkin V.S., Solovyev S.A., Yarigina O.V. Structural elements design on reliability level in case limited statistical data. *Building and Reconstruction*. 2020. No. (1). Pp. 81-91. (rus.)
17. Gurov S.V., Utkin L.V. Nadezhnost' sistem pri nepolnoj informacii [Reliability of systems with limited information]. Saint-Petersburg: Lyubovich, 1999. 166 p. (rus.).

Информация об авторах:

Соловьева Анастасия Андреевна

ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет», г. Вологда, Россия,
аспирант, преподаватель кафедры промышленного и гражданского строительства.
E-mail: solovevaaa@vogu35.ru

Соловьев Сергей Александрович

ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет», г. Вологда, Россия,
кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства.
E-mail: solovevsa@vogu35.ru

Information about authors:

Soloveva Anastasia A.

Vologda State University, Vologda, Russia,
post-graduate student, lecturer the industrial and civil engineering department.
E-mail: solovevaaa@vogu35.ru

Solovev Sergey A.

Vologda State University, Vologda, Russia,
candidate of technical science, associated professor of the industrial and civil engineering department.
E-mail: solovevsa@vogu35.ru

Е.В. МИХАЙЛОВА¹

¹ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
г. Москва, Россия

АРХИТЕКТУРНО-ХУДОЖЕСТВЕННЫЕ РЕШЕНИЯ ОБЩЕСТВЕННО-ТОРГОВЫХ КОМПЛЕКСОВ ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ СОВЕТСКИХ КИНОТЕАТРОВ

Аннотация. В профессиональной среде архитекторов наблюдается озабоченность в связи с формированием тенденции реконструкции и реновации зданий и сооружений в крупных и крупнейших городах с целью развития городской инфраструктуры. Отмечается недооценённость вклада советской архитектуры в культурное наследие постсоветских стран и стран социалистического лагеря. При этом "новая архитектура" формирует городскую среду под стереотипы омологации, что не соответствует социокультурному запросу глокализации «цифровых кочевников», стремящихся жить в эко-цифровых городах. Устаревание "новой архитектуры" наблюдается уже на стадии проекта либо за пять лет. В Москве в программу реконструкции включены 39 советских кинотеатров в периферийной зоне города. На месте этих кинотеатров возводятся общественно-торговые комплексы (ОТК) с подземными уровнями. В статье проведена классификация типов проектов советских кинотеатров и торговых центров, а также сформированы диаграммы для их качественного сравнения. Это в итоге позволило оценить архитектурно-художественный вклад в московскую застройку как советских кинотеатров, так и новых торговых комплексов, преемственность между ними и отличия в принципах проектирования.

Ключевые слова: реконструкция, реновация, советский кинотеатр, общественно-торговый комплекс, архитектурно-художественное решение.

E.V. MIKHAYLOVA¹

¹National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

ARCHITECTURAL AND ARTISTIC SOLUTIONS OF THE OTC DURING THE GENTRIFICATION OF SOVIET CINEMAS

Abstract. In the professional environment of architects, there is concern about the formation of a trend of reconstruction and renovation of buildings and structures in large and major cities in order to develop urban infrastructure. The underestimation of the contribution of Soviet architecture to the cultural heritage of post-Soviet countries and countries of the socialist camp is noted. At the same time, the "new architecture" forms the urban environment under the stereotypes of homologation, which does not correspond to the socio-cultural demand of the glocalization of "digital nomads" seeking to live in eco-digital cities. The obsolescence of the "new architecture" is observed already at the project stage or in five years. In Moscow, the reconstruction program includes 39 Soviet cinemas in the peripheral zone of the city. Public and shopping complexes with underground levels are being built on the site of these cinemas. The article classifies the types of projects of Soviet cinemas and shopping centers, and also forms diagrams for their qualitative comparison. This eventually made it possible to evaluate the architectural and artistic contribution to the Moscow development of both Soviet cinemas and new shopping complexes, the continuity between them and differences in design principles.

Key words: reconstruction, gentrification, Soviet cinema, public and shopping complex, architectural and artistic solution.

Введение

В периферийной зоне города Москвы в 2017 году стартовала программа реконструкции московских советских кинотеатров¹ направленная на организацию на их месте общественно-торговых комплексов (ОТК) с подземной частью. В мировых архитектурных кругах тенденция реконструкции и реновации зданий и сооружений советской архитектуры в крупных и крупнейших городах вызывает озабоченность в связи с упрощением согласования разрешительной документации, а также перспективой потери части культурного наследия в постсоветских странах, а также странах социалистического лагеря [1, 2, 3]. В зарубежных и отечественных научных работах проводится анализ различных аспектов реконструкции и реновации следующих объектов: городской инфраструктуры [4], исторических общественно-торговых комплексов [5], театральных зданий (прообраз кинотеатров) [6], промышленных объектов [6, 7, 8], жилой застройки [9, 10]. Вместе с тем исследования, посвящённые различным аспектам архитектурной среды при реконструкции советских кинотеатров в ОТК, отсутствуют.

В рассмотренных исследованиях подчёркивается высокая степень недооценённости наследия советской архитектуры, а также уничтожение её образцов в условиях капиталистических принципов развития крупных и крупнейших городов [11]. Для оправдания правомерности такого отношения делается упор на широкое внедрение типового строительства в советской архитектуре, но как говорил архитектор И.В. Жолтовский "На наш взгляд, типовым должно называться только самое лучшее, из лучшего лучшее. А у нас ещё многие смотрят на типовое как на нечто второстепенное или в лучшем случае среднее" [12]. Таким образом, глубокое изучение культурного наследия, историческая связность в архитектурном процессе во времени позволяет сохранить культурное наследие страны.

"Новая архитектура" в условиях современной финансовой системы формирует глобальные города под общие клише омологации, что делает любой город похожим на все остальные [13]. Это тенденция не отвечает запросу мирового процесса глокализации как новой парадигмы архитектуры, которая берёт за основу приспособление западных ценностей и культурных стандартов к специфике местной культуры в том или ином регионе мира [14]. Развитие же "новой архитектуры" на основе реконструкции, в виде сноса существующих зданий, поднимает проблему устаревания её архитектурно-планировочных решений уже на стадии проекта либо в течение пяти лет [15]. Следовательно, для сохранения актуальности во времени "новой архитектуры" нужно в крупных и крупнейших городах отвечать запросам глокализации в форме ориентации на развитие местных социокультурных образцов.

Мировые процессы цифровизации экономики влияют на все стадии проектирования, строительства и эксплуатации зданий и сооружений [16, 17]. Например, на основе развития "Big Data" (Большие Данные) и "Deep learning" (Глубокое обучение) разработана "Siamese neural network" (Сиамская нейронная сеть) позволяющая объединить социальные и физические показатели реконструкции для её идентификации в городах [18]. Таким образом, процессы глобальной цифровизации направлены на дальнейшее развитие и внедрение в архитектурную практику "Artificial intelligence" (Искусственный интеллект).

Социальные изменения в условиях мировой глобальной цифровизации привели к формированию нового образа жизни населения крупных и крупнейших городов в виде "цифровых кочевников" в эко-цифровых городах [14]. Соответственно, в современном градостроительстве на первый план выходят два основных процесса связанные с цифровизацией городской среды на фоне повышением её рекреационного потенциала (ландшафтно-рекреационные пространства (ЛРП)) [19].

¹постановление Правительства Российской Федерации от 28 октября 1995 г. N 1037 "О мерах по сохранению и развитию проката отечественных фильмов и повышению уровня кинообслуживания населения" [Электронный ресурс]. URL: <http://government.ru/docs/all/25266/?page=2> (дата обращения: 19.05.2023).

В рамках исследовательской работы использованы следующие открытые источники информации: нормативно-правовая база, статьи, научные публикации, Интернет-ресурс. Проведены натурные обследования сохранившихся советских кинотеатров и возведённых комплексов, что позволило собрать более полную информацию об их архитектурно-художественных решениях. На базе полученных данных разработаны две классификации по фасадным решениям советских кинотеатров и центров, а также созданы диаграммы для сравнения между этими классификациями, которая позволила сравнить их архитектурно-художественный вклад в городскую среду, преемственность между ними и отличия.

Классификация проектов реконструируемых советских кинотеатров и проектных решений ОТК

В результате анализа архитектурно-художественных решений советских кинотеатров Москвы, которые подпали под программу реконструкции, проведено их исследование и классификация [12, 20]:

1 тип. **СТИЛОБАТ**. К данному типу кинотеатров относится типовая серия широкоэкранных кинотеатров на 800 мест проект 2-06-60 Центрального института типовых проектов (1965 год) (Рис. 1). Архитектурно-планировочное решение зданий советских кинотеатров имеют двухярусное членение на стилобат и основной объём. Решение стилобата кинотеатров в виде колоннады с остеклением отвечает архитектурно-художественной идее визуальной связи интерьера здания с его экстерьером. Массивные глухие стены основного объёма кинотеатров создают контраст с остеклённым основанием здания. Индивидуальность проектов достигается за счёт широкой вариативности в пластическом оформлении главного фасада кинотеатров. Сплошные стены их основного объёма оформляются с помощью декоративно-прикладного искусства часто задавая ведущий архитектурный мотив: панно (к/т. "Волга"), рельефы (к/т. "Нева"), мозаики (к/т. "Орбита"), скульптурные вставки (к/т. "Комсомолец"), а также усложнения пластики фасадов необычной кирпичной кладкой (к/т. "Ангара"), устройством узких оконных проёмов (к/т. "Таллин"). Наряду с этим во всех кинотеатрах варьируются шрифтовые решения названий и их композиции на фасаде (к/т. "Высота"). К данному типу кинотеатров принадлежит почти половина (46%) из попадающих под реконструкцию кинотеатров Москвы. Все кинотеатры данной типовой серии планируются к сносу.



Рисунок 1 - тип Стилобат - кинотеатр "Волга".¹

¹https://yandex.ru/images/search?cbir_id=4330655%2F2unHYIE6Re2cITimHzZOuA5621&cbir_page=similar&img_url=https%3A%2F%2Favatars.dzeninfra.ru%2Fget-zen_doc%2F1587860%2Fpub_5da1bb638d5b5f00b0d8f697_5da1bcbe3d008800b119e775%2Fscale_1200&lr=213&pos=0&rpt=imageview&url=https%3A%2F%2Favatars.mds.yandex.net%2Fget-images-cbir%2F4330655%2F2unHYIE6Re2cITimHzZOuA5621%2Forig

2 тип. **БАЛКОН.** Название "балкон на помещениях" получила типовая серия "Московский" проект широкоформатных кинотеатров на 1400 мест (1961 год) (Рис. 2). Данный типовой проект был разработан на базе первого в СССР широкоформатного кинотеатра "Россия" архитекторов Ю. Швердяева, Э. Гаджинского и Д. Солопова. Объёмно-планировочное решение данного типа кинотеатров предполагает диагональный вынос монолитного объёма зрительного зала над стеклянным элементом фойе и вестибюля. Прозрачные стены позволяют объединить интерьер и экстерьер зданий. Такое пространственное решение перекликается с архитектурной концепцией выносных консолей "зубцов шестерёнки" в зале клуба им. Русакова архитектора К.Мельникова, являющегося шедевром авангарда (1927-1929). Индивидуальность в архитектурно-композиционном решении советских кинотеатров обеспечивается разработкой уникального для каждого кинотеатра шрифтового дизайна вывески и её композиционного решения (к/т. "Варшава"), наряду с этим применяются скульптурные вставки (к/т. "Витязь"), узкие оконные проёмы (к/т. "Эльбрус"), открытые лестницы (к/т. "Киргизия"). К данной типовой серии от общего числа реконструируемых московских кинотеатров относится 13% зданий, и они, кроме к/т. "Варшава", подлежат к сносу.



Рисунок 2 - тип Балкон - кинотеатр "Витязь".¹

3 тип. **ПОРТАЛ.** Типовой проект И-732 широкоформатных кинотеатров на 800 и 300 мест разработан проектной организацией МНИИТЭП (1981 год) (Рис. 3). Архитектурно-пространственное решение советских кинотеатров имеет монументальный вытянутый по горизонтали монолитный объём с заглублённым ступенчатым массивным порталом, внутри которого сплошное остекление. Художественная идея главного фасада кинотеатров базируется на контрасте материалов бетона и стекла, а также массы портала и плоскости остекления. Сплошное остеклением обеспечивает визуальную связь интерьера здания с его экстерьером. Архитектурная идея с заглублением портала фасада на здании впервые была использована в проекте к/т. "Родина" (1938 год), который также подпал под программу реконструкции (см. 6 тип). В данном типе кинотеатров варьируется организация ландшафта на уровне земли с помощью многоуровневых композиций из подпорных стенок и ступеней (к/т. "Будапешт"). В кинотеатрах также индивидуально разрабатываются шрифтовые решения вывесок названий и их композиции на фасаде (к/т. "Аврора"). Данный тип кинотеатров составляет 10% от объёма реконструкции и подлежит демонтажу.

¹https://yandex.ru/images/search?cbir_id=3906021%2F8W4LKCIVogyks_8zW7xm6A5692&cbir_page=similar&img_url=https%3A%2F%2Fsun9-64.userapi.com%2FsqQ2oAHMr-nL9g9Q1mvnCN0dry1nrzn-_-IrWw%2FNjvRsW2GI_M.jpg&lr=213&pos=2&rpt=imageview&url=https%3A%2F%2Favatars.mds.yandex.net%2Fget-images-cbir%2F3906021%2F8W4LKCIVogyks_8zW7xm6A5692%2Forig



Рисунок 3 - тип Портал - кинотеатр "Будапешт".¹

4 тип. **ТУМБА.** Этот типовой проект широкоэкранных кинотеатров на 1060 мест называется Ленинградский проект, первая серия архитекторы О.Гурьев, В. Фромзель, А. Чиж (1959 год) (Рис. 4). Архитектурное решение кинотеатров представляет собой массивный параллелепипед с перфорацией проёмами в нижней части здания. За основу был взят проект кинотеатра "Прогресс" в Москве (1962 год). Индивидуальность в советских кинотеатрах достигается применением в верхней части ряда окон-люкарн (к/т. "Рассвет"), кирпичного орнамента на фасадах, разработкой шрифтового дизайна названия кинотеатров. В программу реконструкции с дальнейшим сносом попал только один из трёх кинотеатров такого типа в Москве к/т. "Рассвет".



Рисунок 4 - тип Тумба - кинотеатр "Рассвет"(реконструкция 90-х годов).²

5 тип. **ЯЧЕЙКИ.** К нему относится типовой проект X-13 двухзального кинотеатра на 1200 мест (1969 год) (Рис. 5). Архитектурно-планировочное решение данных кинотеатров представлено вытянутой формой, разбитой по горизонтали, которая имеет членения в виде ячеек разных пропорций. Эстетический уровень фасадов зданий повышался уникальным

¹[https://yandex.ru/images/search?cbir_id=4456510%2FJyHMHdDODqNc8ObiI882uw5997&cbir_page=similar&img_url=https%3A%2F%2Fcdn4.telegram-cdn.org%2Ffile%2Fd1Z0Iuu9moMAU-T0_ShjdAhp0I8_EHxVQUCPAZTYtUj-Lii2JMBsNO0gS-](https://yandex.ru/images/search?cbir_id=4456510%2FJyHMHdDODqNc8ObiI882uw5997&cbir_page=similar&img_url=https%3A%2F%2Fcdn4.telegram-cdn.org%2Ffile%2Fd1Z0Iuu9moMAU-T0_ShjdAhp0I8_EHxVQUCPAZTYtUj-Lii2JMBsNO0gS-Cw4AL2qUwIsGjE9Q3bcmyaGw7JJc5JpTLwTEcTK3PutqBI4Os63yYesLH9z5BA648zbq1KBkldVlfnxX4a0QBUL9j5eMvWgXsfoxH7ilKIwKOiXqVsmaglvG_002NK3MmbhI7I6Tb0hVXkfWhop4I5L9tb2zwONYTgZDEeU_TKujRo vV-H0hTO7QcOt7gx4A4P2cwFjjLTQfCAeeXcvf1y3MrPEAn8Z2aLkD6gPNOvubbl5GV2LHd3xiCQ0XT51dtfr0a3ogEQ8Vb0qKdsWqoT6D_AbA.jpg&lr=213&pos=0&rpt=imageview&url=https%3A%2F%2Favatars.mds.yandex.net%2Fget-images-cbir%2F4456510%2FJyHMHdDODqNc8ObiI882uw5997%2Forig)

[Cw4AL2qUwIsGjE9Q3bcmyaGw7JJc5JpTLwTEcTK3PutqBI4Os63yYesLH9z5BA648zbq1KBkldVlfnxX4a0QBUL9j5eMvWgXsfoxH7ilKIwKOiXqVsmaglvG_002NK3MmbhI7I6Tb0hVXkfWhop4I5L9tb2zwONYTgZDEeU_TKujRo vV-](https://yandex.ru/images/search?cbir_id=4456510%2FJyHMHdDODqNc8ObiI882uw5997&cbir_page=similar&img_url=https%3A%2F%2Fcdn4.telegram-cdn.org%2Ffile%2Fd1Z0Iuu9moMAU-T0_ShjdAhp0I8_EHxVQUCPAZTYtUj-Lii2JMBsNO0gS-Cw4AL2qUwIsGjE9Q3bcmyaGw7JJc5JpTLwTEcTK3PutqBI4Os63yYesLH9z5BA648zbq1KBkldVlfnxX4a0QBUL9j5eMvWgXsfoxH7ilKIwKOiXqVsmaglvG_002NK3MmbhI7I6Tb0hVXkfWhop4I5L9tb2zwONYTgZDEeU_TKujRo vV-H0hTO7QcOt7gx4A4P2cwFjjLTQfCAeeXcvf1y3MrPEAn8Z2aLkD6gPNOvubbl5GV2LHd3xiCQ0XT51dtfr0a3ogEQ8Vb0qKdsWqoT6D_AbA.jpg&lr=213&pos=0&rpt=imageview&url=https%3A%2F%2Favatars.mds.yandex.net%2Fget-images-cbir%2F4456510%2FJyHMHdDODqNc8ObiI882uw5997%2Forig)

[H0hTO7QcOt7gx4A4P2cwFjjLTQfCAeeXcvf1y3MrPEAn8Z2aLkD6gPNOvubbl5GV2LHd3xiCQ0XT51dtfr0a3ogEQ8Vb0qKdsWqoT6D_AbA.jpg&lr=213&pos=0&rpt=imageview&url=https%3A%2F%2Favatars.mds.yandex.net%2Fget-images-cbir%2F4456510%2FJyHMHdDODqNc8ObiI882uw5997%2Forig">8Vb0qKdsWqoT6D_AbA.jpg&lr=213&pos=0&rpt=imageview&url=https%3A%2F%2Favatars.mds.yandex.net%2Fget-images-cbir%2F4456510%2FJyHMHdDODqNc8ObiI882uw5997%2Forig](https://yandex.ru/images/search?cbir_id=4456510%2FJyHMHdDODqNc8ObiI882uw5997&cbir_page=similar&img_url=https%3A%2F%2Fcdn4.telegram-cdn.org%2Ffile%2Fd1Z0Iuu9moMAU-T0_ShjdAhp0I8_EHxVQUCPAZTYtUj-Lii2JMBsNO0gS-Cw4AL2qUwIsGjE9Q3bcmyaGw7JJc5JpTLwTEcTK3PutqBI4Os63yYesLH9z5BA648zbq1KBkldVlfnxX4a0QBUL9j5eMvWgXsfoxH7ilKIwKOiXqVsmaglvG_002NK3MmbhI7I6Tb0hVXkfWhop4I5L9tb2zwONYTgZDEeU_TKujRo vV-H0hTO7QcOt7gx4A4P2cwFjjLTQfCAeeXcvf1y3MrPEAn8Z2aLkD6gPNOvubbl5GV2LHd3xiCQ0XT51dtfr0a3ogEQ8Vb0qKdsWqoT6D_AbA.jpg&lr=213&pos=0&rpt=imageview&url=https%3A%2F%2Favatars.mds.yandex.net%2Fget-images-cbir%2F4456510%2FJyHMHdDODqNc8ObiI882uw5997%2Forig)

²https://yandex.ru/images/search?cbir_id=40694%2FbKnSwTCGbM9tfDbr8nERhw6053&cbir_page=similar&img_url=https%3A%2F%2Fphotos.wikimapia.org%2Fp%2F00%2F06%2F81%2F13%2F73_big.jpg&lr=213&pos=0&rpt=imageview&url=https%3A%2F%2Favatars.mds.yandex.net%2Fget-images-cbir%2F40694%2FbKnSwTCGbM9tfDbr8nERhw6053%2Forig



Рисунок 6 - тип Индивидуальный проект - кинотеатр "Родина"¹



Рисунок 7 - тип Индивидуальный проект - кинотеатр "Ладога" (реконструкция 90-х годов)²



Рисунок 8 - тип Индивидуальный проект - кинотеатр "Баку"³

Для этого центрам придаётся скруглённая вытянутая по горизонтали форма, которая разделена по высоте на три части (снизу вверх): сплошное остекление символизирующее воду с поднимающейся волной, глухой объём создающий борт корабля с палубой, надстройка/и как корабельная рубка/и. Глухой объём фасада-борта ОТК перфорирован узкими горизонтальными нишами-светильниками, светящимися в ночное время, символизирующими брызги воды и пену. Сплошное остекление нижней части здания стирает границы между интерьером и экстерьером. Вариателность фасадам комплексов в пластических решениях входной группы придаёт угловой (к/т. "Высота") (Рис. 9) либо фронтальный (к/т. "Ангара") (Рис.10) "подъём волны" в решении сплошного остекления. Наряду с этим общий объём здания центров может также иметь усечённый угол (к/т. "Орбита") (Рис.11). Для развития ЛРП на уровне "квартала" в некоторых комплексах на эксплуатируемой кровле-палубе предусмотрены кадки с деревьями, которые благоприятно сказываются на художественном образе зданий (к/т. "Ангара") [19]. Новые ОТК принимают на себя названия соответствующих реконструируемых советских кинотеатров, а также сохраняется оригинальный дизайн вывесок названий кинотеатров в трёх четвертях

¹https://yandex.ru/images/search?cbir_id=2993727%2FiZQliit1baq_516tKwhSiA6215&cbir_page=similar&img_url=https%3A%2F%2Fsmolbattle.ru%2Fdata%2Fattachments%2F1066%2F1066994-f4cb6fce453401ed6fe6113b0041d017.jpg&lr=213&pos=1&rpt=imageview&url=https%3A%2F%2Favatars.mds.yandex.net%2Fget-images-cbir%2F2993727%2FiZQliit1baq_516tKwhSiA6215%2Forig

²https://yandex.ru/images/search?cbir_id=4224336%2FNEcF40It5ETIWzZSEBj_6A6313&cbir_page=similar&img_url=https%3A%2F%2Fic.pics.livejournal.com%2Fevgechesnokov%2F63434167%2F4840302%2F4840302_original.jpg&lr=213&pos=0&rpt=imageview&url=https%3A%2F%2Favatars.mds.yandex.net%2Fget-images-cbir%2F4224336%2FNEcF40It5ETIWzZSEBj_6A6313%2Forig

³https://retromap.ru/show_pid.php?pid=30420

комплексов (85%) (к/т. Бирюсинка). Остальные центры находятся на стадии проектирования и ещё можно изменить шрифт букв (к/т. "Улан-Батор"), другой дизайн названия в реализованных ОТК "Нева" и "Экран". Из реконструируемых советских кинотеатров данное архитектурно-художественное решение имеют более трёх четверных зданий центров (85%).



Рисунок 9 - тип Корабль с угловой "волной" - комплекс "Высота"¹



Рисунок 10 - тип Корабль с фронтальной "волной" - центр "Ангара"²



Рисунок 11 - тип Корабль с усечённым углом - центр "Орбита"³

2 тип **ИНДИВИДУАЛЬНЫЙ ПРОЕКТ**. Такие проекты предполагают как частичную реконструкцию советских кинотеатров (к/т. "Родина", "Звёздный", "Варшава"), так и новое строительство на их месте торговых центров (к/т. "Саяны", "Восход", "Комсомолец") (Рис. 12). Стилистически архитектурно-художественное решение новых ОТК данного типа очень схожи с первым типом "Корабль", но имеют некоторые индивидуальные отличия. К этому архитектурному типу относятся 15% комплексов из реконструируемых советских кинотеатров в Москве.



Рисунок 12 - тип Индивидуальный проект - ОТК "Саяны"¹

¹<https://apmvesnina.ru/>

²<https://newizv.ru/news/2022-01-21/seans-s-riskom-dlya-zhizni-pochemu-moskvichi-protestuyut-protiv-perestroyki-kinoteatrov-345724>

³https://www.mos.ru/upload/newsfeed/news/Orbita_5.jpg

Результаты и обсуждение

На основе классификаций проектов реконструируемых советских кинотеатров и проектных решений ОТК составлена их сравнительная диаграмма (Рис. 13).

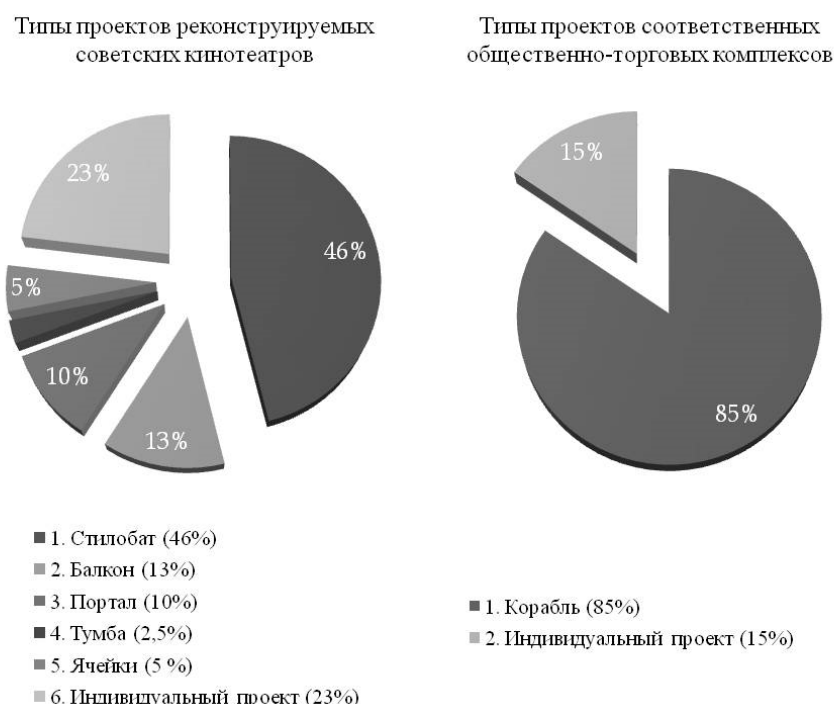


Рисунок 13 - Процентное соотношение различных типов проектов в реконструируемых советских кинотеатрах и в соответствующих ОТК

Выводы

Проведён сравнительный анализ архитектурно-художественных решений советских кинотеатров с пространственными решениями комплексов после реконструкции:

1. Наблюдается снижение архитектурно-эстетического уровня городской среды периферийных районов Москвы за счёт сокращения в три раза вариантности архитектурно-планировочных решений торговых центров при реконструкции советских кинотеатров. При проектировании кинотеатров использовано пять типов типовых проектов, а при решении ОТК всего один, при этом количество зданий кинотеатров по индивидуальным проектам составляет 23%, а в комплексах уменьшено до 15%.

2. Преемственность фасадных решений между советскими кинотеатрами и центрами прослеживается в применении панорамного остекления в нижней части зданий для

¹https://yandex.ru/images/search?cbir_id=3569495%2FQyKv6fYwFf-i1qtKzYx7PA7297&cbir_page=similar&img_url=https%3A%2F%2Fcdn4.telegram-cdn.org%2Ffile%2FtHaMbliX14ug3VPL3ZgngDWmzqtieqa9btn0JRDmWf82De3rCb-wllXEWBSPWvLACv_EAWfdZZx1n8X0YeVv3foP9mERQJr3GZyXqfQoE0pD9SdRMr0AE2BdNfi3xN9Ebzg2ZmeXNkP_0tHyolonuhVTeXUld40Vvd7tOaQbJb5D7ELhHEqrbO8J0g1DGiXra59BIRWlu24YSQPf0nRbyxiuAmcOi9QG2p9o7IXR3sTRT1-kRl3-CZ4fMpFZOKHWvPXUd77yp_enuHBfidf9OyfRy-Oi1wVXOYqzXMPtCAJl0P1cFMvLi2S3pcipqOtY2dzzlS2obaa5lOcOjxmn0Q.jpg&lr=213&ogl_url=https%3A%2F%2Fcdn4.telegram-cdn.org%2Ffile%2FtHaMbliX14ug3VPL3ZgngDWmzqtieqa9btn0JRDmWf82De3rCb-wllXEWBSPWvLACv_EAWfdZZx1n8X0YeVv3foP9mERQJr3GZyXqfQoE0pD9SdRMr0AE2BdNfi3xN9Ebzg2ZmeXNkP_0tHyolonuhVTeXUld40Vvd7tOaQbJb5D7ELhHEqrbO8J0g1DGiXra59BIRWlu24YSQPf0nRbyxiuAmcOi9QG2p9o7IXR3sTRT1-kRl3-CZ4fMpFZOKHWvPXUd77yp_enuHBfidf9OyfRy-Oi1wVXOYqzXMPtCAJl0P1cFMvLi2S3pcipqOtY2dzzlS2obaa5lOcOjxmn0Q.jpg&pos=1&rlt_url=https%3A%2F%2Fwww.arendator.ru%2Fdata%2Fphotos%2Fobjects%2F50%2F50197%2Fabc-photo-118405764_1280x0.jpeg&rpt=imageview&url=https%3A%2F%2Favatars.mds.yandex.net%2Fget-images-cbir%2F3569495%2FQyKv6fYwFf-i1qtKzYx7PA7297%2Forig

интеграции пространства улицы в интерьер, в использовании на фасадах архитектурного приёма контраст (масса-пространство, бетон-стекло), а также в заимствовании исторического названия места вместе с индивидуальным шрифтовым дизайном для новых вывесок названий ОТК.

3. Наблюдается историческая связность, целостность архитектурных процессов во времени между архитектурно-пространственными решениями советских кинотеатров. Вместе с тем в сформированных на основе их реконструкции комплексах она не имеет явного проявления, приводя к сокращению разнообразия архитектурно-пространственных решений ОТК, что не способствует выработке своего уникального художественного образа городской среды.

4. В архитектурно-художественных решениях советских кинотеатров широко используются пластические решения на основе декоративно-прикладного искусства, направленные на раскрытие смысла их названий, а в эстетике комплексов данный приём отсутствует, не позволяя внести большую вариабельность в фасадных решениях комплексов.

5. Актуальное в современных экологических условиях крупных и крупнейших городов озеленение на эксплуатируемых кровлях ОТК позволяет расширить ЛРП на уровне городских кварталов, а также повысить эстетический образ комплексов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воличенко О., Цурик Т. Двойственность отношения к исторической городской застройке // Проект байкал. 2023. № 20(75). С. 68-73. <https://doi.org/10.51461/pb.75.16> [Электронный ресурс]. URL: <https://projectbaikal.com/index.php/pb/article/view/2033/2748> (дата обращения: 11.08.2023).
2. Meerovich M. Сносить нельзя реконструировать // Проект Байкал. 2017. № 14(53). С. 78–84. <https://doi.org/10.7480/projectbaikal.53.1221> [Электронный ресурс]. URL: <https://projectbaikal.com/index.php/pb/article/view/1221/1211> (дата обращения: 10.06.2023).
3. Havel M.B.. Neoliberalization of urban policy-making and planning in post-socialist Poland – A distinctive path from the perspective of varieties of capitalism. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2022.103766> [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264275122002050> (дата обращения: 21.10.2023).
4. Bolzoni M., Semi G. Adaptive urbanism in ordinary cities: Gentrification and temporalities in Turin (1993–2021). <https://doi.org/10.1016/j.cities.2022.104144> [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264275122005832> (дата обращения: 05.09.2023).
5. Прокофьева И.А. Общественно-торговые сооружения в структуре исторического центра Москвы и Парижа. Принципы преемственности и развития // Жилищное строительство. 2021. № 3. С. 25–32. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2021-3-25-32>.
6. Anisimov A. Послевоенная реконструкция театральных зданий: 1945–2020 // Проект Байкал. 2020. Т. 66. С. 105-113. <https://doi.org/10.51461/projectbaikal.66.1726> [Электронный ресурс]. URL: <https://projectbaikal.com/index.php/pb/article/view/1726> (дата обращения: 23.06.2023).
7. Агеева Е.Ю., Гоголева Н.А. Реновация водонапорных башен: типологический анализ // Жилищное строительство. 2019. № 1–2. С. 19–29. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2019-1-2-19-29> [Электронный ресурс]. URL: <https://journal-hc.ru/index.php/ru/zhurnaly/2019/vse-stati-za-2019/renovatsiya-vodonapornykh-bashen-tipologicheskij-analiz> URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/renovatsiya-vodonapornykh-bashen-tipologicheskij-analiz/viewer> (дата обращения: 05.07.2023).
8. Нащокина М. Старый пром - XXI: два подхода // Проект Байкал. 2022. № 19(73). С. 68-79. <https://doi.org/10.51461/pb.7312> [Электронный ресурс]. URL: <https://projectbaikal.com/index.php/pb/article/view/1946> (дата обращения: 25.07.2023).
9. Zhan Y. Beyond neoliberal urbanism: Assembling fluid gentrification through informal housing upgrading programs in Shenzhen, China. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2021.103111> [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264275121000093> (дата обращения: 15.10.2023).
10. Grigoryeva E. (2017). Реновации // Проект Байкал. 2017. № 14(53). С. 71-71. <https://doi.org/10.7480/projectbaikal.53.1218> [Электронный ресурс]. URL: <https://projectbaikal.com/index.php/pb/article/view/1218> (дата обращения: 29.07.2023).
11. Krivý M. “Post-Apocalyptic Wasteland” or “Digital Ecosystem”? Postsocialist Ecological Imaginaries in Tallinn, Estonia. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2021.07.007> [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016718521002037> (дата обращения: 09.10.2023).

12. Московские кинотеатры советского времени, 2020 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.calameo.com/read/0055263808ffb36a763d1> (дата обращения: 23.06.2023).
13. Мериджи М. Клише, неудачи и перспективы "новой архитектуры" // Архитектура и строительство России. 2021. Март. С. 53-60 [Электронный ресурс]. URL: http://www.asrmag.ru/1-2021/ASR-1-2021_Meriggi.pdf (дата обращения: 29.09.2023).
14. Насирдинова А. Глокализации цифровых кочевников // Проект байкал. 2022. №19 (71), 100-103. DOI: [10.51461/projectbaikal.71.1947](https://doi.org/10.51461/projectbaikal.71.1947) [Электронный ресурс]. URL: <https://projectbaikal.com/index.php/pb/article/view/2079> (дата обращения: 24.05.2023).
15. Мякота А. Концепция реновации Норильска // Проект Байкал. 2022. 19(72). С. 86-95 [Электронный ресурс]. URL: <https://projectbaikal.com/index.php/pb/article/view/2115> (дата обращения: 22.05.2023).
16. Михайлова Е.В. Влияние цифровизации экономики на социально-экономические аспекты развития общественно-торговых центров с многоуровневыми подземными структурам в крупных и крупнейших городах // Инновации и инвестиции. 2022. N4. С. 120-124 [Электронный ресурс]. URL: http://innovazia.ru/archive/?ELEMENT_ID=33904 (дата обращения: 01.07.2023).
17. Михайлова Е.В. Перспективы внедрение VR/AR-технологий в архитектурную среду общественно-торговых комплексов с подземными ярусами в крупных и крупнейших городах в условиях активного развития иммерсионных пространств / Е.В. Михайлова // Инновации и инвестиции. 2022. N7. С. 94-97. [Электронный ресурс]. URL: http://innovazia.ru/archive/?ELEMENT_ID=35387 (дата обращения: 13.06.2023).
18. Thackway W., Ng M., Lee C.-L., Pettit C.. Implementing a deep-learning model using Google street view to combine social and physical indicators of gentrification. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2023.101970> [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0198971523000339> (дата обращения: 22.07.2023).
19. Енин А.Е., Грошева Т.И. Системный подход к реконструкции ландшафтно-рекреационных пространств // Строительство и реконструкция. 2017. №4. С. 101-109.
20. Иванова Д.Е. Типовые кинотеатры советского модернизма. Визуальное исследование, 2017 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.calameo.com/read/005425639a0bc64051072> (дата обращения: 05.08.2023).
21. Место встречи бизнеса и покупателей [Электронный ресурс]. URL: <https://www.adgggroup.ru> (дата обращения: 18.06.2023).
22. Место встречи бизнеса и покупателей [Электронный ресурс]. URL: <https://adg-leasing.ru> (дата обращения: 18.06.2023).

REFERENCES

1. Volichenko O., Tsurik T. Duality of attitude to historical urban development. *Baikal Project*. 2023. 20(75) Pp. 68-73. <https://doi.org/10.51461/pb.75.16> [Electronic resource]. URL: <https://projectbaikal.com/index.php/pb/article/view/2033/2748> (accessed: 08/11/2023).
2. Meerovich M. Demolish cannot be reconstructed. *Baikal Project*. 2017. 14(53). Pp. 78-84. <https://doi.org/10.7480/projectbaikal.53.1221> [Electronic resource]. URL: <https://projectbaikal.com/index.php/pb/article/view/1221/1211> (accessed: 10.06.2023).
3. Havel M.B. Neoliberalization of urban policy-making and planning in post-socialist Poland – A distinctive path from the perspective of varieties of capitalism. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2022.103766> [Electronic resource]. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264275122002050> (accessed: 10/21/2023).
4. Bolzoni M., Semi G.. Adaptive urbanism in ordinary cities: Gentrification and temporalities in Turin (1993–2021). <https://doi.org/10.1016/j.cities.2022.104144> [Electronic resource]. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264275122005832> (date of reference: 05.09.2023).
5. Prokofieva I.A. Public and commercial buildings in the structure of the historical center of Moscow and Paris. Principles of continuity and development. *Housing construction*. 2021. No. 3. Pp. 25-32. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2021-3-25-32>.
6. Anisimov A. Post-war reconstruction of theater buildings: 1945-2020. *Baikal Project*. 2020. (66). Pp. 105-113. <https://doi.org/10.51461/projectbaikal.66.1726> [Electronic resource]. URL: <https://projectbaikal.com/index.php/pb/article/view/1726> (accessed: 06/23/2023).
7. Ageeva E.Yu., Gogoleva N.A. Renovation of water towers: typological analysis. *Housing construction*. 2019. No. 1-2. Pp. 19-29. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2019-1-2-19-29> [Electronic resource]. URL: <https://journal-hc.ru/index.php/ru/zhurnaly/2019/vse-stati-za-2019/renovatsiya-vodonapornykh-bashen-tipologicheskij-analiz> URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/renovatsiya-vodonapornykh-bashen-tipologicheskij-analiz/viewer> (accessed: 05.07.2023).

8. Nashchokina M. Old prom - XXI: two approaches. *Baikal Project*. 2022. 19(73). Pp. 68-79. <https://doi.org/10.51461/pb.7312> [Electronic resource]. URL: <https://projectbaikal.com/index.php/pb/article/view/1946> (accessed: 07/25/2023).
9. Zhan Y. Beyond neoliberal urbanism: Assembling fluid gentrification through informal housing upgrading programs in Shenzhen, China. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2021.103111> [Electronic resource]. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264275121000093> (accessed: 10/15/2023).
10. Grigoryeva E. Renovation. *Baikal Project*. 2017. 14(53). Pp. 71-71. <https://doi.org/10.7480/projectbaikal.53.1218> [Electronic resource]. URL: <https://projectbaikal.com/index.php/pb/article/view/1218> (accessed: 29.07.2023).
11. Krivý M. "Post-Apocalyptic Wasteland" or "Digital Ecosystem"? Postsocialist Ecological Imaginaries in Tallinn, Estonia. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2021.07.007> [Electronic resource]. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016718521002037> (accessed: 09.10.2023).
12. Moscow cinemas of the Soviet era, 2020 [Electronic resource]. URL: <https://www.calameo.com/read/0055263808ffb36a763d1> (accessed: 06/23/2023).
13. Merigi M. Cliché failures and prospects of the "new architecture". *Architecture and Construction of Russia*. 2021. March. Pp. 53-60 [Electronic resource]. URL: http://www.asrmag.ru/1-2021/ASR-1-2021_Meriggi.pdf (accessed: 09/29/2023).
14. Nasirdinova A. Glocalization of digital nomads. *Project Baikal*. 2022. (71), 100-103. DOI: 10.51461/projectbaikal.71.1947 [Electronic resource]. URL: <https://projectbaikal.com/index.php/pb/article/view/2079> (date of application: 24.05.2023).
15. Myakota A. The concept of renovation of Norilsk. *Baikal project*. 2022. 19(72), 86-95 [Electronic resource]. URL: <https://projectbaikal.com/index.php/pb/article/view/2115> (accessed: 05/22/2023).
16. Mikhailova E.V. The impact of digitalization of the economy on the socio-economic aspects of the development of public shopping centers with multi-level underground structures in large and major cities. *Innovation and investment*. 2022. No. 4. Pp. 120-124 [Electronic resource]. URL: http://innovazia.ru/archive/?ELEMENT_ID=33904 (accessed 01.07.2023).
17. Mikhailova E.V. Prospects for the introduction of VR/AR technologies into the architectural environment of public and commercial complexes with underground tiers in large and major cities in the conditions of active development of immersion spaces. *Innovation and investment*. 2022. No. 7. pp. 94-97. [electronic resource]. URL: http://innovazia.ru/archive/?ELEMENT_ID=35387 (accessed: 06/13/2023).
18. Thackway W., Ng M., Lee C.-L., Pettit C. Implementing a deep-learning model using Google street view to combine social and physical indicators of gentrification. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2023.101970> [Electronic resource]. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0198971523000339> (accessed: 07/22/2023).
19. Enin A.E., Grosheva T.I. A Systematic Approach To The Reconstruction Of Landscape And Recreational Spaces. *Building and reconstruction*. 2017. No. 4. Pp. 101-109.
20. Ivanova D.E. Typical cinemas of Soviet modernism. Visual Research, 2017 [Electronic resource]. URL: <https://www.calameo.com/read/005425639a0bc64051072> (date of address: 05.08.2023).
21. Meeting place of business and buyers [Electronic resource]. URL: <https://www.adggroup.ru> (accessed: 06/18/2023).
22. Meeting place of business and buyers [Electronic resource]. URL: <https://adg-leasing.ru> (accessed: 06/18/2023).

Информация об авторе:

Михайлова Елена Владимировна

Национальный Московский государственный строительный университет НИУ МГСУ, г. Москва, Россия, кандидат архитектуры, доцент кафедры "Основы архитектуры и художественных коммуникаций"

E-mail: MikhaylovaEV@inbox.ru

Information about author:

Mikhaylova Elena V.

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) MGSU, Moscow, Russia, Phd of Architecture, Associate Professor of the Department of Fundamentals of Architecture and Artistic Communications

E-mail: MikhaylovaEV@inbox.ru

В.А. АЛЕКСЕЕВ¹, С.И. БАЖЕНОВА¹, А.А. МОНАХИНА¹

¹ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»
(НИУ МГСУ), г. Москва, Россия

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТОБЕТОННЫХ МАССИВОВ, СОЗДАВАЕМЫХ ИНЪЕКТИРОВАНИЕМ ОСОБОТОНКОДИСПЕРСНЫХ ВЯЖУЩИХ (МИКРОЦЕМЕНТОВ) ПО МАНЖЕТНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Аннотация. Обоснована актуальность проблемы, связанная с применением инъекционной манжетной технологии цементации грунтов в различных инженерно-геологических условиях. Ввиду особенностей технологий цементации при различных режимах инъекционной пропитки и возможности применения определенных технических показателей нагнетания для разных типов грунтов при реализации технологии возможно улучшение различных деформационных характеристик грунтового массива. Приведены некоторые результаты анализа работ инъекционной цементации грунтов в дисперсных грунтах и установлены общие закономерности, при которых необходимо корректировать параметры цементации. Рассмотрены теоретические предпосылки в корреляции с экспериментальными данными, доказана эффективность применения технологии цементации в режиме инъекционной пропитки и установлена общая применимость использования данных методов цементации с повышением технических показателей закрепляемых грунтов.

Ключевые слова: инъекционное закрепление грунтов, цементация грунтов, грунтобетон, сложные инженерно-геологические условия, манжетная технология.

V.A. ALEKSEEV¹, S.I. BAZHENOVA¹, A.A. MONAKHINA¹

¹National Research University Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

PREDICTION OF CHARACTERISTICS OF SOIL-CONCRETE MASSIFS CREATED BY INJECTION OF EXTREMELY FINE-DISPERSED BINDERS (MICROCEMENTS)

Abstract. The urgency of the problem associated with the use of injection erection technology of soil cementation in various engineering and geological conditions is substantiated. Due to the peculiarities of cementation technologies under various modes of injection impregnation and the possibility of applying certain technical injection parameters for different types of soils, it is possible to improve various deformation characteristics of the soil mass when implementing the technology. Some results of the analysis of the work of injection cementation of soils in dispersed soils are presented and general patterns are established under which it is necessary to adjust the parameters of cementation. The theoretical prerequisites are considered in relation to experimental data, the effectiveness of the application of cementing technology in the injection impregnation mode is proved and the general applicability of the application of these cementing methods with an increase in the technical indicators of the fixed soils is established.

Key words: injection consolidation of soils, soil cementation, soil concrete, complex engineering-geological conditions, mounting technology.

Введение

Вектор повышения эффективности и дальнейшего развития работ по закреплению и консолидации грунтов методом цементации, напрямую коррелирует с экономической целесообразностью, эффективностью технологий и задачами ресурсо- и энергосбережения всех строительных технологий. Разнообразие цементационных технологий при строительстве широко может быть использовано как при новом строительстве объектов транспортной инфраструктуры [1, 2], промышленного и гражданского строительства так и при реконструкции и реставрации зданий и сооружений [3, 4]. Имеются различные пути решения вышеуказанных вопросов, как путем широкого внедрения инновационных строительных материалов, например на основе бесклнкерных продуктов [5] широкого гранулометрического состава [6] вместо энерго- и ресурсоемких вяжущих на базе портландцемента [7], так и усовершенствованием проектной и научно-исследовательской базы в технологиях инъекционного усиления грунтовых оснований [8, 9]. Вторичное использование отходов промышленности и иных сырьевых отходов - важная практика, способствующая устойчивому развитию и снижению негативного воздействия на окружающую среду [10], уменьшить объем отходов, снизить потребление природных ресурсов, сократить выбросы вредных веществ и выпускать материалы с требуемыми свойствами [11]. Широкое использование местных материалов, вторичная переработка сырьевой базы для использования в производстве материалов и конструкций - особенно критичная технология для любых отдалённых регионов, имеющих сложную логистику, т.к. отсутствие транспортной доступности для отдаленных регионов представляет собой особый вызов из-за удаленности и ограниченной логистики. Достаточно эффективным и целесообразным решением здесь может выступать использование местных материалов, дисперсных отходов промышленности с остаточной гидравлической активностью, различных шлаков и зол-уноса в комбинации с другими тонкодисперсными составами [12, 13] или в качестве самостоятельных материалов [10, 14]. Практически во всех случаях уменьшение издержек в части понижения себестоимости материалов значительно увеличивает эффективность технологий цементации при необходимости модификации и закреплении грунтов.

Основными технологиями по цементационному закреплению грунтов считаются следующие методы:

- заполнительная инъекция
- струйная цементация
- цементация в режиме гидроразрывов
- цементация в режиме инъекционной пропитки

Заполнительная инъекция производится в техногенных и насыпных грунтах, трещиноватых породах, при ликвидации карстовых опасностей, а также при других условиях, когда в массиве грунта локализованы значительные объемы пустот, требующие их ликвидации. Давление при этом может достигать 1...3 МПа, но в основном считается что при заполнении пустот среднее давление инъекции должно приближаться к минимальным значениям 0,1...0,3 МПа, т.к. основное предназначение данного метода – заполнение некоего внутреннего объема в грунтовом массиве [12], при котором не возникает значительного сопротивления движения инъекционному раствору, за исключением технологических (гидравлических) потерь в инъекционном оборудовании (а также промежуточных ёмкостей и шлангах) и непосредственно перемещениях раствора в заполняемой полости.

Струйная технология цементационного упрочнения грунтов в основе своей представляет размывание, перемешивание, замещение грунта с цементным раствором или их сложные комбинации [15, 16]. При этом значительную кинетическую энергию имеет струя цементного раствора [17], выходящая через форсунку со средними давлениями порядка 40...60 МПа, когда водный раствор вяжущего достаточной степени текучести диспергирует массив грунта [18], частично оставаясь в нем, обеспечивая формирование грунтобетона за счет однородного перемешивания (при благоприятных условиях) в общем объеме частиц

грунта и нагнетаемого раствора вяжущего [19, 20]. Различают также следующие комбинации струйной цементации: однокомпонентная (Jet-1), наиболее часто используемая, при которой нагнетается смесь «вяжущее – вода»; двухкомпонентная (Jet-2), когда производится подача системы «вяжущее - вода» и параллельно «воздух»; трёхкомпонентная (Jet -3), при которой через конец бурового става параллельно производится подача системы «вяжущее – вода», «вода» и «воздух» [21, 22]. Для каждой геотехнической задачи и инженерно-геологических условий назначается наиболее оптимальная методика струйной цементации с учетом индивидуальных местных факторов [22, 23]. При струйной цементации параметры образуемой грунтобетонной колонны могут иметь самые различные значения [24, 25], однако данный способ в разнородных грунтах с разнородными деформационными характеристиками (например, водонасыщенный песок, глинистые грунты, слои с включениями старых фундаментов, строительного мусор и иных техногенных включений) может давать отрицательные результаты [22, 26].

Цементация в режиме гидроразрывов производится чрез установленные иньектора или иные приспособления путем образования т.н. гидроразрывов, объемов цементного раствора, проникающего по каналам в грунте, где у него имеется наименьшее гидравлическое сопротивление [27]. При этом в каналах образовавшихся разрывов остается цементный раствор, при твердении придает повышенную прочность обработанному грунту. Такой способ цементации достаточно успешно может применяться в различных глинистых и просадочных малопрочных грунтах. Цементация грунтов методом гидроразрыва формирует зоны (обычно не более 50 см.) упрочненного грунта, причем наиболее технологичным способом формирования таких зон в заданных точках является манжетный способ иньекции, при котором специально обустройстваемые иньектора устанавливаются в обойменном растворе в пробуренные скважины. Часто для ограничения габаритов закрепленного грунта при гидроразрывах, для исключения неконтролируемых уходов раствора на другие участки рекомендуется формирование защитного барьера [12]. Такой создаваемый барьер может включать иньектора, обустройстваемые на границах формируемого массива, в которых также первично должно быть произведено нагнетание иньекционным раствором перед основным периодом. В режиме как гидроразрывов, так и в режиме пропитки (о котором речь пойдет ниже), нагнетание по горизонтам иньекции производится до отказа, то есть до тех пор, пока удельный расход подачи иньекционной смеси не снизится до минимальных значений (обычно 0,5...5 литров в минуту). Значительное различие режима гидроразрыва от режима пропиточной иньекции заключается что при гидроразрыве наряду со снижением удельного расхода обычно необходимо также параллельно повышать давление иньекции до значительных значений, добиваясь гидроразрывов в массиве.

Следует, однако отделять объемное усиление грунтов в режиме гидроразрывов и технологию компенсационного нагнетания, которая позволяет регулировать напряжённость деформированным состоянием грунтов и производить управляемый подъем конструкций, получивших осадку или в режиме превентивного подъема как мероприятия по сохранности (например, при реконструкции зданий при плотной городской застройке).

Однако при реализации технологии гидроразрывной цементации необходимо учитывать следующее:

- необходимость ограничения чрезмерного распространения нагнетаемого раствора за пределы участка цементации, обычно путем устройство ограничительной зоны по контуру проектного габарита грунтобетонного массива путем предварительного нагнетания в требуемые горизонты иньекции защитной ограничительной зоны;
- необходимость производить нагнетание внутри ограничительной зоны с такими условиями чтобы отсутствовала гидравлическая связь между прокачиваемыми горизонтами иньекции, путем последовательного нагнетания максимально удалённых друг от друга иньекторов с последующим сближением и контролем.

Кроме того, следует учитывать, что технологии струйной цементации и гидроразрыва требуют значительного контроля за деформациями фундаментов зданий и сооружений вблизи от участка производства работ, т.к. при использовании этих методов часто возникают неуправляемые перемещения грунтового массива и близлежащих конструкций, которые могут вызвать значительные ненормативные отклонения [18].

Наиболее щадящим методом цементации является технология инъекционной пропитки, при которой происходит постепенное заполнение порового пространства грунтов и микропустот инъекционными особотонкодисперсными составами (ОТДВ) при низких давлениях порядка 0,1 ... 0,5 МПа. [12, 28] Соответственно данный метод широко используется при освоении подземного пространства в плотной городской застройке и предусматривает строительство и расширение в условиях существующего мегаполиса подземной городской инфраструктуры для ускорения логистики, транспортной доступности, устройство подземной комфортной среды. Несмотря на то, что для решения задач, связанных с различными технологиями цементационного упрочнения грунтов, используются все способы, но общепризнано наиболее безопасным методом является закрепление грунтов по манжетной технологии с инъекционной пропиткой грунтового массива.

В цементационных технологиях имеют важность технологические параметры такие, как давление и удельный расход инъекционной смеси, т.к. именно они в значительной степени задают геометрические размеры грунтобетонных элементов. При этом прочностные и деформативные параметры, коэффициент фильтрации грунтобетона в определяющей мере зависят от критериев водовяжущего отношения, активности используемого микровяжущего, проникающей способности инъекционной смеси, регулируемой путём комбинации микроцементов различной степени дисперсности и химических добавок [9]. Причем расход используемых вяжущих может составлять от 50...150 кг/м³ (например заполнительная инъекция с небольшим количеством пустот) до 800...1500 кг/м³ (струйная цементация грунтов в сложных инженерно-геологических условиях) [12].

Следует отметить, что наиболее изученным методом на настоящий момент является метод струйной цементации, который регламентируется СП 291.1325800.2017 «Конструкции грунтоцементные армированные. Правила проектирования» и широко изучен для разных условий [21, 22]. Однако для других технологий цементации многое базируется на факторах сложных комбинаций геологических условий, параметров инъекции, используемых материалов и оборудования [12]. Так для технологии инъекционной пропитки конечный результат (габариты грунтобетонного массива, его однородность, деформационные характеристики, проницаемость и долговечность) сильно варьируется также ввиду различных подходов и малой изученности вопросов. Кроме того, отдельно изучаются составы бетонов, модифицированные ОТДВ (микроцементами и микровяжущими различной природы) за счет новые материалы получают оптимизированные свойства, такие как повышенную прочность [29, 30] и непроницаемость [31, 32, 33], химическую стойкость, эксплуатационную долговечность [34, 35]. Теоретические основы технологии инъекционной пропитки грунтов в строительстве изложены в трудах НИУ МГСУ, НИИОСПа им. Н.М.Герсевича, СПбГАСУ и др. [9, 12, 28]. В большинстве исследований отмечается высокая степень корреляции конечных параметров от гранулометрического состава применяемого тонкодисперсного вяжущего применяемого при инъекционном закреплении грунтов. В настоящее время разработаны различные способы контроля производства работ и исследования конечных результатов – грунтобетонных массивов, однако зачастую отсутствуют твердые предпосылки прогнозирования и проектирования при закреплении грунтов по методу инъекционной пропитки ОТДВ. В данной работе анализируются некоторые аспекты технологии и приводятся методы, позволяющие прогнозировать габариты грунтобетонных массивов и некоторые его физико-механические характеристики.

Методы

С целью адаптации пропиточной инъекции при инъекционном упрочнении грунтов, назначения проектных габаритов, определения оптимальных технологических режимов создания грунтобетонов с учетом последних достижений в сфере производства инновационных материалов был приведен опыт лабораторных и полевых исследований грунтобетона с учетом параметров инъекции и характеристик применяемых инъекционных смесей.

Создание грунтобетона по технологии инъекционной пропитки в некотором роде можно представить как особую модификацию технологии мелкозернистого бетона (с повышенным водосодержанием цементного раствора, заполняющего поровое пространство между гранулами песка под давлением). Данная теория с одной стороны позволяет использовать известные зависимости алгоритмы мелкозернистых бетонных смесей, а с другой стороны необходимо также учитывать механизм формирования грунтобетона методом цементационной пропитки. При рассмотрении механизма инъекции наиболее критичными вопросами при проектировании являются прогноз распространения суспензии и контроля пределов прочности грунтобетона назначения и регулирования гранулометрического состава тонкодисперсных вяжущих для управления режимами инъекционной пропитки дисперсных грунтов различного состава. Сравнивая традиционную технологию бетона и инъекционную пропитку грунтов необходимо отметить следующие особенности:

- во всех технологиях грунтобетона (бетона), структура формируется цементным раствором вокруг заполнителя различной степени крупности (подготовленные заполнители - в технологии бетона, дисперсные грунты различного зернового состава – в технологии инъекционной цементации грунтов);

- в технологии применяются системы «вяжущее вещество - вода» (цементное тесто и высоководонаполненные инъекционные смеси, но с более тонкодисперсными вяжущими);

- формирование структуры происходит путем механического перемешивания – в технологии бетона, или путем инъекционной пропитки поровой структуры частиц грунта, без их раздвижки – в случае создания грунтобетона;

- особенности формирования структуры бетона позволяют использовать в качестве вяжущего вещества стандартного портландцемента, а в особенности создания грунтобетона – использование особотонкодисперсных вяжущих (микроцементов).

Можно отметить, что несмотря на некоторое сходство с технологией мелкозернистых бетонных смесей технология грунтобетона значительно зависит от свойств заполнителя (закрепляемого грунта, дисперсности его частиц, зернового состава) и гранулометрического состава используемого ОТДВ. В технологии инъекционной пропитки также необходимо учитывать режимы инъекции при которых происходит плавное и полное заполнение межзернового пространства грунта инъекционным раствором микроцемента. Причем необходимо считать грунт как единичный объем с заполнителем, условно состоящего из частиц следующих характеристик:

- 1) частиц дисперсного грунта, который может быть пропитан ОТДВ (некоторый аналог стандартного песка в технологии мелкозернистого бетона)

- 2) частиц, которые не могут быть пропитаны ОТДВ, состоящей в основном из агрегатов связного грунта.

Также необходимо учитывать более непредсказуемую и в основном более тонкую гранулометрию частиц грунта по сравнению с фракционированным песком – мелким заполнителем бетона, что определяет в качестве важнейшего технологического фактора гранулометрии и дисперсность микроцемента, задающего не только прочностные показатели, но и радиус распространения. Наиболее эффективная методика определения проникающих свойств представляет собой прямой способ изучения свойств пропитки исследуемого грунта и ОТДВ на однонаправленной модели (см. рис. 1)

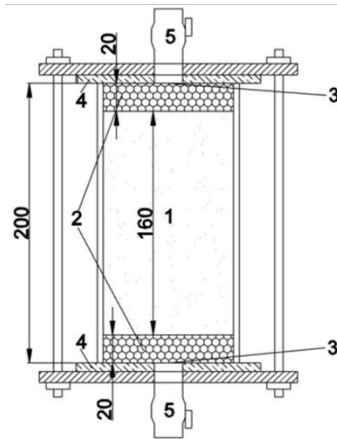


Рисунок 1. Схема лабораторной односторонней модели (1 – испытываемый грунт, 2 – утрамбованный заполнитель, 3 – устье входного патрубка, 4 – фланцы – держатели, 5 – входной патрубок)

При этом давление инъекции может варьироваться в пределах 0,1...0,5 МПа а удельная скорость подачи раствора от 0,5 до 5 л/ мин.



Рисунок 2 - Обработка односторонней модели в лабораторных условиях и перед нагнетанием на опытных участках строительной площадки

Вид используемых микроцементов – особотонкодисперсное вяжущее, произведенное в РФ (Челябинская область) на основе сепарации портландцементного клинкера: №1 – (d98~9 мкм, d95~6 мкм), №2 – (d98~16 мкм, d95~9,5 мкм), №3 – (d98~20 мкм, d95~15 мкм).

Испытываемый грунт – средний песок, плотность сухого грунта – 1,58 гр. / см³, плотность частиц грунта – 2,70 гр. / см³.

Полученные результаты исследовались на опытных участках строительной площадки с учетом потенциальных диаметров распространения, лабораторные и производственные данные рассматривались с учетом осредненных значений давления и удельного расхода.

Получаемые зависимости позволяют прогнозировать как максимальные диаметры грунтобетонных массивов, так и ограничения (или наоборот повышение) средних давлений и расходов при нагнетании.

Результаты и обсуждение

Различные составы ОТДВ (микроцемента, микровязущего) на основе Microdur (Дюккерхофф, Германия) известны в настоящее время и представлены различными научными трудами с некоторыми лабораторными и производственными апробациями. Однако отечественные ОТДВ (особенно с самой тонкой гранулометрией) сравнительно недавно вышли на отечественный рынок, не до конца прошли производственную апробацию по сравнению с микроцементами типа Microdur, имеющего большой опыт внедрения на объектах Российской Федерации. Однако даже и для растворов на базе Microdur, отсутствуют в значительной мере лабораторные и фактические данные, например при стабилизации мелких и пылеватых водонасыщенных песков, а также плавунцов, торфов, илов, рыхлых растительных грунтов.

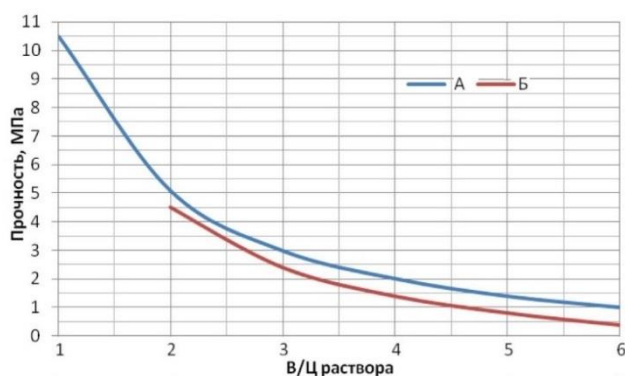


Рисунок 3 - Влияние В/Ц цементного раствора Микродур «RU» и способа закрепления (А – смешением, Б – инъекцией) на прочность цементированного песка (грунтобетона)

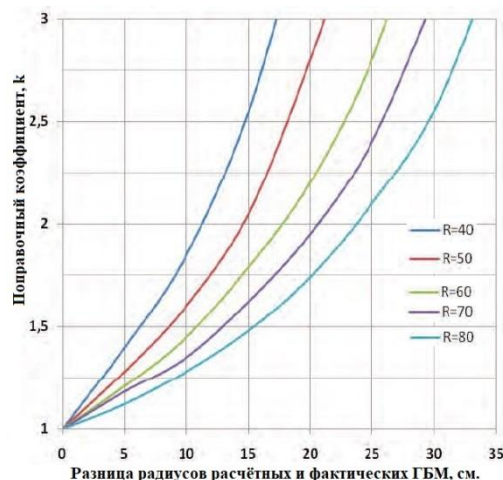


Рисунок 4 - Зависимость поправочного коэффициента k (соотношения расчетного k закрепленному объему) от разности их радиусов при заданном расчетном радиусе R = 40...80 см

Значительное количество исследований было проведено на зарубежных ОТДВ типа Microdur, были получены некоторые данные по конечной прочности грунтобетонных и по проникающей способности микроцементов. Так представляют значительный практический интерес работы Ибрагимова М.Н., задающие прочностные и геометрические параметры грунтобетонных (см. рис.3, рис. 4).

При проектировании габаритов грунтобетонных массивов необходимо также учитывать неправильные геометрические формы образуемых грунтобетонных массивов (см. рис. 5). Так при устройстве противофильтрационных завес рекомендуется проектировать расположение грунтобетонных элементов с учетом поз. 3 (по гарантированному радиусу), а при усилениях грунтов основания ленточных или столбчатых фундаментов, возможно учитывать расположение единичных массивов по поз 1-2 (с учетом максимального или среднего радиуса).

При формировании грунтобетона по манжетной технологии расход воды на единицу объема может значительно превышать аналогичное общее водосодержание на единицу объема для мелкозернистых бетонов. Данная особенность технологии (ввиду широкого разброса В/Вяз=1,0...6,0) влияет на повышенное количество капиллярных пор и их средний радиус в грунтобетоне, следствием чего является пониженная плотность и прочность относительно мелкозернистого бетона, а также на более замедленную кинетику набора прочности что требует отдельных исследований. Необходимость использования инъекционных смесей с высоким водовязущим отношением также ставит проблематику

учета таких факторов как повышенная склонность к расслаиваемости инъекционной смеси, сложность контроля нормального распределения частиц микровяжущего в объеме грунта и получаемая неоднородность грунтобетонного массива, что необходимо учитывать на этапе проектирования. Данные параметры технологии инъекционной пропитки при упрочнении грунтов необходимо учитывать при назначении составов смесей и анализе характеристик полученного грунтобетона. При имеющейся целесообразности и заданной экономической эффективности, возможно улучшить параметры грунтобетона путем использования ОТДВ или добавок к ним для ускорения гидратационных процессов твердения, провести первичную инъекцию (обработку) объема закрепляемого грунтового массива, или задать давление и удельный расход инъекции с учетом критерия получения максимальной однородности грунтобетона.

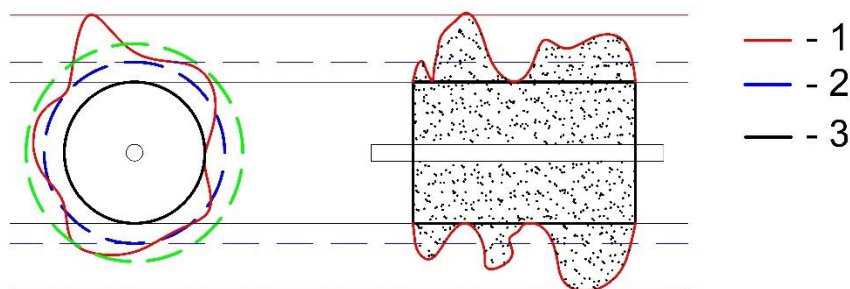


Рисунок 5 - Характер геометрических параметров грунтобетонных массивов. Обозначения: 1 – максимальный радиус грунтобетонного массива в произвольной точке; 2 – усредненный радиус грунтобетонного массива в произвольной точке; 3 – гарантированный радиус грунтобетонного массива в произвольной точке

Считается, что на физико-механические характеристики и гомогенность (отсутствие большого количества непропитанных включений) грунтобетонного массива, влияет как гранулометрический состав микроцемента - ОТДВ, но и общий расход вяжущего (с учетом параметра В/Вяж инъекционной смеси), определяющее свойства затвердевшего инъекционного раствора в составе грунтобетонной смеси. Т.к. в практике геотехнического, подземного и гидротехнического строительства упрочнение в основном необходимо для дисперсных водонасыщенных или обводнённых пород, то основные параметры грунтобетонных массивов должны быть определены как лабораторно, так и в полевых условиях.

Как показывает анализ результатов лабораторных и производственных исследований (таблица 1), для цементационной смеси на основе микроцементов характерен режим пропитки при пониженных давлениях не более 0,5 МПа. В случае же чередующихся слоев песчаных и глинистых слабых водонепроницаемых грунтов может быть рекомендована технология комбинированной цементации. При этом, в слоях песчаных проницаемых грунтов с коэффициентом фильтрации более 0,5 л/мин применяется инъекция тонкодисперсного вяжущего в режиме пропиточной инъекции с интенсивностью инъекции от 0,5 до 3,0 л/мин при давлении нагнетания до 0,5 МПа. В слоях глинистых непроницаемых грунтов (тяжелые супеси, суглинки, глины) с коэффициентом фильтрации менее 0,5 л/мин применяется инъекция тонкодисперсного вяжущего типа «Микродур – Х» в режиме компрессионно-разрывной инъекции с интенсивностью инъекции от 0,2 до 1,0 л/мин при давлении нагнетания до 1,0 МПа. Такая комбинация технологий возможна при использовании инъекционных насосов плунжерного типа с автоматическим регулированием интенсивности нагнетания на основе сигналов датчиков расхода и давления, направляемых в центральный процессор управления насосной станцией при этом ручном регулировании интенсивности нагнетания и давления не допускается.

В лабораторных условиях было проанализированы средние давления инъекции на модельном грунте (песок средней крупности) и в условиях полигона проверены усредненные значения диаметров грунтобетонных массивов (нагнетание до достижения давления 0,5 МПа). Анализ отечественных и зарубежных исследований не выявил, какие максимальные диаметры грунтобетонных массивов были получены для микроцемента Microdur, наиболее широко используемого в РФ до 2020-2022 гг. до момента внедрения отечественных ОТДВ сравнимой дисперсности.

Таблица 1 – Результаты исследований

№	Составы	Среднее давление, МПа	Средний расход, л/мин	Примечание
Лабораторные опыты				
1	ОТДВ тип 3	0,2 повышение до 0,5	2 л/мин, понижение до 0,3 л/мин	Рекомендовано уточнить параметры
2	ОТДВ тип 2	0,2 повышение до 0,4	2 л/мин	Положительный результат
3	ОТДВ тип 1	Нач. 0,1, конеч. 0,2	2 л/мин	Положительный результат
Данные с опытного полигона				
4	ОТДВ тип 3	0,2 повышение до 0,5	2 л/мин, понижение до 0,5 л/мин	Рекомендовано уточнить параметры
5	ОТДВ тип 2	0,2 повышение до 0,5	2 л/мин	Макс. диаметр – 0,75 м.
6	ОТДВ тип 1	Нач. 0,1, конеч. 0,3, частично до 0,5	2 л/мин	Макс. диаметр – 1,95 м.

Следует отметить, что наилучшие результаты пропиточных свойств показал соответственно ОТДВ – микроцемент тип №1 с наиболее тонким помолом. Однако при проектировании следует учитывать, что для песков высокой степени крупности, рыхлых песчаных грунтов, сложных техногенных грунтов с различными микропустотами следует учитывать пониженное давление инъекции даже для микроцементов с более грубым помолом.



Рисунок 6 - Образец грунтобетона (пропитка ОТДВ – микроцемент тип №1), заметна высокая степень однородности массива, без промежуточных включений непропитанных участков песчаного грунта

Выводы

Цементация грунтов манжетным способом в режиме инъекционной обработки грунтов проводится уже достаточно давно на территории Российской Федерации. Цементация грунтов в режиме инъекции при низких давлениях проводилась при реконструкции на объектах Московского метрополитена, при реставрации ансамбля зданий Московского Кремля и консерватории им. Чайковского, восстановлении конструкций Воскресенского Ново-Иерусалимского ставропигиального мужского монастыря, при усилении несущих конструкций Дворца съездов в рамках увеличения площадей и т.д.

Значительным достоинством технологии пропиточной инъекционной цементации представляется тот факт, что упрочнение грунтов проводится в наиболее щадящем режиме без изменения напряжённо-деформированного состояния грунтов, что особенно важно при усилении оснований для эксплуатируемых зданий и сооружений. Однако ввиду разнородности грунтов, представленных только на территории одной Москвы и Московской области при реализации технологии требуется постоянная корректировка параметров и научно-техническое сопровождение работ, как на этапе проектирования, так и на этапе реализации.

Ввиду нарушенной логистики ввиду эпидемии COVID-19 и последующих нарушенных поставок из стран Евросоюза ОТДВ типа Microdur (Микродур) фактически перестали использоваться на строительных объектах РФ, несмотря на значительные наработки и научный опыт при их апробации и внедрении на ряде объектов. Использование отечественных ОТДВ требует адаптацию материалов, отработку составов инъекционных смесей для определения наиболее точных получаемых характеристик. Причем следует отметить, что для микроцементов Microdur несмотря на определенные проектные характеристики также отсутствует ряд данных, представляющих научный интерес, таких как особенности гидратации и динамика набора прочности закреплённых массивов в течении нескольких лет (известна способность пропитанных ОТДВ грунтов набирать прочность даже после набора проектных характеристик в течении многих лет). Также считается, что противофильтрационные свойства закреплённого грунтобетонного массива при отсутствии агрессивных вод имеют высокую степень долговечности и улучшаются со временем, однако в открытых источниках также отсутствуют исследования на эту тему. Соответственно дальнейшее изучение отечественных микроцементов позволяет наиболее широко определять их оптимальные рецептуры, технологии нагнетания, конечные параметры растворов и закреплённых грунтобетонных массивов / противофильтрационных элементов.

Применение оптимальных рецептур на основе отечественных микроцементов позволяет увеличивать эффективный размер формируемых грунтобетонных массивов с одновременным повышением их однородности и сплошности, что является предпосылкой для уменьшения количества элементов - массивов, сокращения стоимости и сроков производства работ при одновременном повышении качества.

Получены результаты – достижение максимального диаметра грунтобетонного массива до 1,95 м. в режиме пропитки (для микроцемента ОТДВ типа 1), средние режимы пропитки для микроцемента ОТДВ типа 2. Рекомендуется для микроцемента ОТДВ типа 3 использовать комплекс добавок или перейти на другие типы ОТДВ.

Обобщение и анализ результатов данных и последующих экспериментальных исследований позволит выполнять проектирование состава и свойств грунтобетона на основе микроцементов (ОТДВ), выполнять расчёты, проектирование составов и технологических режимов, назначать геометрические характеристики грунтобетонных массивов в зависимости от назначения. А далее открывает возможности в прогнозировании кинетики набора прочности, пористости, водонепроницаемости и долговечности грунтобетонных массивов, а также обоснование технико-экономической эффективности применения ОТДВ для упрочнения и уплотнения практически всех видов грунтов с проектной прочностью при

сжатии в интервале 0,5...6,0 МПа при строительстве объектов транспортного, специального промышленного и общегражданского назначения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Butchibabu B., Khan P.K., Jha P. C. Foundation evaluation of underground metro rail station using geophysical and geotechnical investigations// *Engineering Geology*. 2019. Volume 248. Pp. 140-154. DOI: 10.1016/j.enggeo.2018.12.001.
2. Belyi J.A., Karapetov E., Efimenko Y. Structural Health and Geotechnical Monitoring During Transport Objects Construction and Maintenance (Saint-Petersburg Example) // *Procedia Engineering*. 2017. Volume 189. Pp. 145-151. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.024.
3. Nezhnikova E. The Use of Underground City Space for the Construction of Civil Residential Buildings // *Procedia Engineering*. 2016. Volume 165. Pp. 1300-1304. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.854.
4. Волков М.А., Петленко С.А., Волкова Д.О., Баженова И.С. Сравнительный анализ составов, применяемых для усиления грунтов оснований и фундаментов при реконструкции // Сборник «Проблемы и перспективы в международном трансфере инновационных технологий. сборник статей Международной научно-практической конференции». Уфа, 2021. С. 40-44.
5. Farfan J., Fasihi M., Breyer C. Trends in the global cement industry and opportunities for long-term sustainable CCU potential for Power-to-X // *Journal of Cleaner Production*. 2019. Volume 217. Pp. 821-835. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.01.226.
6. Song D., Lin L., Bao W. Exergy conversion efficiency analysis of a cement production chain // *Energy Procedia*. 2019. Volume 158. Pp. 3814-3820. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.867.
7. Elfaham M.M., Eldemerdas U. Advanced analyses of solid waste raw materials from cement plant using dual spectroscopy techniques towards co-processing // *Optics & Laser Technology*. 2019. Volume 111. Pp. 338-346. DOI: 10.1016/j.optlastec.2018.10.009.
8. Shlyakhova E., Serebryanaya I., Egorochkina, I., Matrosov A., Odinets M., Knyazhichenko M. Repair compositions for restoration of operated reinforced concrete structures // *E3S Web of Conferences*. 14th International Scientific and Practical Conference on State and Prospects for the Development of Agribusiness, INTERAGROMASH 2021. Rostov-on-Don, 2021. 04017.
9. Баженова С.И., Алексеев В.А. Особенности подбора состава тонкодисперсных вяжущих для инъектирования // *Строительство и реконструкция*. 2020. № 3 (89). С. 99-108. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-89-3-99-108
10. Thomas R. J., Gebregziabihe B.S., Giffin A., Peethamparan S. Micromechanical properties of alkali-activated slag cement binders // *Cement and Concrete Composites*. 2018. Volume 90. Pp. 241-256. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2018.04.003.
11. Гришина А.Н., Королев Е.В. Жидкостекольные строительные материалы специального назначения [Электронный ресурс]: монография. Электрон. текстовые данные. М.: Московский государственный строительный университет, Ай Пи Эр Медиа, ЭБС АСВ, 2015. — 224 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/32221>. — ЭБС «IPRbooks».
12. Alekseev V. Combined permeation grouting technologies using ultra microfine cement // *The Scientific Heritage*. 2020. № 48-1 (48). p. 3-4.
13. Кочев Д.З., Алексеев С.В., Алексеев В.А. Особенности инженерно-геологических изысканий и опыт повышения несущей способности загрязненных грунтов в городских условиях Московской области// Сборник: Сергеевские чтения. Инженерная геология и геоэкология. Фундаментальные проблемы и прикладные задачи Юбилейная конференция, посвященная 25-летию образования ИГЭ РАН. 2016. С. 305-309.
14. Wang Z.-F., Shen S.-L., Modoni G. Enhancing discharge of spoil to mitigate disturbance induced by horizontal jet grouting in clayey soil: Theoretical model and application // *Computers and Geotechnics*. 2019. Volume 111. Pp. 222-228. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.03.012.
15. Heidari M., Tonon F. Ground reaction curve for tunnels with jet grouting umbrellas considering jet grouting hardening // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2015. Volume 76. Pp. 200-208. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2015.03.021.
16. Makovetskiy O.A. Application of “Jet Grouting” for Installation of Substructures of Estates // *Procedia Engineering*. 2016. Volume 150. Pp. 2228-2231. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.269.
17. Kashevarova G.G., Makovetskiy O.A. Analysis of Experimental and Estimated Jet-grouted Soil Mass Deformations // *Procedia Engineering*. 2016. Volume 150. Pp. 2223-2227. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.268.

18. Güllü H. On the viscous behavior of cement mixtures with clay, sand, lime and bottom ash for jet grouting // *Construction and Building Materials*. 2015. Volume 93. Pp. 891-910. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.072.
19. Güllü H. A new prediction method for the rheological behavior of grout with bottom ash for jet grouting columns // *Soils and Foundations*. 2017. Volume 57. Issue 3. Pp. 384-396. DOI: 10.1016/j.sandf.2017.05.006.
20. Cristelo N., Soares E., Rosa I., Miranda T., Chaves A. Rheological properties of alkaline activated fly ash used in jet grouting applications // *Construction and Building Materials*. 2013. Volume 48. Pp. 925-933. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.07.063.
21. Малинин А.Г. Влияние режимов струйной цементации на диаметр грунтоцементных колонн // *Метро и тоннели*. 2013. № 4. С. 30.
22. Бройд И.И. Струйная геотехнология. Москва: АСВ, 2004. 440 с.
23. Güllü H., Cevik A., Al-Ezzi K.M.A., Gülsan M.E. On the rheology of using geopolymers for grouting: A comparative study with cement-based grout included fly ash and cold bonded fly ash // *Construction and Building Materials*. 2019. Volume 196. Pp. 594-610. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.140.
24. Тер-Мартirosян З.Г., Струнин П.В. Усиление слабых грунтов в основании фундаментных плит с использованием технологии струйной цементации грунтов // *Вестник МГСУ*. 2010. № 4-2. С. 310-31.
25. Makovetskiy O.A. Application of "Jet Grouting" for Installation of Substructures of Estates // *Procedia Engineering*. 2016. Volume 150. Pp. 2228-2231. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.269.
26. Ochmański M., Modoni G., Bzówka J. Prediction of the diameter of jet grouting columns with artificial neural networks // *Soils and Foundations*. 2015. Volume 55. Issue 2. Pp. 425-436. DOI: 10.1016/j.sandf.2015.02.016.
27. Муртазаев С.А.Ю., Сайдумов М.С., Муртазаева Т.С.А., Абумуслимов А.С. Влияние тонкомолотых минеральных наполнителей техногенной природы (МНТП) на седиментацию цементных суспензий // В сборнике: Наука и инновации в строительстве. Сборник докладов IV Международной научно-практической конференции. Белгород, 2020. С. 372-379.
28. Ibragimov M.N., Semkin V.V., Shaposhnikov A.V. Soil Solidification by Micro-Cements // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2017. Vol. 53. No. 6. Pp. 412-419. – DOI 10.1007/s11204-017-9421-0. – EDN YVHFYN.
29. Алексеев В. А., Харченко А. И., Соловьев В. Г., Никоноров Р. Н. Набрызгбетон в шахтном строительстве // *Вестник МГСУ*. 2017. Т. 12, № 7(106). С. 780-787. – DOI 10.22227/1997-0935.2017.7.780-787. – EDN ZATDKR.
30. Jeong Y., Kang S.H., Du Y., Moon J. Local Ca-structure variation and microstructural characteristics on one-part activated slag system with various activators // *Cement and Concrete Composites*. 2019. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2019.04.009.
31. Shi Z., Shi C., Wan S., Li N., Zhang Z. Effect of alkali dosage and silicate modulus on carbonation of alkali-activated slag mortars // *Cement and Concrete Research*. 2018. Volume 113. Pp. 55-64. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.07.005.
32. Муртазаев С.А.Ю., Саламанова М.Ш., Сайдумов М.С., Хубаев М.С.М. Роль тонкомолотого наполнителя техногенной природы в рецептуре наполненных вяжущих для высококачественных бетонов // В сборнике: Миллионщиков-2020. Материалы III Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, посвященной 100-летию ФГБОУ ВО «ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова». Грозный, 2020. С. 226-233.
33. Romyantseva V. E. Changes in the structural and phase composition and strength characteristics of concrete during liquid corrosion in chloride-containing media // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1926. 012057. – DOI 10.1088/1742-6596/1926/1/012057. – EDN VWVEAV.
34. Рахимова Н.Р., Рахимов Р.З. Развитие и перспективные возможности получения и применения активированных щелочами гидравлических вяжущих и материалов на их основе // *Вестник Волжского регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук*. 2011. № 14. С. 151-167.
35. Сальникова А.С., Шеремет А.А., Сальников Д.А. Композиционное вяжущее в строительстве // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова: Материалы конференции, Белгород, 30 апреля 2021 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2021. – С. 1031-1034. – EDN YGKMNS.

REFERENCES

1. Butchibabu B., Khan P.K., Jha P. C. Foundation evaluation of underground metro rail station using geophysical and geotechnical investigations. *Engineering Geology*. 2019. Volume 248. Pp. 140-154. DOI: 10.1016/j.enggeo.2018.12.001.
2. Belyi J.A., Karapetov E., Efimenko Y. Structural Health and Geotechnical Monitoring During Transport Objects Construction and Maintenance (Saint-Petersburg Example). *Procedia Engineering*. 2017. Volume 189. Pp. 145-151. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.024.
3. Nezhnikova E. The Use of Underground City Space for the Construction of Civil Residential Buildings. *Procedia Engineering*. 2016. Volume 165. Pp. 1300-1304. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.854.
4. Volkov M.A., Petlenko S.A., Volkova D.O., Bazhenova I.S. Sravnitel'niy analiz sostavov, primenyaemih dlya usileniya osnovaniy i fundamentov pri rekonstrukcii [Comparative analysis of compounds used to strengthen the soils of foundations and foundations during reconstruction] Mezhdunarodnoy nauchno-technicheskoy konferencii Problemi i perspektivi v mezhdunarodnom transfere innovatsionnih tehnologiy [Proceeding of the Problems and prospects in the international transfer of innovative technologies. collection of articles of the International Scientific and Practical Conference]. Ufa, 2021. Pp. 40-44.
5. Farfan J., Fasihi M., Breyer C. Trends in the global cement industry and opportunities for long-term sustainable CCU potential for Power-to-X. *Journal of Cleaner Production*. 2019. Volume 217. Pp. 821-835. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.01.226.
6. Song D., Lin L., Bao W. Exergy conversion efficiency analysis of a cement production chain. *Energy Procedia*. 2019. Volume 158. Pp. 3814-3820. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.867.
7. Elfaham M.M., Eldemerdas U. Advanced analyses of solid waste raw materials from cement plant using dual spectroscopy techniques towards co-processing. *Optics & Laser Technology*. 2019. Volume 111. Pp. 338-346. DOI: 10.1016/j.optlastec.2018.10.009.
8. Shlyakhova E., Serebryanaya I., Egorochkina, I., Matrosov A., Odinets M., Knyazhichenko M. Repair compositions for restoration of operated reinforced concrete structures. E3S Web of Conferences. 14th International Scientific and Practical Conference on State and Prospects for the Development of Agribusiness, INTERAGROMASH 2021. Rostov-on-Don, 2021. 04017.
9. Bazhenova S.I., Alekseev V.A. Features of the selection of the composition of fine-dispersed binders for injection. *Building and reconstruction*. 2020. No. 3 (89). Pp. 99-108. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-89-3-99-108
10. Thomas R. J., Gebregziabihe B.S., Giffin A., Peethamparan S. Micromechanical properties of alkali-activated slag cement binders. *Cement and Concrete Composites*. 2018. Volume 90. Pp. 241-256. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2018.04.003.
11. Grishina A.N., Korolev E.V. Liquid glass building materials for special purposes [Electronic resource]: monograph. Moscow: Moscow State University of Civil Engineering, AI Pi Er Media, EBS DIA, 2015. — 224 p. [Online]. System requirements: AdobeAcrobatReader.— URL: <http://www.iprbookshop.ru/32221> . — EBS "IPRbooks".
12. Alekseev V. Combined permeation grouting technologies using ultra microfine cement. *The Scientific Heritage*. 2020. No. 48-1 (48). Pp. 3-4.
13. Kochev D.Z., Alekseev S.V., Alekseev V.A. Osobennosti inzhenerno-geologicheskikh iziskaniy i opit povisheniya nesuschey sposobnosti zagryznennih gruntov v gorodskikh usloviyakh Moskovskoy oblasti [Features of engineering-geological research and experience of increasing the bearing capacity of contaminated soils in urban conditions of the Moscow region] Jubileynoy konferencii, posvyaschennoy 25-letiyu obrazovaniya IGE RAN. Sergeevskie chteniya, Inzhenernaya geologiya i geoecologiya. Fundamental'niye problem i prikladnie zadachi [Sergeyev's readings. Engineering geology and geoecology. Fundamental problems and applied tasks Anniversary conference dedicated to the 25th anniversary of the IGE RAS]. 2016. pp. 305-309.
14. Wang Z.-F., Shen S.-L., Modoni G. Enhancing discharge of spoil to mitigate disturbance induced by horizontal jet grouting in clayey soil: Theoretical model and application. *Computers and Geotechnics*. 2019. Volume 111. Pp. 222-228. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.03.012.
15. Heidari M., Tonon F. Ground reaction curve for tunnels with jet grouting umbrellas considering jet grouting hardening. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2015. Volume 76. Pp. 200-208. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2015.03.021.
16. Makovetskiy O. A. Application of "Jet Grouting" for Installation of Substructures of Estates. *Procedia Engineering*. 2016. Volume 150. Pp. 2228-2231. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.269.
17. Kashevarova G.G., Makovetskiy O.A. Analysis of Experimental and Estimated Jet-grouted Soil Mass Deformations. *Procedia Engineering*. 2016. Volume 150. Pp. 2223-2227. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.268.
18. Güllü H. On the viscous behavior of cement mixtures with clay, sand, lime and bottom ash for jet grouting. *Construction and Building Materials*. 2015. Volume 93. Pp. 891-910. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.072.

19. Güllü H. A new prediction method for the rheological behavior of grout with bottom ash for jet grouting columns. *Soils and Foundations*. 2017. Volume 57. Issue 3. Pp. 384-396. DOI: 10.1016/j.sandf.2017.05.006.
20. Cristelo N., Soares E., Rosa I., Miranda T., Chaves A. Rheological properties of alkaline activated fly ash used in jet grouting applications. *Construction and Building Materials*. 2013. Volume 48. Pp. 925-933. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.07.063.
21. Malinin A.G. Influence of Jet cementation modes on the diameter of soil-cement columns. *Metro and tunnels*. 2013. No. 4. Pp. 30.
22. Broyd I.I. *Struynaya geotekhnologiya [Jet geotechnology]*. Moscow: ASV, 2004. 440p.
23. Güllü H., Cevik A., Al-Ezzi K.M.A., M. Gülsan M.E. On the rheology of using geopolymers for grouting: A comparative study with cement-based grout included fly ash and cold bonded fly ash. *Construction and Building Materials*. 2019. Volume 196. Pp. 594-610. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.140.
24. Ter-Martirosyan Z. G., Strunin P.V. Usilenie slabih gruntov v osnovanii fundamentnih plit s ispol'zovaniem tehnologii struinoi cementatsii [Strengthening weak soils in the basis of foundation slabs with use of technology of jet cementation of soils]. *Vestnik MGSU*. 2010. No. 4-2. Pp. 310-315.
25. Makovetskiy O.A. Application of "Jet Grouting" for Installation of Substructures of Estates. *Procedia Engineering*. 2016. Volume 150. Pp. 2228-2231. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.269.
26. Ochmański M., Modoni G., Bzówka J. Prediction of the diameter of jet grouting columns with artificial neural networks. *Soils and Foundations*. 2015. Volume 55. Issue 2. Pp. 425-436. DOI: 10.1016/j.sandf.2015.02.016.
27. Murtazaev S.A.Yu., Saidumov M.S., Murtazaeva T.S.A., Abumuslimov A.S. Vliyanie tonkomolotih mineral'nykh napolniteley tehnogennoy prirodi na sedimentatsiyu cementnykh suspenziy [Influence of finely ground mineral fillers of technogenic nature on sedimentation of cement suspensions] IV Mezhdunarodnoy nauchno-technicheskoy konferencii Nauka i innovatsii v stroitel'stve [Proceeding of the Science and Innovation in . Collection of reports of the IV International Scientific and Practical Conference]. Belgorod, 2020. Pp. 372-379.
28. Ibragimov M.N., Semkin V.V., Shaposhnikov A.V. Soil Solidification by Micro-Cements. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2017. Vol. 53, No. 6. P. 412-419. DOI 10.1007/s11204-017-9421-0. – EDN YVHFYN.
29. Alekseev V. A., Kharcenko A. I., Soloviev V. D., Nikonorov R. N. Nabrizhbeton v shhtnom stroitel'stve [Sprayed concrete in the mine construction]. *Vestnik MGSU*. 2017. Vol. 12, No. 7(106). Pp 780-787. DOI 10.22227/1997-0935.2017.7.780-787. – EDN ZATDKR
30. Jeong Y., Kang S.-H., Du Y., Moon J. Local Ca-structure variation and microstructural characteristics on one-part activated slag system with various activators. *Cement and Concrete Composites*. 2019. 15 April. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2019.04.009.
31. Shi Z., Shi C., Wan S., Li N., Zhang Z. Effect of alkali dosage and silicate modulus on carbonation of alkali-activated slag mortars. *Cement and Concrete Research*. 2018. Volume 113. Pp. 55-64. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.07.005.
32. Murtazaev S.A.Yu., Salamanova M.Sh., Saidumov M.S., Hubaev M.S.M. Rol' tonkomolotogo napolnitelya tehnogennoy prirodi v recapture napolnennykh vyazhuschiy dlya vysokokachestvennykh betonov [The role of finely ground filler of technogenic nature in the formulation of filled binders for high-quality concrete] III Vserossiyskoy nauchno-prkticheskoy konferencii studentov, aspirantov i molodih uchenih s mezhdunarodnim uchastiem, posvyaschennaya 100-letiyu FGBOU VO GGNTU imeni akdemika M.D. Millionschikova [Proceeding of the III All-Russian scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists with international participation, dedicated to the 100th anniversary of the FSBEI HE "GGNTU named after M.D. Millionschikov"]. Grozny, 2020. pp. 226-233.
33. Rumyantseva V. E. Changes in the structural and phase composition and strength characteristics of concrete during liquid corrosion in chloride-containing media. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1926. 012057. DOI 10.1088/1742-6596/1926/1/012057. EDN VWVEAV.
34. Rakhimova N.R., Rakhimov R.Z. Razvitie i perspektivnye vozmozhnosti polucheniya i primeneniya aktivirovannogo scheloschami gidravlicheskiy vyazhuschiy i materialov na ih osnove [Development and promising possibilities of obtaining and using alkali-activated hydraulic binders and materials based on them]. *Bulletin of the Volga Regional Branch of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences*. 2011. No. 14. pp. 151-16
35. Salnikova A.S. Kompozitsionnoye vyazhuschee v stroitel'stve [Composite binder in construction] Mezhdunarodnoy nauchno-technicheskoy konferencii molodih uchenih BGTU imeni V.G. Shuhova [Proceeding of International Scientific and Technical Conference of young scientists of V.G. Shukhov BSTU: Conference materials], Belgorod, April 30 – 20, 2021. Pp. 1031-1034.

Информация об авторах:

Алексеев Вячеслав Александрович

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ),
г. Москва, Россия,
Директор НОЦ «Подземное строительство»
E-mail: 634586@mail.ru

Баженова Софья Ильдаровна

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ),
г. Москва, Россия,
канд. техн. наук, доц., доцент кафедры строительного материаловедения (СМ)

Монахина Анастасия Андреевна

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ),
г. Москва, Россия,
студентка 4 курса бакалавриата
E-mail: monakhina03@mail.ru

Information about authors:

Alekseev Vyacheslav A.

National Research Moscow State University of Civil Engineering - Design Institute (NRU MGSU), Moscow, Russia
Head of the scientific and educational center «Underground construction»
E-mail: 634586@mail.ru

Bazhenova Sofya I.

National Research Moscow State University of Civil Engineering - Design Institute (NRU MGSU), Moscow, Russia
candidate in tech. sc., docent, associated prof. of the dep. of Building materials science
E-mail: BazhenovaSI@mgsu.ru

Monakhina Anastasia A.

National Research Moscow State University of Civil Engineering - Design Institute (NRU MGSU), Moscow, Russia
4th year undergraduate student
E-mail: monakhina03@mail.ru

В.Д. ЧЕРКАСОВ¹, Ю.П. ЩЕРБАК², Д.В. ЧЕРКАСОВ¹¹Национальный исследовательский Мордовский государственный университет
им. Н.П. Огарева, г. Саранск, Россия²Саровский физико-технический институт Национальный исследовательский
ядерный университет МИФИ, г. Саров, Россия

ЭЛАСТИЧНЫЕ САМОКЛЕЯЩИЕСЯ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ

Аннотация. В статье рассматривается создание эластичных самоклеящихся радиопоглощающих материалов для защиты от СВЧ излучения. В производстве радиопоглощающих материалов широко используют карбонильное железо. Материалы с этим наполнителем имеют низкое поглощение электромагнитного излучения, а в большей степени отражают его. Основное достоинство этого наполнителя в том, что он выпускается отечественными производителями в промышленных объёмах. Другой наполнитель, используемый для производства радиопоглощающих материалов – углеродное волокно. Материалы на этом наполнителе имеют высокий коэффициент поглощения электромагнитного излучения, но работают в очень узком диапазоне частот. В связи с этим для повышения поглощения электромагнитного излучения и расширения диапазона частот в состав радиопоглощающего материала, содержащего карбонильное железо, вводится определённое количество углеродного волокна. Показано, что при этом поглощение электромагнитного излучения достигает 80 %, а частотный диапазон работы составляет 6,2 – 7,7 ГГц. Материал предназначен для защиты помещений и оборудования от электромагнитного излучения.

Ключевые слова: электромагнитное излучение, СВЧ-диапазон, каучук, углеродное волокно, карбонильное железо, радиопоглощающий материал, исследования.

V.D. CHERKASOV¹, Y.P. SHCHERBAK², D.V. CHERKASOV¹¹National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia²Sarov Institute of Physics and Technology National Research
Nuclear University MEPhI, Sarov, Russia

ELASTIC SELF-ADHESIVE RADIOABSORBING MATERIALS

Abstract. The article considers creation of elastic self-adhesive radio absorbing materials for frequency range of 2-7 GHz. Carbonyl iron is widely used in the production of radioabsorbing materials. Materials with this filler have a low absorption of electromagnetic radiation, and more reflect it. The main advantage of this filler is that it is produced by domestic manufacturers in industrial volumes. Another filler used for the production of radioabsorbing materials is carbon fibre. Materials on this filler have a high absorption coefficient of electromagnetic radiation, but operate in a very narrow frequency range. Therefore, in order to increase electromagnetic absorption and extend the frequency range, a certain amount of carbon fibre is introduced into the composition of the radioabsorbing material containing carbonyl iron. It is shown that in this case absorption of electromagnetic radiation reaches 93%. The material is intended for protection of premises and equipment against electromagnetic radiation.

Keywords: electromagnetic radiation, microwave range, rubber, carbon fiber, carbonyl iron, radio absorbing material, research.

Введение

Для защиты людей и радиотехнических устройств от вредного воздействия электромагнитного излучения используются композиционные радиопоглощающие материалы различного функционального назначения: радиопоглощающие покрытия, защитные экраны, радиопоглощающие системы [1-7]. Наиболее широкое применение из них нашли радиопоглощающие покрытия, которые представляют собой композиционные материалы, состоящие из полимерной матрицы и наполнителей [8-18]. В качестве наполнителей обычно используют оксиды металлов, углеродные компоненты, ферриты, аморфные металлы и др. [19-25]. Главной задачей в создании эффективных радиопоглощающих материалов является составление рецептуры для получения композиции, которая могла бы легко перерабатываться в изделие с необходимым комплексом свойств.

В настоящее время в композиционных радиопоглощающих материалах в качестве наполнителя широко используют карбонильное железо [9,26]. Анализ работы радиопоглощающих материалов с таким наполнителем показал, что они работают в узком диапазоне частот. Кроме этого, они имеют низкие поглощающие и высокие отражающие свойства. В связи с этим требуется повышение поглощающих свойств и расширение диапазона частот эффективной работы материала. В статье рассматривается создание радиопоглощающего материала с высокими поглощающими свойствами и более широким частотным диапазоном работы на основе смеси карбонильного железа и углеродного волокна.

Модели и методы

Разработан радиопоглощающий материал, у которого в качестве связующего использовали неотверждаемый герметик на основе этиленпропиленового каучука. Функциональным наполнителем в этом материале являлась смесь рубленного углеродного волокна UFM-4HD и карбонильного железа марки Р-20.

Основными радиофизическими характеристиками радиопоглощающих материалов являются коэффициенты отражения, прохождения и поглощения электромагнитного излучения [27].

Определение радиофизических характеристик проводили по ГОСТ 50011-92 (ГОСТ 30381-95) [28]. Структурная схема измерений представлена на рис.1.

Для определения коэффициента отражения из радиопоглощающего материала изготавливались образцы размером 300×300 мм и толщиной 1 и 2 мм. Измерения проводились следующим образом: сначала металлическая подложка, а затем радиопоглощающий материал на металлической подложке устанавливаются вплотную к раскрытию приемопередающей рупорной антенны.

Антенна перемещается вдоль своей оси и фиксируются первые минимальные и максимальные показания прибора. После этого определяются коэффициенты отражения. Для определения коэффициента поглощения электромагнитного излучения в радиопоглощающем материале производится сравнение коэффициентов отражения электромагнитного излучения от металлической подложки с коэффициентом отражения электромагнитного излучения от радиопоглощающего материала на металлической подложке.

Разница коэффициентов отражения электромагнитного излучения несет информацию о поглощенной в радиопоглощающем материале мощности сигнала. Чем больше разница между коэффициентами отражения, тем больше уровень поглощения электромагнитного излучения в радиопоглощающем материале.

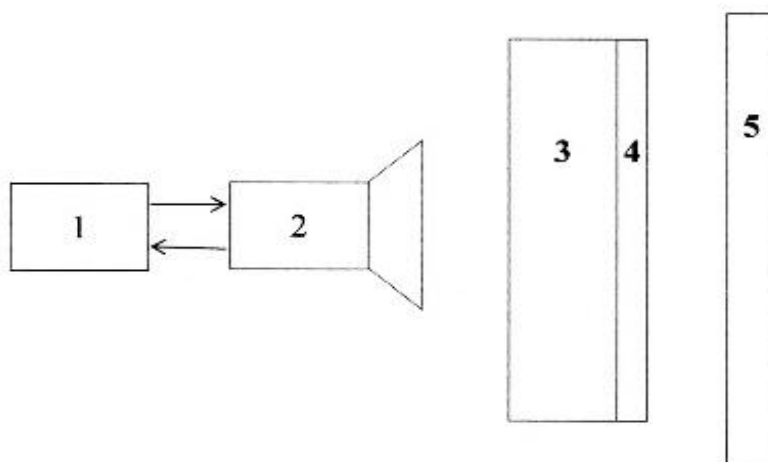


Рисунок 1 - Структурная схема измерений коэффициента отражения:

1 – скалярный анализатор цепей серии P2M; 2 – рупорная антенна; 3 – образец РПМ; 4 – металлическая пластина; 5 – ПЭВ (поглотитель ЭМИ)

Результаты исследования и их анализ

Экспериментальные исследования радиопоглощающих материалов с различным содержанием карбонильного железа показали, что они имеют коэффициент поглощения не более 10 % (табл. 1,2,3,4).

Таблица 1 - Коэффициент поглощения радиопоглощающего материала с содержанием карбонильного железа 10%.

Частота, ГГц	4,5	5,0	5,5	6,0
<i>K</i> поглощения, %	0	5	10	5

Таблица 2 - Коэффициент поглощения радиопоглощающего материала с содержанием карбонильного железа 15%.

Частота, ГГц	4,5	5,0	5,5	6,0
<i>K</i> поглощения, %	2	4	8	2

Таблица 3 - Коэффициент поглощения радиопоглощающего материала с содержанием карбонильного железа 20%.

Частота, ГГц	4,5	5,0	5,5	6,0
<i>K</i> поглощения, %	2	3	10	5

Таблица 4 - Коэффициент поглощения радиопоглощающего материала с содержанием карбонильного железа 84%.

Частота, ГГц	4,5	5,0	5,5	6,0
<i>K</i> поглощения, %	8	10	3	4

С увеличением содержания карбонильного железа в композите не происходит повышения поглощающих свойств. С таким видом наполнителя в материале преобладают отражающие свойства.

Радиопоглощающие материалы с содержанием только углеродного волокна имеют коэффициент поглощения 50-76 % в диапазоне частот 5,6 – 6 ГГц (рис. 2). Максимальное поглощение электромагнитного излучения в материале с углеродным волокном наблюдается на частоте 6 ГГц и составляет 76%. При этом содержание углеродного волокна в композиции составляло 7 %. Дальнейшее увеличение углеродного волокна приводит к снижению поглощающих свойств.

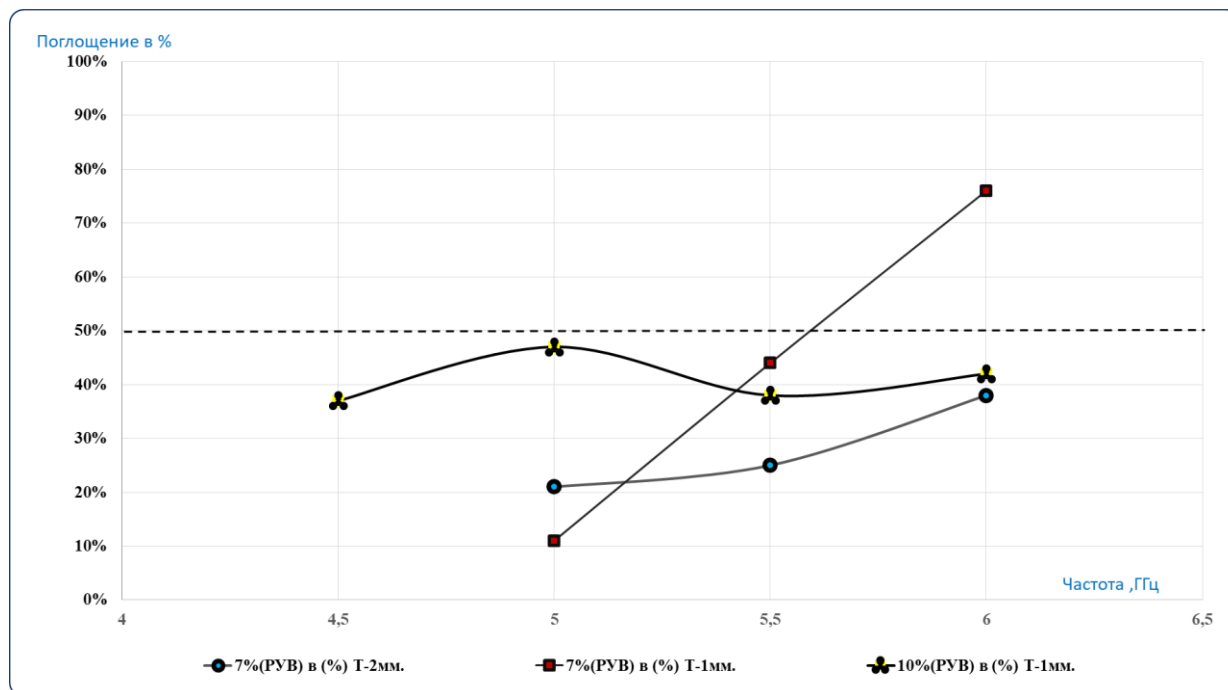


Рисунок 2 - Влияние углеродного волокна на поглощение электромагнитного излучения

Для увеличения поглощения электромагнитного излучения и расширения частотного диапазона эффективной работы материала в его состав вводили смесь углеродного волокна и карбонильного железа. Проведенные исследования показали, что наибольшее поглощение электромагнитного излучения происходит при содержании углеродного волокна 5 % и карбонильного железа 50 % (рис. 3). При этом максимальное поглощение электромагнитного излучения составляет 80 % в частотном диапазоне 6,2 – 7,7 ГГц (рис. 3). Частотный диапазон, в котором поглощение составляет более 50 % находится в пределах 5,6 – 8 ГГц (рис. 3). Состав, содержащий 5 % углеродного волокна и 45 % карбонильного железа обладает большим поглощением (87 %), но на частоте 5,9 ГГц. Частотный диапазон работы его гораздо уже, чем у материала с содержанием карбонильного железа 50 % (рис. 3). В связи с этим радиопоглощающий материал с содержанием 5 % углеродного волокна и 50 % карбонильного железа представляет большую ценность, т.к. он имеет более широкий диапазон работы с поглощением 80 %. Радиопоглощающий материал, содержащий 45 % карбонильного железа и 5 % углеродного волокна будет эффективен для поглощения электромагнитного излучения на частоте 5,9 ГГц. Таким образом введение в состав радиопоглощающего материала на карбонильном железе углеродного волокна увеличило коэффициент поглощения электромагнитного излучения и расширило частотный диапазон его работы.

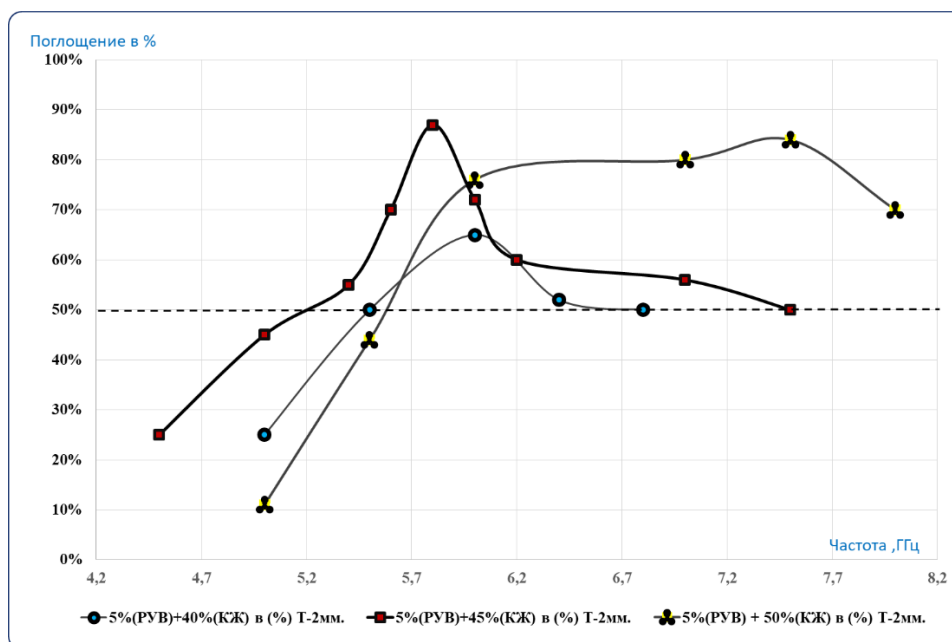


Рисунок 3 - Влияние количества карбонильного железа на коэффициент поглощения радиопоглощающего материала

Выводы

Разработан радиопоглощающий материал на основе этиленпропиленового каучука с содержанием 50 % карбонильного железа марки Р-20 и 5 % углеродного волокна. Максимальное поглощение электромагнитного излучения составляет 80 % на частоте 6,2 – 7,7 ГГц. Частотный диапазон, в котором поглощение составляет более 50 % находится в пределах 5,6 – 8,0 ГГц. Введение в полимер смеси карбонильного железа и углеродного волокна позволило существенно увеличить поглощение ЭМИ и расширить частотный диапазон работы радиопоглощающего материала.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по теме «Организация импортозамещающего производства самоклеящихся радиопоглощающих материалов с повышенными защитными свойствами» в рамках Государственного контракта №075-11-2022-008 от 6 апреля 2022 г., идентификатор государственного контракта 000000S407522QMX0002.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алимин Б.Ф. Современные разработки поглотителей электромагнитных волн и радиопоглощающих материалов. – Зарубежная радиоэлектроника, 1989, №2, с. 75 – 82.
2. Ковалева Т.Ю., Безъязыкова Т.Г., Шафпанский В.С. Магнитодиэлектрики для СВЧ – поглощающих экранов. – Радиоэлектроника и связь, 1991, №2, с. 84 – 86.
3. Казанцева Н. Е., Рыбкина Н.Г., Чмутин И.А. Перспективные материалы для поглотителей электромагнитных волн сверхвысокочастотного диапазона. – Радиотехника и электроника, 2003, т. 1, с. 161 – 163.
4. Островский О.С., Одаренко Е.Н., Шматько А.А. Защитные экраны и поглотители электромагнитных волн - Физическая инженерия поверхности, 2003, т. 1, с. 161 – 163.
5. Лыньков Л.М., Богут В.Н., Боротько Т.В., Украинец Е.А., Колбун Н.В. Новые материалы для экранов электромагнитного излучения. Доклады Бгуйр. - №3 – 2004, с. 152 – 167.
6. Abdolali Ali, Oraizi Homaeoon, Tavakoli Ahad. Ultra Wide Band Radar Absorbing Materials. Elektromagnetics Research Symposium Proceedings, Moscow, Russia, August 18–21, 2009, 351 с.
7. Wallace J.L. Broadband Magnetic Microwave Absorbers: Fundamental Limitations // IEEE Trans. Magn. - 1993. - 29, №6, Pt 3. - P. 4209-4214.

8. Лопатин А.В., Казанцев Ю. Н. и др. Радиопоглотители на основе магнитных полимерных композитов и частотно-селективных поверхностей – Радиотехника и электроника, 2008, т.53, № 9, с. 1176-1184.
9. Антонов А.С., Панина Л.В., Сарычев А.К. Высокочастотная магнитная проницаемость композитных материалов, содержащих карбонильное железо. – Журнал технической физики, 1989, т. 59, №6, с. 88 – 94.
10. Михайлин Ю.А. Специальные полимерные композиционные материалы. СПб.: Научные основы и технологии, 2008. 660.
11. Колесов В.В., Петрова Н.Г., Фионов А.С. Радиопоглощающие материалы на основе наполненных полимеров // 16-я международная крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь. Украина. 2006. с. 594 – 595.
12. Лопатин А.В., Казанцева Е.Н., Казанцев Ю.Н. Эффективность использования магнитных полимерных композитов в качестве радиопоглощающих материалов. Радиотехника и электроника – 2008 – т. 53, №5, с. 517 – 526.
13. Петров В.М., Гагулин В.В. Радиопоглощающие материалы. – Неорганические материалы, 2001, т.37, №2, с. 135 – 141.
14. Хачатуров А.А., Фионов А.С., Колесов В.В., Потапов Е.Э., Ильин Е.М. Функциональные эластомерные композиционные материалы на основе бутадиен-стирольного каучука и магнетита. РЭНСИТ, 2019, том 11, №2., с.189-199.
15. Крюков А.В., Еремеев А.С. Новые радиопоглощающие гибкие материалы на основе углеродной матрицы с различными синтетическими наполнителями и оценка их поглощающих свойств в СВЧ диапазоне. РЭНСИТ, 2020, 12(3):335-340. DOI: 10.17725/rensit.2020.12.335.
16. Xiangyu Zheng, Haiwei Zhang, Zhihao Liu, Rijia Jiang, Xing Zhou, Functional composite electromagnetic shielding materials for aerospace, electronics and wearable fields, Materials Today Communications, Volume 33, 2022, 104498, ISSN 2352-4928, <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104498>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352492822013393>)
17. C. Retailleau, J. Alaa Eddine, F. Ndagijimana, F. Haddad, B. Bayard, B. Sauviac, P. Alcouffe, M. Fumagalli, V. Bounor-Legaré, A. Serghei, Universal behavior for electromagnetic interference shielding effectiveness of polymer based composite materials, Composites Science and Technology, Volume 221, 2022, 109351, ISSN 0266-3538, <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2022.109351>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353822000938>)
18. Yingjie Chang, Ruixing Hao, Yaqi Yang, Guizhe Zhao, Yaqing Liu, Hongji Duan, Progressive conductivity modular assembled fiber reinforced polymer composites for absorption dominated ultraefficient electromagnetic interference shielding, Composites Part B: Engineering, Volume 260, 2023, 110766, ISSN 1359-8368, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.110766>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135983682300269X>)
19. . Влияние формы, химического и фазового состава частиц на основе Fe на СВЧ-характеристики композитов с диэлектрической матрицей / Елсуков Е.П., Розанов К.Н. и др. // Журнал технической физики – 2009 – т.79, вып. 4 – с. 125-130.
20. Петров В., Николайчук Г. и др. Многоцелевые радиопоглощающие материалы на основе магнитных нано структур: получение, свойства, применение. – Компоненты и технологии, 2008, №10, с. 147 – 150.
21. Журавлев В.А., Сусяев В.И. и др. Радиопоглощающие свойства содержащих карбонильное железо композитов на СВЧ и КВЧ – Исследовано в России, 2010, 035/100608, с. 404 – 411.
22. Серебрянников С.П., Чепарин В.П., Румянцев П.А., Еремцова Л.Л. Электродинамические свойства диспергированных гексаферритовых наполнителей и радиопоглощающих покрытий. – Электричество, 2013, №5, с. 37 – 40.
23. Серебрянников С.П., Чепарин В.П., Китайцев А.А., Смирнов Д.О. Влияние толщины покрытия с наполнителем в виде высокоанизотропного феррита на величину поглощения электромагнитного излучения. Магнетизм, дальнее и ближнее спин-спиновое взаимодействие. – Сб. трудов XVII Междунар. Конф., (Москва – Фирсановка, 20 -22 ноября 2009 г.), с. 223 – 229.
24. Серебрянников С.В., Чепарин В.П., Смирнов Д.О., Румянцев П.А., Китайцев А.А., Еремцов Л.Л. Свойства композиционных материалов на основе ультрадисперсных ферритмагнитных наполнителей. – Электричество, 2011, №3, с. 78 – 80.
25. Taleghani H.G., Aleahmad M., Eisazadeh H. Preparation and Characterization of Polyaniline Nanoparticles Using Various Solutions. – World Applied Sciences Journal, 2009, No. 6 (12), pp. 1607–1611.
26. Журавлев В.А., Сусяев В.И., Доценко О.А., Бабинович А.Н. Композиционный радиоматериал на основе карбонильного железа для миллиметрового диапазона длин волн // Известия высших учебных заведений. Физика. 2010, №8, с. 96 – 97.
27. Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч.тр. [Электронный ресурс] / науч. ред. В.Н. Бондаренко; отв. за вып. А.А. Левицкий. Электрон. дан. (31 мб). Красноярск: Сиб. федер.ун-т, 2016.

28. ГОСТ 30381-95 / ГОСТ Р 50011-92. Совместимость технических средств электромагнитная. Поглотители электромагнитных волн для экранированных камер. Общие технические условия.

REFERENCES

1. Alimin B.F. Modern development of electromagnetic wave scavengers and radio absorption materials. - Foreign radio electronics, 1989, 2, p. 75 - 82.
2. Kovaleva T.Y., Besyazykova T.G., Shafpansky V.S. Magnetodielectric for microwave - absorbing screens. - Radioelectronics and communication, 1991, 2, p. 84 - 86.
3. Kazantseva N. Y., Rybkina N.G., Chmutin I.A. Perspective materials for electromagnetic wave absorbers of ultra-high frequency range. - Radio and Electronics, 2003, t. 1, p. 161 - 163.
4. Ostrovsky O.S., Odarenko E.N., Shmatko A.A.. Protective shields and absorbers of electromagnetic waves - Physical Surface Engineering, 2003, t. 1, p. 161 - 163.
5. Lynkov L.M., Bogut V.N., Borotko T.V., Ukrainian E.A., Kolbun N.V. New materials for screens of electromagnetic radiation. Bhuir Reports. - 3 - 2004, p. 152 - 167.
6. Abdolali Ali, Oraizi Homaeoon, Tavakoli Ahad. Ultra Wide Band Radar Absorbing Materials. Elektromagnetics Research Symposium Proceedings, Moscow, Russia, August 18-21, 2009, 351 c.
7. Wallace J.L. Broadband Magnetic Microwave Absorbers: Fundamental Limitations // IEEE Trans. Magn. - 1993. - 29, №6, Pt 3. - P. 4209-4214.
8. Lopatin A.V., Kazantsev Y. N. etc. Radioadsorbents based on magnetic polymer composites and frequency-selective surfaces - Radioengineering and electronics, 2008, vol. 53, 9, pp. 1176-1184.
9. Antonov A.S., Panina L.V., Sarychev A.K. High-frequency magnetic permeability of composite materials containing carbonyl iron. - Journal of Technical Physics, 1989, vol. 59, 6, p. 88 - 94.
10. Mikhailin Y.A. Special polymer composite materials. SPb.: Scientific bases and technologies, 2008. 660.
11. Wheels V.V., Petrova N.G., Fionov A.S. Radio absorbing materials based on filled polymers // 16th International Crimean conference «VHF-technology and telecommunications technologies». Sevastopol. Ukraine. 2006. p. 594 - 595.
12. Lopatin A.V., Kazantseva E.N., Kazantsev Y.N. Efficiency of use of magnetic polymer composites as radio absorbing materials. Radio and Electronics - 2008 - t. 53, 5, p. 517 - 526.
13. Petrov V.M., Gagulin V.V. Radio absorbing materials. - Inorganic materials, 2001, vol. 37, 2, pp. 135 - 141.
14. Khachaturov A.A., Fionov A.S., Kolesov V.V., Potapov E.E., Ilyin E.M. Functional elastomeric composite materials based on styrene-butadiene rubber and magnetite. RENSIT, 2019, volume 11, no. 2., pp. 189-199.
15. Kryukov A.V., Eremeev A.S. New radio-absorbing flexible materials based on a carbon matrix with various synthetic fillers and evaluation of their absorbing properties in the microwave range. RENSIT, 2020, 12(3):335-340. DOI: 10.17725/rensit.2020.12.335.
16. Xiangyu Zheng, Haiwei Zhang, Zhihao Liu, Rijia Jiang, Xing Zhou, Functional composite electromagnetic shielding materials for aerospace, electronics and wearable fields, Materials Today Communications, Volume 33, 2022, 104498, ISSN 2352-4928, <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104498>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352492822013393>)
17. C. Retaileau, J. Alaa Eddine, F. Ndagijimana, F. Haddad, B. Bayard, B. Sauviac, P. Alcouffe, M. Fumagalli, V. Bounor-Legaré, A. Serghei, Universal behavior for electromagnetic interference shielding effectiveness of polymer based composite materials, Composites Science and Technology, Volume 221, 2022, 109351, ISSN 0266-3538, <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2022.109351>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353822000938>)
18. Yingjie Chang, Ruixing Hao, Yaqi Yang, Guizhe Zhao, Yaqing Liu, Hongji Duan, Progressive conductivity modular assembled fiber reinforced polymer composites for absorption dominated ultraefficient electromagnetic interference shielding, Composites Part B: Engineering, Volume 260, 2023, 110766, ISSN 1359-8368, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.110766>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135983682300269X>)
19. The influence of the form, chemical and phase composition of Fe-based particles on the VHF characteristic of composites with dielectric matrix / Elsukov H.P., Rozanov K.N. etc. // Journal of Technical Physics - 2009 - vol. 79, vol. - pp. 125-130.
20. Petrov V., Nikolaychuk G. et al. Multi-purpose radio absorbing materials based on magnetic nano structures: receiving, properties, applications. - Components and Technologies, 2008, 10, p. 147 - 150.
21. Zhuravlev V.A., Suslyaev V.I. etc. Radio absorbing properties of carbonyl iron-containing composites on microwave and microwave surface - Studied in Russia, 2010, 035/100608, p. 404 - 411.
22. Serebrennikov S.P., Cheparin V.P., Rumyantsev P.A., Eremsova L.L. Electrodynamics properties of dispersed hexaferrite fillers and radio-absorbing coatings. - Electricity, 2013, 5, p. 37 - 40.
23. Serebrennikov S.P., Cheparin V.P., Chinese A.A., Smirnov D.O. Influence of thickness of coating with filler in the form of high anisotropic ferrite on the amount of absorption of electromagnetic radiation. Magnetism,

distant and near spin-spin interaction. - Sat. works of XVII Mezhdunar. Conf., (Moscow - Firsanovka, 20 - 22 November 2009), pp. 223 - 229.

24. Serebrennikov S.V., Cheparin V.P., Smirnov D.O., Rumyantsev P.A., Chinese A.A., Eremsov L.L. Properties of compositions based on ultradispersed ferrymagnetic fillers. - Electricity, 2011, 3, p. 78 - 80.

25. Taleghani H.G., Aleahmad M., Eisazadeh H. Preparation and Characterization of Polyaniline Nanoparticles Using Various Solutions. – World Applied Sciences Journal, 2009, No. 6 (12), pp. 1607–1611.

26. Zhuravlev V.A., Suslyayev V.I., Dotsenko O.A., Babinovich A.N. Carbonyl iron composite radio material for millimeter wavelength range // Izvestia of higher educational institutions. Physics. 2010, 8, p. 96 - 97.

27. Modern problems of radio electronics: collection of scientific tr. [Electronic resource] /scientific ed. V.N. Bondarenko; rev. for issue A.A. Levitsky. Electron. dan. (31 MB). Krasnoyarsk: Sib. feder.Univ., 2016.

28. GOST 30381-95 / GOST R 50011-92. Electromagnetic compatibility of technical means. Electromagnetic wave absorbers for shielded cameras. General technical conditions.

Информация об авторах:

Черкасов Василий Дмитриевич

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск, Россия,

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Прикладная механика»

E-mail: vd-cherkasov@yandex.ru

Шербак Юрий Петрович

Саровский физико-технический институт Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, г. Саров, Россия,

кандидат технических наук, доцент, советник руководителя Саровского физико-технического института Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ.

E-mail: ypscherbak@gmail.com

Черкасов Дмитрий Васильевич

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск, Россия,

кандидат технических наук, доцент кафедры «Прикладная механика».

E-mail: dv-cherkasov@yandex.ru

Information about authors:

Cherkasov Vasilii D.

National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department «Applied Mechanics».

E-mail: vd-cherkasov@yandex.ru

Shcherbak Yuri P.

Sarov Institute of Physics and Technology National Research Nuclear University MEPhI, Advisor to the Head, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor.

E-mail: ypscherbak@gmail.com

Cherkasov Dmitry V.

National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor «Applied Mechanics».

E-mail: dv-cherkasov@yandex.ru

Н.И. ШЕСТАКОВ¹, Н.Д. АЛЕШИН¹, А.Д. МАКАРОВ¹¹ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
г. Москва, Россия

РЕСУРСНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ПЫЛИ УНОСА АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ЗАВОДОВ

Аннотация. В современной строительной отрасли актуальна проблема поиска материалов с повышенной устойчивостью, которые обеспечивали бы минимальное экологическое воздействие при оптимальной экономической эффективности. С учетом глобальных трендов в области экологии и устойчивого развития акцентируется внимание на рециклинге и повторном использовании производственных отходов. Особый интерес представляет пылевидный материал, образующийся в процессе работы асфальтобетонных заводов. В рассматриваемой работе изучается потенциал интеграции такого типа отходов в качестве альтернативного строительного ресурса. Данная статья акцентирует внимание на неотложной необходимости адаптации принципов устойчивости в строительной практике, в частности, через интеграцию материалов, обладающих минимальным экологическим следом. Ключевым аспектом исследования является концепция рециклинга пылевидных отходов асфальтобетонного производства, что может способствовать оптимизации ресурсного потенциала и снижению экологической нагрузки на экосистему. В работе рассматриваются различные составы пыли, полученные на асфальтобетонных заводах разного принципа действия. Исследована морфология частиц и параметр битумоемкости. Установлено, что при замещении минерального порошка до 50% пылью уноса возможен существенный экологический и экономический эффект для дорожно-строительной отрасли.

Ключевые слова: пыль-уноса, асфальтобетонные смеси, минеральный порошок, экологическая безопасность, биопозитивность, дорожное строительство.

N.I. SHESTAKOV, N.D. ALESHIN, A.D. MAKAROV

¹National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

RESOURCE POTENTIAL OF DUST ENTRAINMENT OF ASPHALT-CONCRETE PLANTS

Abstract. In the modern construction industry, the problem of finding materials with increased stability that would provide minimal environmental impact with optimal economic efficiency is urgent. Considering global trends in the field of ecology and sustainable development, attention is focused on recycling and reuse of industrial waste. Of particular interest is the pulverized material formed during the operation of asphalt concrete plants. In this paper, the potential of integrating this type of waste as an alternative construction resource is studied. This article focuses on the urgent need to adapt the principles of sustainability in construction practice through the integration of materials with minimal environmental footprint. The key aspect of the study is the concept of recycling of pulverized waste from asphalt concrete production, which can help optimize the resource potential and reduce the environmental burden on the ecosystem. The study examines various dust compositions obtained from asphalt plants of different operating principles. The morphology of particles and the bitumen capacity parameter were investigated. It was found that by replacing up to 50% of mineral powder with carry-over dust, there can be a significant environmental and economic impact for the road construction industry.

Keywords: entrainment dust, asphalt concrete mixtures, mineral powder, environmental safety, biopositivity, road construction.

Введение

Интенсивное развитие транспортной инфраструктуры Российской Федерации играет ключевую роль в обеспечении устойчивого экономического роста и социального развития страны. Этот процесс сопряжен с повышенным спросом на качественные дорожно-строительные материалы, в частности, на асфальтобетон.

Согласно данным Федеральной службы государственной статистики (Росстат), только за 2022 год было уложено около 165 миллионов квадратных метров асфальтобетонных покрытий на автомобильных дорогах России. Этот показатель является отражением объемов асфальтобетонных смесей, используемых в строительстве дорожной инфраструктуры страны. Этот быстрый темп строительства дорог свидетельствует о необходимости уделять особое внимание снабжению рынка качественными и долговечными материалами для дорожного строительства.

Однако следует отметить, что дорожные работы в России подвержены сезонным ограничениям, связанным с температурными условиями. Укладка асфальтобетонных смесей возможна только в определенных климатических условиях, что создает значительную нагрузку на производственные мощности заводов, производящих асфальтобетонные смеси. Это также может привести к временным задержкам и дефициту материалов для строительства дорожной инфраструктуры в некоторых регионах страны.

В свою очередь, Москва и Московская область, будучи одними из крупнейших центров экономической активности в России, обладают значительным числом стационарных асфальтобетонных заводов (рисунок 1). Эти заводы имеют производительность, варьирующуюся от 100 до 320 тонн в час и играют важную роль в обеспечении стройиндустрии асфальтобетонными смесями.

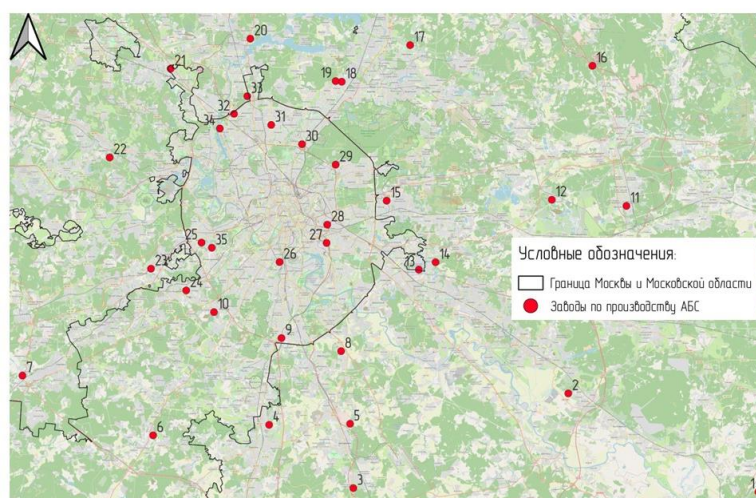


Рисунок 1 – Территориальное расположение заводов по производству асфальтобетонных смесей в Москве и Московской области

Равномерное географическое размещение асфальтобетонных заводов является оптимальным с точки зрения логистики доставки горячих асфальтобетонных смесей, что способствует сокращению времени и затрат на транспортировку, а также снижению проблем с транспортной инфраструктурой. Однако это размещение также приносит определенные негативные последствия для окружающей среды, в частности, образование центров экологической нагрузки.

Экологическое воздействие, связанное с асфальтобетонными заводами, имеет множество аспектов и источников. Одним из важных аспектов в современной практике производства асфальтобетонных смесей является использование отходов и рециклинг материалов [1-5], что значительно снижает негативное воздействие на окружающую среду.

Одним из перспективных методов снижения экологической нагрузки является интеграция систем утилизации и переработки отходов в процесс производства

асфальтобетона. Этот подход позволяет эффективно использовать отходы, как сырьевые ресурсы для создания новых асфальтобетонных смесей. Это не только сокращает объемы отходов, направляемых на утилизацию и переработку, но и снижает потребность в добыче и переработке природных ресурсов, что является важным аспектом с точки зрения снижения экологической нагрузки. Научно обоснованный и экологически ориентированный подход к производству асфальтобетонных смесей, включая активное использование отходов, содействует снижению негативного воздействия на окружающую среду и обеспечивает устойчивость индустрии дорожного строительства.

Сушильные барабаны, применяемые в составе асфальтосмесительных установок, представляют собой источник интенсивного образования пыли, что ведет к формированию атмосферной загазованности и контаминации воздуха асфальтобетонными частицами на территории асфальтобетонного завода и в смежных районах. В процессе сушки и предварительной обработки инертных компонентов, происходит выделение пылевидных фракций, которые уносятся из сушильного барабана с потоком выходящих газов со скоростью, достигающей 10 м/с. Количество частиц, которое может быть перенесено при такой скорости, составляет приблизительно 6-8% от массы обрабатываемого минерального материала, что в свою очередь соответствует концентрации частиц в выбрасываемых газах на уровне 300-400 г/м³ [6,7].

Тем не менее, асфальтобетонные заводы, вырабатывают пыль как побочный продукт в процессе своей деятельности. Эта пыль, зачастую содержащая мельчайшие заполнители, остатки битума и минеральные добавки, традиционно рассматривается как отход и представляет потенциальную опасность для окружающей среды. Однако, если рассматривать эту пыль с точки зрения возможности ее переработки и вторичного использования, она может найти применение в производстве дорожно-строительных материалов.

Исследователи из разных областей науки изучали воздействие пыли, переносимой воздухом, на окружающую среду и здоровье человека. В работах, проведенных [8-10], анализировался канцерогенный потенциал конденсатов асфальтовых паров на моделях млекопитающих. Результаты исследований указывают на то, что определенные типы асфальтовых паров могут быть связаны с возникновением опухолей, хотя такие эффекты, скорее всего, связаны с парообразными компонентами битума, а не пылью, выделяемой в процессе работы асфальтобетонных заводов.

Таким образом, эффективное управление образованием и уносом пыли на асфальтобетонных заводах имеет важное значение для минимизации негативного воздействия на окружающую среду и обеспечения безопасности здоровья работников и населения вблизи таких предприятий.

В ряде научных статей [11-13] было установлено отрицательное воздействие деятельности асфальтобетонных заводов на риски ингаляции загрязненной почвы и ухудшение качества атмосферного воздуха. Параллельно, в исследовании, опубликованном в работе [14], осуществляется моделирование выбросов, выделяющихся из асфальтобетонных покрытий, включая разнообразные летучие вещества, включая пыль. Предложенная модель предоставляет ценные сведения о влиянии различных факторов на эти выбросы, что дает возможность более эффективно управлять уровнем экологического воздействия.

Кроме того, выбросы пыли с асфальтовых заводов и связанные с ними побочные продукты были подвергнуты анализу в ряде научных исследований [15-20] с целью выявления их потенциального воздействия на окружающую среду и здоровье человека. В существующей литературе выявлены проблемы, связанные с возможной канцерогенностью, респираторными эффектами и негативными последствиями для экосистем. Несмотря на имеющиеся данные, для формулирования окончательных выводов и разработки действенных мер по снижению рисков требуются дополнительные исследования и актуальные научные данные, которые будут учитывать текущий контекст и новейшие технологии в данной области.

Материалы и методы

В сфере производства асфальтобетонных смесей традиционно используют минеральный порошок в соответствии с ГОСТ 32761-2014, получаемый из карбонатных пород. Производство такого порошка обычно включает в себя процесс измельчения горных пород с получением удельной поверхности частиц в диапазоне от 1500 до 2000 см²/г. Этот процесс требует как разработки исходного сырья, так и затрат на его термическую обработку и измельчение. Однако такой комплексный технологический подход оказывает существенное негативное воздействие на окружающую среду и, следовательно, требует разработки более экологически устойчивых методов производства.

Распространенность использования минеральных порошков, основанных на карбонатных породах, связана с их способностью эффективно взаимодействовать с окисленными битумами и повышать адгезионные свойства асфальтового вяжущего к породам щебня. Тем не менее, эти высокофункциональные материалы требуют значительных энергетических и технологических затрат на их производство, что в свою очередь сопряжено с выбросами парниковых газов и другими негативными последствиями для окружающей среды.

Для уменьшения окружающего воздействия и разработки более биопозитивных подходов к производству асфальтобетонных смесей, актуальны исследования по поиску альтернативных материалов и технологий, которые могли бы заменить традиционные минеральные порошки. Эти новые подходы могут включать в себя использование более экологически устойчивых источников материалов, разработку эффективных методов их переработки и применение более эффективных способов взаимодействия с асфальтовым вяжущим.

В данной работе выбран минеральный порошок МП-1 в качестве контрольного образца, для проведения сравнительных анализов исследуемых материалов. С целью предоставления подробной информации о характеристиках контрольного образца, приведены результаты анализа его качественных показателей и химического состава по оксидам в соответствующих таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Показатели качества минерального порошка МП-1

Показатель	Единицы измерения	Полученные значения
Истинная плотность	г/см ³	2,84
Средняя плотность	г/см ³	2,31
Пористость	%	18
Набухание с битумом	%	1,9
Битумоемкость	г	60
Влажность	%	0,4

Таблица 2 – Химический состав минерального порошка МП-1

Содержание, % по массе					
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	CaCO ₃ +MgCO ₃
7,7	0,34	1,12	29,1	20,3	90,9

Диоксид кремния присутствует в относительно небольших количествах, что может указывать на низкую силикатность минерального порошка. Диоксид алюминия и диоксид железа также присутствуют в небольших количествах, что указывает на низкое влияние этих оксидов на свойства асфальтобетона.

Оксид кальция и оксид магния, составляют значительную долю химического состава. Они являются основными компонентами карбонатов кальция и магния, что в значительной степени влияет образование стабильной структуры получаемых на его основе асфальтобетонов и их характеристики.

Для изучения возможности замещения части минерального дисперсными отходами АБЗ в работе рассматриваются два вида пыли уноса с различных типов уловителей, согласно таблице 3.

Таблица 3 – Характеристики рассматриваемых образцов пыли уноса

Обозначение	Тип пылеуловителя на АБЗ	Удельная поверхность, см ² /г	Применяемые породы инертных	Производимые материалы на АБЗ
ПАУ 1	Сухой рукавный фильтр	1970	Гранитный щебень	Щебеночно-мастичная асфальтобетонная смесь; Полимер-асфальтобетонная смесь
ПАУ 2	Сухой циклонный	1640	Гравийный щебень	Мелкозернистая асфальтобетонная смесь; Песчаная асфальтобетонная смеси

Для дальнейшего исследования был проведен химический элементный анализ с помощью растрового микроскопа с возможностью работы по поверхности материалов. Полученные результаты представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Сводная таблица элементного состава рассматриваемых вариантов пыли асфальтосушильных установок (ПАУ)

Полученное значение	Содержание элементов, %									
	O	Si	Fe	Al	K	Na	Ca	Mg	Ti	Mn
<i>Элементный состав ПАУ 1</i>										
Среднее	51,39	25,56	5,53	7,89	3,50	2,18	2,08	1,07	0,42	0,38
Станд. отклонение	2,16	2,88	4,89	0,86	1,02	1,74	1,16	0,74	0,33	0,19
<i>Элементный состав ПАУ 2</i>										
Среднее	48,76	21,04	10,79	7,84	3,12	1,41	3,12	3,15	0,78	-
Станд. отклонение	3,80	4,03	6,14	1,39	1,76	1,18	2,14	2,03	0,53	-

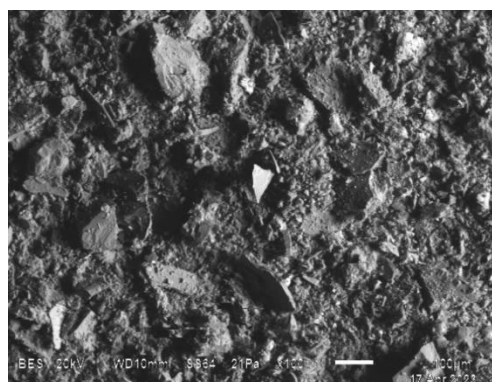
Кислород и кремний являются наиболее преобладающими в обоих образцах. Они часто встречаются в минералах, таких как кварц и фельдспат, что указывает на наличие кремнезема или других минералов на основе кремния в пыли.

Оба образца пыли уноса асфальтобетонного завода содержат похожие элементы, но их концентрации отличаются. Это может быть связано с различными источниками или условиями формирования пыли. Наиболее значительные различия наблюдаются в содержании железа, кальция и магния. Элементный анализ может помочь в понимании происхождения пыли и возможного воздействия на окружающую среду или здоровье человека.

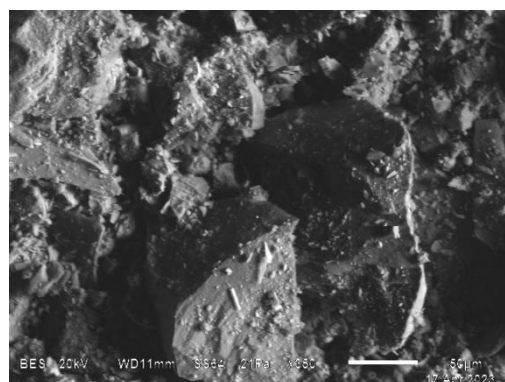
Результаты и обсуждение

Микроструктура частиц пыли уноса, получаемых на асфальтобетонных заводах, существенно влияет на физико-механические свойства производимых асфальтобетонных смесей. В контексте усиления требований к долговечности и качеству дорожных покрытий, анализ морфологии и микроструктуры таких частиц становится весьма актуальным. В связи с этим, были получены снимки поверхностей (рисунок 2) различных образцов пыли уноса с увеличением до 400 раз.

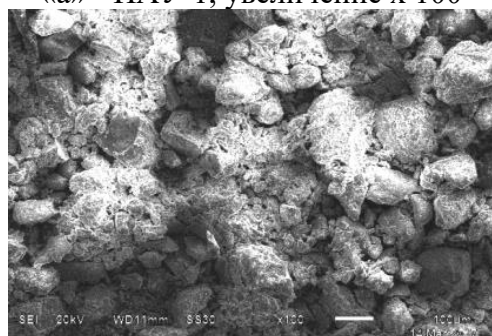
Данный анализ позволит не только глубже понять природу и характеристики используемых материалов, но и оптимизировать процесс производства, а также повысить качество готовой продукции.



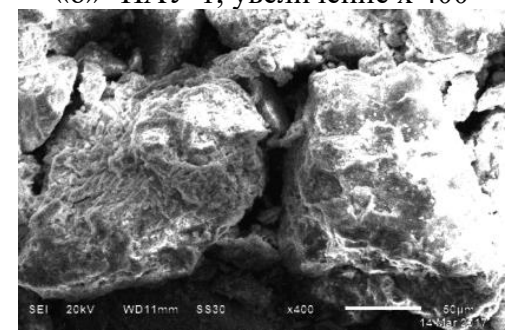
«а» - ПАУ-1, увеличение x 100



«б»- ПАУ-1, увеличение x 400



«в» - ПАУ-2, увеличение x 100



«г» - ПАУ-2, увеличение x 400

Рисунок 2 – Морфология поверхности исследуемых материалов

При изучении микроструктуры обоих материалов было выявлено, что ПАУ-1 обладает остроугольными элементами, что может быть связано с его гранитной основой, известной своей твердостью и характерной кристаллической структурой. С другой стороны, ПАУ-2 демонстрирует рыхло-зернистую микроструктуру с более окатанными гранями, что указывает на его гравийное происхождение, где элементы, как правило, более округлые из-за естественного износа.

Различия в микроструктуре наполнителей напрямую коррелируют с типом пылеуловителя и использованными для него инертными материалами. Эти различия в структуре, будут влиять на свойства и качество производимых в дальнейшем материалов.

Прочность асфальтобетона во многом зависит от количества и качества использованного битума. Оптимальное содержание битума обеспечивает необходимую связность между зернами, что способствует увеличению прочности при сжатии и устойчивости к растяжению. При недостатке битума смесь становится хрупкой и подвержена быстрому растрескиванию, а при избытке - мягче и менее устойчивой к деформациям.

Устойчивость асфальтобетонного покрытия к усталости зависит от способности смеси противостоять многократным нагрузкам без образования трещин. Оптимальное содержание битума улучшает эластичные свойства смеси, позволяя ей лучше сопротивляться деформациям под воздействием транспорта.

Битумоемкость асфальтобетонных смесей является одним из ключевых параметров, который влияет на качество и долговечность асфальтобетонного покрытия. Это показатель, характеризующий количество битума, необходимого для обеспечения оптимальной уплотненности и связности асфальтобетонной смеси. Для определения степени влияния пыли уноса на битумоемкость были проведены экспериментальные исследования по ГОСТ 32766 — 2014 «Дороги автомобильные общего пользования. Порошок минеральный. Метод определения показателя битумоемкости» Результаты представлены в таблице 5.

Таблица 5- Сводная таблица показателя битумоемкости

№ состава	Содержание компонентов, %			Битумоемкость
	МП-1	ПАУ-1	ПАУ-2	
1	100	0	0	90,0
2	75	25	0	81,8
3	50	50	0	72,4
4	25	75	0	69,7
5	0	100	0	68,3
6	75	0	25	64,8
7	50	0	50	57,3
8	25	0	75	51,6
9	0	0	100	32,4

При 100% содержании МП-1 (без других добавок) битумоемкость составляет 90,0%. Это наивысший показатель в представленных данных. С уменьшением содержания МП-1 (от 100% до 0%) и одновременным увеличением содержания ПАУ-1 битумоемкость уменьшается, достигая 68,3% при 100% содержании ПАУ-1.

При замещении минерального порошка МП-1 на ПАУ-1 битумоемкость уменьшается до 68,3%, а при замещении на ПАУ-2 битумоемкость уменьшается еще сильнее, и достигает 32,4%. Таким образом, добавление ПАУ-1 уменьшает битумоемкость в сравнении с чистым МП-1, но этот компонент все равно обладает более высокой битумоемкостью по сравнению с ПАУ-2. ПАУ-2 существенно снижает битумоемкость, особенно при высоких концентрациях.

Битумоемкость играет решающую роль в определении свойств асфальтобетонных смесей. Правильный выбор содержания битума в смеси позволяет достичь оптимального баланса между прочностью, водонепроницаемостью и устойчивостью к усталости, что является ключом к созданию долговечного и качественного дорожного покрытия.

Для определения показателя экономии минерального порошка, рассмотрены составы АБС и ЩМА. Предлагается вариант с частичной заменой минерального порошка на пыль уноса до 50%. Ориентировочная дозировка минерального порошка для выбранных составов в различных диапазонах основывается на известных значениях, в зависимости от подбора составов смесей. Производительность асфальтобетонных заводов варьируется от 480 до 1040 тонн в смену. Расход минерального порошка для АБ заводов разной производительности представлен в таблице 6.

Таблица 6 – Расход ПУ при частичном замещении минерального порошка

Вид асфальтобетонной смеси	Доля ПУ в составе МП, %	Расход ПУ при производительности АБЗ, т			
		480 т/см	720 т/см	840 т/см	1040 т/см
Смеси SMA и SP					
SMA-8 (Э), SP-8 (Э), SP-11(Н/Т)	25	8,4 – 13,2	12,6 – 19,8	14,7 – 23,1	18,2 – 28,6
	50	16,8 – 26,4	25,2 – 39,6	29,4 – 46,2	36,4 – 57,2
SMA-11 (Э), SP-16(Н/Т/Э)	25	9,6 – 14,4	14,4 – 21,6	16,8 – 25,2	20,8 – 31,2
	50	19,2 – 28,8	28,8 – 43,2	33,6 – 50,4	41,6 – 62,4

Таким образом путем замены от 25% до 50% минерального порошка пылью уноса, в зависимости от производительности АБЗ, можно значительно уменьшить стоимость применяемых дорожно-строительных материалов, в частности асфальтобетонов.

Выводы

С экологической точки зрения следует отметить многочисленные исследования, подтверждающие неблагоприятное воздействие выбросов асфальтобетонных заводов на окружающую среду и здоровье человека. Реализация методов ресайклинга позволяет перерабатывать часть производственных отходов, снижая тем самым экологический ущерб.

При анализе текущих тенденций и потребности в строительных материалах следует отметить экономическую целесообразность частичной замены минерального порошка. Применение вторичных производственных отходов способствует не только рациональному использованию природных ресурсов, но также предоставляет возможность генерации инновационного материала для модификации асфальтобетонных смесей.

Спектральный анализ двух образцов пыли уноса выявляет дифференциацию их химического состава, что свидетельствует о формировании данных образцов в различных условиях. Этот фактор может иметь значительное влияние на характеристики итоговой смеси. Микроскопические изображения микроструктуры образцов ПАУ-1 и ПАУ-2 показывают различия в морфологии частиц, что указывает на их различные физико-химические свойства.

Вместе с тем, использование пыли уноса способствует уменьшению экологического воздействия дорожного строительства. Вместо того, чтобы утилизировать или складировать такие материалы, их можно перерабатывать и использовать в конструктивных целях.

Таким образом, пыль уноса может предложить ряд технических, экономических и экологических преимуществ для дорожного строительства. Однако необходимы дополнительные исследования для определения оптимальных условий применения и понимания полного спектра её воздействия на свойства дорожных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бакаева Н.В., Черняева И.В. Принципы оценки эффективности градостроительной деятельности в России // Экономика строительства и природопользования. 2022. № 1-2 (82-83). С. 134-144.
2. Воеводин Е.С., Акулов К.А., Катаев С.А., Асхабов А.М., Кашура А.С Роль автомобилизации в экологии городской среды // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2021. № 3. С. 5-13.
3. Голенков В.А., Бакаева Н.В., Шишкина И.В. Основные направления обеспечения экологической безопасности автотранспортной инфраструктуры городского хозяйства на основе биосферосовместимых технологий // Строительство и реконструкция. 2012. № 2 (40). С. 55-62.
4. Борисевич Ю. А., Абдрахманова К. А., Саморай Д. Н., Алиханова А. Н. Устойчивое развитие как основа модернизации жилой застройки // Строительство и реконструкция. 2022. № 4(102). С. 87-111. DOI 10.33979/2073-7416-2022-102-4-87-111. EDN OFXYTR.
5. Kapucu N., Ge Y., Martín Y. et al. Urban resilience for building a sustainable and safe environment // Urban Governance. 2021. Pp. 1-7.
6. Королев Е.В., Иноземцев С.С., Шеховцова С.Ю., Шестаков Н.И., Иноземцев А.С. Технология дорожных бетонов: учебное пособие для обучающихся по направлениям подготовки 08.03.01 и 08.04.01 Строительство в 2 частях / Том 1. Москва, 2020.
7. Прилуцкая В.А. Проблемы экологии при строительстве и эксплуатации автомобильных дорог // Международный журнал прикладных наук и технологий Integral. 2017. № 4. С. 27.
8. Traxler, L. N., et al. Asphalt fume condensates produce a multiplicity of tumors in the A/J mouse // Journal of Applied Toxicology. 1995. 15(3), 197-204.
9. Манохин В.Я., Иванова И.А. Разработка методов повышения промышленной безопасности технологических процессов в смесителях асфальтобетонных заводов // Научный Вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2008. Выпуск №3 (11).
10. Горохов С.С. Очистка пыли и отходящих газов на АБЗ // Мир дорог. 2019. № 118. С. 62-63.
11. Dungan R. S. Board-invited review: Fate and transport of bioaerosols associated with livestock operations and manures // Journal of Animal Science. 2010. 88(11), 3693-3706.

12. Menzie C. A. et al. The importance of considering soil ingestion exposure for wildlife: An example from the asphalt industry // *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*. 2007. 13(2), 311-327.
13. Fulcher K. N. et al. Assessing the airborne particulate matter (PM_{2.5}) generated by two types of asphalt processes // *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2009. 6(11), 678-687.
14. Ghosh R. et al. Occupational exposures among construction workers: Variations by work tasks, trades, and sites // *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2013. 10(7), 366-375.
15. Wang C. et al. Emissions from asphalt pavement during construction: A predictive model // *Atmospheric Environment*. 2012. 55, 178-186.
16. Силкин В.В., Лупанов А.П., Рудакова В.В., Горохов С.С., Силкин А.В. Повышение экологической безопасности асфальтобетонных заводов // *Дороги и мосты*. 2019. № 1 (41). С. 273-292.
17. Лупанов А.П., Моисеева Н.Г., Гладышев Н.В. Выбросы загрязняющих веществ при производстве асфальтобетонных смесей и пути их снижения // *Наука и техника в дорожной отрасли*. 2013. № 4. С. 37-38.
18. Манохин В.Я., Иванова И.А., Головина Е.И. Безопасность технологических процессов просушивания и нагрева нерудных материалов асфальтобетона // *Информационные технологии в строительных, социальных и экономических системах*. 2022. № 1 (27). С. 138-143.
19. Манохин В.Я., Иванова И.А., Сазонова С.А. Разработка методов определения параметров рассеивания твердых атмосферных примесей // *Комплексная безопасность*. 2017. Т. 1. № 1. С. 27-30.
20. Чех Р.И., Куров Л.Н. Пути снижения пылевых выбросов на асфальтобетонных заводах // *Успехи современного естествознания*. 2011. № 7. С. 234-234

REFERENCES

1. Bakaeva N.V., Chernyaeva I.V. Principy ocenki effektivnosti gradostroitel'noj deyatel'nosti v Rossii. *Ekonomika stroitel'stva i prirodopol'zovaniya*. 2022. No. 1-2 (82-83). Pp. 134-144.
2. Voevodin E.S., Akulov K.A., Kataev S.A., Askhabov A.M., Kashura A.S. Rol' avtomobilizatsii v ekologii gorodskoy sredy. *Transportnye sooruzheniya. Ekologiya*. 2021. No. 3. Pp. 5-13.
3. Golenkov V.A., Bakaeva N.V., Shishkina I.V. Osnovnye napravleniya obespecheniya ekologicheskoy bezopasnosti avtotransportnoj infrastruktury gorodskogo hozyajstva na osnove biosferosovmestimyh tekhnologij. *Building and Reconstruction*. 2012. No. 2 (40). Pp. 55-62.
4. Borisevich YU. A., Abdrahmanova K. A., Samoraj D. N., Alihanova A. N. Ustojchivoe razvitie kak osnova modernizatsii zhiloy zastrojki. *Stroitel'stvo i rekonstrukciya*. 2022. No. 4(102). Pp. 87-111. DOI 10.33979/2073-7416-2022-102-4-87-111. EDN OFXYTR.
5. Kapucu N., Ge Y., Martin Y. Urban resilience for building a sustainable and safe environment. *Urban Governance*. 2021. Pp. 1-7.
6. Korolev E.V., Inozemcev S.S., Shekhovcova S.YU., Shestakov N.I., Inozemcev A.S. Tekhnologiya dorozhnyh betonov. uchebnoe posobie dlya obuchayushchihsya po napravleniyam podgotovki 08.03.01 i 08.04.01 Stroitel'stvo v 2 chastyah / Tom 1. Moskva, 2020.
7. Priluckaya V.A. Problemy ekologii pri stroitel'stve i ekspluatatsii avtomobil'nyh dorog. *Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh nauk i tekhnologii Integral*. 2017. No. 4. Pp. 27.
8. Traxler L. N. et al. Asphalt fume condensates produce a multiplicity of tumors in the A/J mouse. *Journal of Applied Toxicology*. 1995. 15(3), 197-204.
9. Manohin V.YA., Ivanova I.A. Razrabotka metodov povysheniya promyshlennoj bezopasnosti tekhnologicheskikh processov v smesitelyah asfal'tobetonnyh zavodov. *Nauchnyj Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arhitektura*. 2008. Vypusk №3 (11).
10. Gorohov S.S. Ochistka pyli i otdyashchih gazov na ABZ. *Mir dorog*. 2019. No. 118. Pp. 62-63.
11. Dungan R. S. Board-invited review: Fate and transport of bioaerosols associated with livestock operations and manures. *Journal of Animal Science*. 2010. 88(11). Pp. 3693-3706.
12. Menzie C. A. et al. The importance of considering soil ingestion exposure for wildlife: An example from the asphalt industry. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*. 2007. 13(2), 311-327.
13. Fulcher K. N., et al. (2009). Assessing the airborne particulate matter (PM_{2.5}) generated by two types of asphalt processes. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2009. 6(11). Pp. 678-687.
14. Ghosh R. et al. (2013). Occupational exposures among construction workers: Variations by work tasks, trades, and sites. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2013. 10(7), 366-375.
15. Wang C. et al. Emissions from asphalt pavement during construction: A predictive model. *Atmospheric Environment*. 2012. 55. Pp. 178-186.
16. Silkin V.V., Lupanov A.P., Rudakova V.V., Gorohov S.S., Silkin A.V. Povyschenie ekologicheskoy bezopasnosti asfal'tobetonnyh zavodov. *Dorogi i mosty*. 2019. No. 1 (41). Pp. 273-292.
17. Lupanov A.P., Moiseeva N.G., Gladyshev N.V. Vybrosty zagryaznyayushchih veshchestv pri proizvodstve asfal'tobetonnyh smesey i puti ih snizheniya. *Nauka i tekhnika v dorozhnoj otrasli*. 2013. № 4. Pp. 37-38.

18. Manohin V.YA., Ivanova I.A., Golovina E.I. Bezopasnost' tekhnologicheskikh processov prosushivaniya i nagreva nerudnykh materialov asfal'tobetona. *Informacionnye tekhnologii v stroitel'nykh, social'nykh i ekonomicheskikh sistemakh*. 2022. No. 1 (27). Pp. 138-143.
19. Manohin V.YA., Ivanova I.A., Sazonova S.A. Razrabotka metodov opredeleniya parametrov rasseivaniya tverdykh atmosferynykh primesej. *Kompleksnaya bezopasnost'*. 2017. T. 1. No. 1. Pp. 27-30.
20. CHEkh R.I., Kurov L.N. Puti snizheniya pylevykh vybrosov na asfal'tobetonnykh zavodah. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*. 2011. No. 7. Pp. 234-234

Информация об авторах:

Шестаков Николай Игоревич

ФГБОУ ВО "Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет"
(НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,
Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Градостроительства.
E-mail: SHestakovNI@mgsu.ru

Алешин Никита Дмитриевич

ФГБОУ ВО "Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет"
(НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,
Студент института архитектуры и градостроительства.
E-mail: nik.aleshin.03@mail.ru

Макаров Алексей Денисович

ФГБОУ ВО "Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет"
(НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,
Студент института архитектуры и градостроительства.
E-mail: Lesha-makarov-90@mail.ru

Information about authors:

Shestakov Nikolay I.

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Urban Planning
E-mail: SHestakovNI@mgsu.ru

Aleshin Nikita D.

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
Student of the Faculty of Construction
E-mail: nik.aleshin.03@mail.ru

Makarov Aleksei D.

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
Student of the Faculty of Construction
E-mail: Lesha-makarov-90@mail.ru

Уважаемые авторы!
Просим Вас ознакомиться с основными требованиями
к оформлению научных статей

- Представляемый материал должен быть **оригинальным, не опубликованным ранее** в других печатных изданиях.
- Объем материала, предлагаемого к публикации, измеряется числом знаков с учетом пробелов. Рекомендуемый объем статей: **от 15000 до 45000 знаков с пробелами**.
- Статья должна быть набрана на листах формата А4 шрифтом Times New Roman, размер 12 pt с одинарным интервалом, текст выравнивается по ширине; абзацный отступ – 1,25 см, правое поле – 2 см, левое поле – 2 см, поля внизу и сверху – 2 см; все страницы рукописи должны иметь сплошную нумерацию.
- Статья предоставляется в электронном виде по электронной почте или через систему электронной редакции.
- В одном сборнике может быть опубликована только **одна статья одного автора**, включая соавторство.
- Если статья возвращается автору на доработку, исправленный вариант следует прислать в редакцию повторно, приложив письмо с ответами на замечания рецензента. Доработанный вариант статьи рецензируется и рассматривается редакционной коллегией вновь. Датой представления материала считается дата поступления в редакцию окончательного варианта исправленной статьи.
- Аннотации всех публикуемых материалов, ключевые слова, информация об авторах, списки литературы будут находиться в свободном доступе на сайте соответствующего журнала и на сайте Российской научной электронной библиотеки – РУНЭБ (Российский индекс научного цитирования).

В тексте статьи не рекомендуется применять:

- обороты разговорной речи, техницизмы, профессионализмы;
- для одного и того же понятия различные научные термины, близкие по смыслу (синонимы), а также иностранные слова и термины при наличии равнозначных слов и терминов в русском языке;
- произвольные словообразования;
- сокращения слов, кроме установленных правилами русской орфографии, соответствующими стандартами.
- Сокращения и аббревиатуры должны расшифровываться по месту первого упоминания (вхождения) в тексте статьи.

Обязательные элементы:

- **заглавие (на русском и английском языке)** публикуемого материала должно быть точным и емким, слова, входящие в заглавие, должны быть ясными сами по себе, а не только в контексте; следует избегать сложных синтаксических конструкций, новых словообразований и терминов, а также слов узкопрофессионального и местного значения;
- **аннотация (на русском и английском языке)** кратко описывает объект исследования, мотивацию к проведению исследования, результаты исследования (рекомендуется указывать конкретные результаты и зависимости, полученные в исследовании), выводы (кратко); рекомендуемый объем – от 200 до 250 слов;
- **ключевые слова (на русском и английском языке)** – это текстовые метки, по которым можно найти статью при поиске и определить предметную область текста; обычно их выбирают из текста публикуемого материала, достаточно 5-10 ключевых слов.
- **список литературы**, на которую автор ссылается в тексте статьи; рекомендуемый объем списка литературы – не менее 20 источников.

В информации об авторах рекомендуется указывать ORCID, Scopus ID и SPIN-код, присвоенный в РИНЦ.

Редакция не взимает плату с авторов за подготовку, рецензирование и размещение в открытом доступе статей.

Право использования произведений предоставлено авторами на основании п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации.

С полной версией требований к оформлению научных статей
Вы можете ознакомиться на сайте <https://construction.elpub.ru/jour/index>

Адрес издателя:

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»
302026, Орловская область, г. Орел, ул. Комсомольская д. 95
+7 (4862) 75-13-18

www.oreluniver.ru
E-mail: info@oreluniver.ru

Адрес редакции

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»
302030, Орловская область, г. Орел, ул. Московская, 77.
+79065704999
<http://oreluniver.ru/science/journal/sir>
E-mail: str_and_rek@mail.ru

Материалы статей печатаются в авторской редакции.
Право использования произведений предоставлено авторами на основании
п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации

Технический редактор О.В. Юрова
Компьютерная верстка О.В. Юрова

Подписано в печать
Дата выхода в свет
Формат 70×108/16. Печ. л. 14,6
Цена свободная. Тираж 500 экз.
Заказ №

Отпечатано с готового оригинал-макета
на полиграфической базе ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»
302026, г. Орел, ул. Комсомольская, 95.