

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)

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)

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)

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

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

Римшин 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.ru и www.akc.ru

© ОГУ имени И.С. Тургенева, 2023

Содержание

К 70-ЛЕТИЮ АКАДЕМИКА РААСН Г.В. ЕСАУЛОВА

Теория инженерных сооружений. Строительные конструкции

- Галалюк А.В., Деркач В.Н.** Оценка механических характеристик
каменной кладки существующих зданий 5
- Гладких В.А., Домарова Е.В., Попов Д.С., Шакалова И.С.** Усиление
торкрет-бетоном несущих стен из каменной кладки 15
- Колчунов В.И., Крылов С.Б., Федоров С.С.** Жесткость
железобетонных конструкций при изгибе с учётом поперечной и
продольной сил (часть 1) 25
- Люблинский В.А., Стручков В.С.** Прочность и податливость
вертикальных стыков панельных зданий при сдвиге и кручении 41
- Меркулов С.И., Кашуба С.О., Есипов С.М.** Программа и методика
экспериментальных исследований железобетонных элементов с
внешним армированием композитными материалами при изгибе с
кручением 50

Безопасность зданий и сооружений

- Альзамили Х.Х., Эльшейх А.М.** Численное исследование поведения
железобетонных балок при высоких температурах 58
- Куприянов В.Н., Хабибулина А.Г., Сулейманов А.М.** Защита
фасадов объектов культурного наследия от воздействия косо-
го дождя: обзор экспериментальных исследований 73

Архитектура и градостроительство

- Воличенко О.В., Головина Е.В.** Модель анализа историко-
архитектурных объектов 86
- Енин А.Е., Абуасаd М.М.Х.** Системный подход к организации жилой
застройки на городских территориях в особых природных условиях
палестины 97
- Кривошапко С.Н.** Примеры архитектурных стилей, направлений и
стилевых течений для строительных сооружений криволинейной
формы 111

Строительные материалы и технологии

- Алтынбекова А.Д., Лукпанов Р.Е., Дюсембинов Д.С.,
Цыгулев Д.В., Енкебаев С.Б., Ержанова Н.К.** Разработка
комплексной добавки для производства буронабивных свай 131
- Рецензия на учебное пособие «Информационное моделирование
и искусственный интеллект в современном строительстве и
жилищно-коммунальном хозяйстве»** 144

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)
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)
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 №ФД 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, 2023

Contents

FOR THE 70TH ANNIVERSARY OF ACADEMICIAN OF THE RAASN G.V. YESAULOV

Theory of engineering structures. Building units

- Halaliuk A.V., Derkach V.N.** Evaluation of the mechanical characteristics of the masonry in existing buildings 5
- Gladkikh V.F., Domarova E.V., Popov D.S., Shakalova I.S.** Reinforcement of load-loading masonry walls with shotcrete 15
- Kolchunov V.I., Krylov S.B., Fedorov S.S.** Stiffness of reinforced concrete structures under bending considering shear and axial forces (part 1) 25
- Lyublinskiy V.A., Struchkov V.S.** Strength and flexibility of vertical joints of panel buildings in shear and torsion 41
- Merkulov S.I., Kashuba S.O., Esipov S.M.** Program and methodology of experimental studies of reinforced concrete elements with external reinforcement with composite materials in bending with torsion 50

Building and structure safety

- Alzamili H.H., Elsheikh A.M.** Numerical study of the behavior of rc beam at high temperatures 58
- Kupriyanov V.N., Khabibulina A.G., Suleymanov A.M.** Protecting facades of cultural heritage objects from the wind-driven rain: a review of experimental studies 73

Architecture and town-planning

- Volichenko O.V., Golovina E.V.** Model of analysis of historical and architectural objects 86
- Enin A.E., Abuasad M.M.H.** A systemic approach to the organization of residential development in urban areas in the special natural conditions of palestine 97
- Krivoshapko S.N.** The examples of architectural styles, directions, and style flows for building erections of curvilinear form 111

Construction materials and technologies

- Altynbekova A.D., Lukpanov R.E., Dyusseminov D.S., Tsygulyov D.V., Yenkebaev S.B., Yerzhanova N.K.** Development of a complex additive for bored pile production 131

- Review of the textbook "Information modeling and artificial intelligence in modern construction and housing and communal services"** 144

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.

К 70-ЛЕТИЮ АКАДЕМИКА РААСН Г.В. ЕСАУЛОВА

Как-то на заседании президиума РААСН Александр Петрович Кудрявцев в связи с обсуждением ограничений возраста для участия в конкурсе РААСН на замещение вакансий сказал, что творческий талант архитектора раскрывается только к 60-70 годам. Так вот, к Георгию Васильевичу Есаулову это вряд ли относится, так как к своему 50-летию он подошёл с солидным научно-творческим багажом. Уже в 50-летнем возрасте Георгий Васильевич стал главным учёным секретарем Академии, к которому мы, члены региональных отделений, часто приходили за советом в те непростые годы становления Академии. И всегда, встречаясь за круглым столом в его кабинете, могли получить совет по любому профессиональному вопросу, а при необходимости и помощь в решении конкретных задач. Ещё до своей деятельности в роли главного учёного секретаря РААСН, во времена выполнения большой министерской научной программы «Строительство и архитектура», возглавляемой в конце 90-ых годов академиком Л.С. Ляховичем, участники этой программы обратили внимание на молодого проектора Ростовского архитектурного института, который с собой на совещание, проходившее, например, на теплоходе, плывущем по Волге, брал мольберт. Затем, после знакомства с Георгием Васильевичем несмотря на то, что большинство из участников этой программы были не архитекторы, а представители строительных наук, они с удовольствием с ним общались и общаются в настоящее время при решении многих профессиональных задач. Его влияние на строительную науку в целом было и остается глубоким и высоко профессиональным. Это касалось и его многолетней работы в экспертном совете ВАК России, где он, будучи заместителем председателя экспертного совета, высоко держал планку уровня аттестационных требований к молодым ученым и определял уровень архитектурной науки, и его деятельности в качестве главного редактора нашего замечательного журнала «Академия», который при нем стал одним из ведущих журналов страны.

Георгий Васильевич является всегда отзывчивым в вопросах подготовки высокопрофессиональных архитекторов и высококвалифицированных ученых. Когда в начале 2000-ых в ряде вузов страны начали открываться архитектурные специальности он весьма тщательно подходил к решению этих вопросов, всегда основываясь на наличии специалистов. Так, например, с его деятельным участием были открыты профильные кафедры и начата подготовка архитекторов в Белгороде, в Орле и других регионах России. При его поддержке в этот же период в ряде ВУЗов были созданы академические научно-творческие центры РААСН. В частности, такой центр был создан и успешно функционировал в Орловском государственном техническом университете и активно проводил в жизнь многие начинания Академии и подготовил ряд интересных проектов, включая, например, реализованный в Орле в период губернаторства Е.С. Строева проект набережной рек Ока и Орлик. Такую же деятельную помощь Георгий Васильевич оказывал и оказывает теперь уже в роли вице-президента РААСН и проектора МАРХИ в подготовке будущих архитекторов и ученых архитектурных специальностей. Студенты Орловского государственного технического университета с большой теплотой вспоминают замечательные мастер-классы, проведённые Георгием Васильевичем, на которых он показал интереснейший пример, как сами студенты могут оценивать свои творческие работы. Сегодняшним экспертам в области образования и науки этот опыт был бы не безынтересным.

Вызывают большое уважение личные качества Георгия Васильевича, которые особо ярко проявились в работе ВАК России, когда надо было принимать решение о судьбе того или иного молодого ученого, Георгий Васильевич внимательно слушал коллег по экспертному совету, всегда советовался и аргументировано обосновывал принимаемые решения.

Профессиональные заслуги Георгия Васильевича весьма значимы и широко известны специалистам. На основе проведенных им научных исследований дана характеристика и предложена периодизация архитектуры и градостроительства Юга России, разработана концепция культурно-экологической таксономии наследия, введено понятие третьего пласта

в архитектуре, ряд его публикаций посвящен тенденциям в современной архитектуре, творчеству российских архитекторов. Есаулов Г.В. – автор более 400 публикаций, в том числе 12 авторских и коллективных монографий, серии разработок для довузовского и высшего архитектурно-художественного и дизайнерского образования. Автор музейных и выставочных экспозиций, произведений живописи и графики. Он награжден многими наградами, среди которых Орден Почета, Орден Дружбы, Грамота Президента России, Благодарность Председателя Совета Федерации ФС РФ, медаль «100 години Плевенская эпопея 1977» (Болгария), «Самарский крест» (Болгария), золотые медали РААСН и РАХ и другие.



Заседание отделения архитектуры во время общего собрания г. Орел 26 мая 2011 г.



Г.В. Есаулов знакомит О.И. Лобова с выставкой РААСН на общем собрании, г. Орел 2011 г.

Уважаемый Георгий Васильевич, коллектив редакции научно-технического журнала «Строительство и реконструкция» от всей души поздравляет Вас с юбилеем, желает крепкого здоровья, благополучия и новых творческих успехов в научно-педагогической деятельности и во всех Ваших начинаниях во благо отечественного образования и архитектурной науки!

Главный редактор
журнала «Строительство и реконструкция»,
академик РААСН, д.т.н., профессор
В.И. Колчунов

А.В. ГАЛАЛЮК¹, В.Н. ДЕРКАЧ¹

¹Филиал РУП «Институт БелНИИС» - Научно-технический центр, г. Брест, Республика Беларусь

ОЦЕНКА МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КАМЕННОЙ КЛАДКИ СУЩЕСТВУЮЩИХ ЗДАНИЙ

Аннотация. Выполнен анализ известных методов оценки прочности на сжатие и модуля упругости существующих каменных конструкций. Приведен метод определения механических характеристик каменной кладки, основанный на испытаниях, вырезанных из тела кладки образцов в виде треугольных призм. Выполнено сопоставление прочности на сжатие, начальной прочности при сдвиге и угла внутреннего трения, полученных по результатам испытаний образцов-призм, с результатами испытаний образцов кладки, в соответствии со стандартами СТБ EN 1052-1 и СТБ EN 1052-3. Показано удовлетворительное согласование значений прочности кладки на сжатие и секущего модуля упругости полученных испытаниями призм сжимающей нагрузкой, действующей перпендикулярно плоскости горизонтальных растворных швов, с результатами испытаний по методике СТБ EN 1052-1. Начальная прочность на сдвиг каменной кладки, полученная по результатам испытаний согласно СТБ EN 1052-3, отличалась в меньшую сторону от прочности, установленной по результатам испытаний образцов-призм на сжатие, при этом значения угла внутреннего трения, определенные двумя методами, были близки.

Ключевые слова: существующие здания, каменная кладка, прочность на сжатие, модуль упругости, прочность на сдвиг.

A.V. HALALIUK¹, V.N. DERKACH¹

¹Branch office of the RUE «Institute BelNIIS» - Scientific-Technical Center, Brest, Republic of Belarus

EVALUATION OF THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF THE MASONRY IN EXISTING BUILDINGS

Abstract. An analysis of known methods for evaluation the compressive strength and modulus of elasticity of existing masonry structures have been carried out. A method for determining the mechanical characteristics of masonry, based on tests of the specimens cutted from the body of the masonry in the form of triangular prisms have been given. Comparison of compressive strength, initial shear strength and angle of internal friction, obtained from the results of tests of prism specimens, with the results of tests of masonry specimens in accordance with the standards STB EN 1052-1 and STB EN 1052-3 has been carried out. Satisfactory agreement between the values of the compressive strength of the masonry and the secant modulus of elasticity obtained by testing the prisms with a compressive load acting perpendicular to the plane of the horizontal mortar joints with the test results according to the STB EN 1052-1 method has been shown. The initial shear strength of masonry, obtained from the results of tests according to STB EN 1052-3, differed downward from the strength established from the results of tests of prism specimens for compression, while the values of the angle of internal friction determined by the two methods were close.

Keywords: existing buildings, masonry, compressive strength, modulus of elasticity, shear strength.

Введение

В последние годы все более значительную роль в общем комплексе задач развития городов получают вопросы сохранения и реконструкции зданий. Исключительно важное значение при этом приобретают работы по исследованию и оценке технического состояния каменных зданий и сооружений, большая часть которых представляет культурно-историческую ценность. Каменные конструкции сохранившихся до настоящего времени исторических зданий возводились из полнотелого керамического кирпича на известковом или сложном растворах. Перекрытия зданий, для обеспечения их общей жесткости часто выполнялись в виде сводов, а проемы в стенах перекрывались арками. При действии эксплуатационной нагрузки или неравномерной осадке фундаментов геометрические формы сводов и арок определяют направление возникающих в них силовых потоков под различными углами к растворным швам каменной кладки. Как показывает практика, угол наклона сжимающего усилия к растворным швам каменной кладки в указанных конструкциях, зависит от их формы, отношения пролета к стреле подъема и находится в пределах $10-40^{\circ}$ [1-3].

При реконструкции каменных зданий зачастую возникает необходимость надстройки дополнительных этажей, что приводит к увеличению нагрузок на существующие несущие стены. При наличии в стенах оконных или дверных проемов в зоне последних траектории главных сжимающих напряжений концентрируются в угловых зонах проема, отклоняясь от вертикали в направлении наименьшей прочности на сжатие кладки [4].

В рассмотренных случаях расчетную оценку надежности каменных конструкций рекомендуется выполнять путем проверок предельных состояний методом частных коэффициентов. Эффекты воздействий (значения главных напряжений и их траектории) устанавливают на основе расчетов конструкций методом конечных элементов при помощи современных вычислительных комплексов. Различные варианты конечно-элементных моделей каменной кладки приводятся в работах [5-11]. В расчетных моделях распорных конструкций и стенового ограждения каменную кладку рассматривают, как однородный, изотропный материал, а оценку сопротивления конструкций сжатию производят на основании значений прочности кладки на сжатие под различными углами к плоскости опорных растворных швов, которые в нормативных документах отсутствуют. В работе [12] предложена аналитическая зависимость для определения указанных характеристик прочности каменной кладки из кирпича. При этом базисными переменными, устанавливаемыми при проведении обследования, являются значения прочности на сжатие кладки перпендикулярно плоскости опорных растворных швов, а также начальной прочности при сдвиге и угла внутреннего трения. Проблема определения указанных характеристик прочности каменной кладки существующих конструкций до сих пор является актуальной.

Методы определения механических характеристик каменной кладки.

Стены и распорные конструкции из каменной кладки воспринимают преимущественно сжимающие усилия. Поэтому основным прочностным параметром, устанавливаемым при обследовании каменных конструкций, является прочность на сжатие кладки, которую обычно определяют по результатам испытаний кирпича и затвердевшего раствора, отобранного из швов каменной кладки [13-15]. Такой подход к оценке прочности кладки на сжатие часто приводит к ошибочным результатам, так как при испытании отдельных кирпичей и образцов раствора не учитывается их взаимодействие в каменной кладке. При сжатии кладки из кирпича последний воспринимает часть растягивающих деформаций в плоскости сопряжения с горизонтальным раствором швом, создавая условия для его трехосного сжатия. Вследствие этого кирпич оказывается растянутым в плоскости перпендикулярной действию сжимающей силы и сжатым в вертикальной плоскости (рисунок 1).

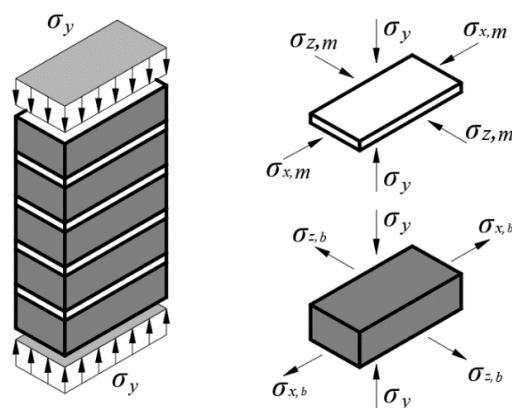


Рисунок 1 – Напряженное состояние кирпича и горизонтального растворного шва при сжатии каменной кладки

Более достоверные данные о прочности на сжатие каменной кладки дают испытания каменной кладки в конструкциях или лабораторные испытания образцов кладки, отобранных из тела обследуемой конструкции [16]. Для определения прочности на сжатие кладки в лабораторных условиях могут быть использованы образцы цилиндры диаметром 150-200 мм, высверленные перпендикулярно опорной или лицевой поверхности кирпича [17]. Отбор цилиндров производится с помощью специальных буров, при этом в образцах сохраняется структура кладки (рисунок 2).

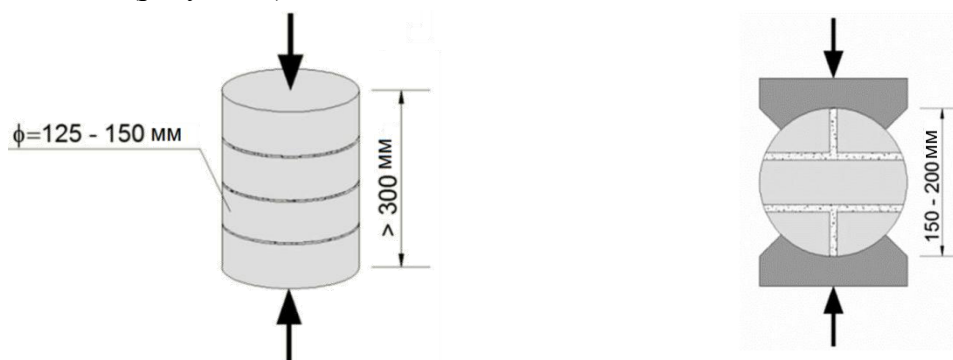


Рисунок 2 – Схемы испытаний образцов цилиндров, выбуренных из тела каменной кладки

Основным недостатком образцов-цилиндров является сложность извлечения из тела каменной кладки неповрежденных образцов при низкой прочности кладочного раствора, которая характерна для исторических каменных конструкций, а также применение специальных устройств при испытании выбуренных кернов.

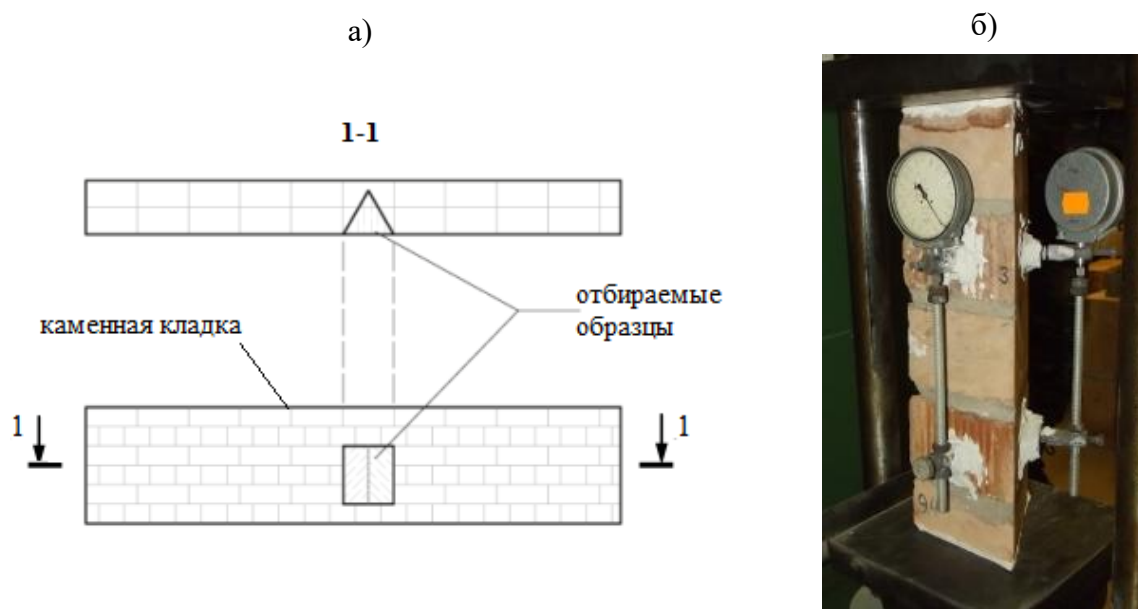
Прочность на сжатие каменной кладки можно оценить в лабораторных условиях на основании испытаний вырезанных из стены фрагментов кладки, размеры которых соответствуют размерам опытных образцов согласно стандарта [18] (рисунок 3).



Рисунок 3 – Испытание образца каменной кладки:
а) отбор образца кладки из стены; б) испытание каменной кладки на сжатие

В ходе испытаний фиксируют деформации каменной кладки, нагрузку трещинообразования и разрушающую нагрузку, по которым определяют значение прочности на сжатие кладки и ее модуль упругости. Следует отметить сложность отбора и транспортировки столь крупных образцов кладки. Кроме того, каменные конструкции при отборе образцов получают значительные повреждения, что часто является неприемлемым для объектов культурного наследия.

В работе [19] предложен метод лабораторного определения прочности на сжатие каменной кладки на образцах в виде треугольных призм, вырезаемых из тела стены (рисунок 4).



*Рисунок 4 – Образец каменной кладки в виде треугольной призмы:
а) схема отбора образца; б) испытание образца на сжатие*

В стене выполняют два вертикальных разреза под углом 60° к ее поверхности, которые пересекаются в толще кладки. Таким образом создается призма с основанием в виде равностороннего треугольника. После удаления раствора из горизонтальных швов в верхнем и нижнем основаниях призмы, образец легко извлекается из тела кладки. Преимуществом данного метода является также то, что каменная конструкция при извлечении образцов получает незначительные повреждения, что очень важно для объектов, представляющих историческую и культурную ценность.

По нашему предложению, на основании испытаний образцов-призм, включающих три элемента кирпича и два растворных шва, можно оценить значение начальной прочности на сдвиг каменной кладки. Испытания в этом случае следует производить в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 5 а, а режим нагружения образцов принимать согласно [18].

Если образцы-призмы вырезать из тела каменной кладки под углами к направлению горизонтальных растворных швов отличными от 0° и 90° , то по результатам испытаний таких призм сжимающей нагрузкой можно получить данные не только о начальной прочности кладки на сдвиг (прочности касательного сцепления), но и угле внутреннего трения, а также оценить степень анизотропии прочности на сжатие каменной кладки (рисунок 5 б).

Результаты и обсуждение.

Экспериментальные исследования выполнялись с целью сопоставления результатов испытаний механических характеристик каменной кладки на образцах-призмах с основанием в виде равностороннего треугольника со сторонами равными 120 мм, с механическими характеристиками кладки образцов-стенок, размеры которых соответствовали требованиям стандарта [18] (стандартные образцы). Опытные образцы выпиливались из заранее изготовленных кирпичных стенок толщиной в полкирпича, каменная кладка которых

выполнялась из полнотелого керамического кирпича средней нормализованной прочностью на сжатие 44,1 МПа (М150) на цементно-песчаном растворе прочностью на сжатие 10,9 МПа. Результаты испытаний стандартных образцов каменной кладки на сжатие при углах наклона сжимающего усилия по отношению к горизонтальным растворным швам $\theta=0^0$, $22,5^0$, 45^0 , $67,5^0$, 90^0 и на сдвиг приведены в работах [21- 23].

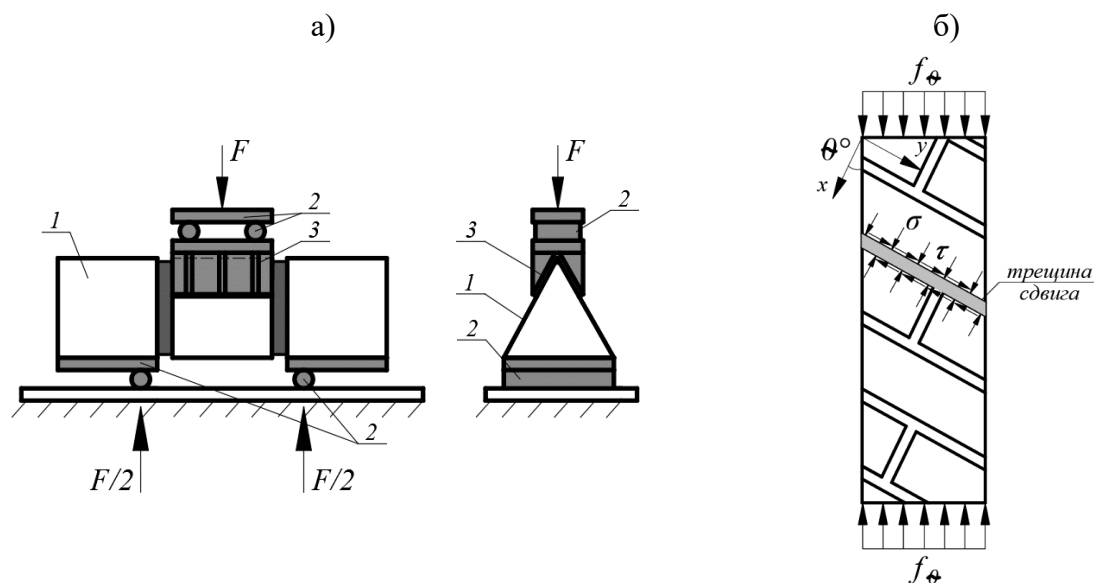


Рисунок 5 - Схемы испытаний образцов призм для определения прочности кладки на сдвиг и угла внутреннего трения: а) испытания на сдвиг; б) испытания на сжатие:

1 – испытываемый образец; 2 – набор пластин и роликовых опор; 3 – треугольный штамп для передачи нагрузки

Образцы-призмы испытывали на сжатие в соответствии со схемой, показанной на рисунке 5 б, при углах θ^0 аналогичных стандартным образцам. Нагружение образцов осуществляли с помощью пресса гидравлического П-125. В ходе испытаний устанавливали характер образования и развития трещин в каменной кладке, нагрузку и характер разрушения опытных образцов, строили диаграммы деформирования кладки.

Прочность на сжатие $f_{\theta i}$ отдельного испытываемого образца кладки вычисляли с точностью до 0,1 МПа по формуле (1):

$$f_{\theta i} = \frac{F_{i, \max}}{A_i}, \quad (1)$$

где $F_{i, \max}$ – максимальная нагрузка, воспринимаемая отдельным образцом каменной кладки;

A_i – площадь поперечного сечения отдельного испытываемого образца кладки.

Модуль упругости устанавливали на основании измерений продольных деформаций кладки на базе, равной 1/2 высоты образца, с помощью индикаторов часового типа с ценой деления 0,001 мм (рисунок 4 б). Модуль упругости отдельного испытываемого образца кладки E_i определяли, как секущий модуль по значению средней относительной деформации ε_i , полученной в четырех точках при нагрузке равной 1/3 максимальной нагрузки $F_{i, \max}$. Значение модуля упругости E рассчитывали по формуле (2).

$$E_i = \frac{F_{i, \max}}{3 \times \varepsilon_i \times A_i}, \quad (2)$$

Испытания показали, что характер разрушения образцов призм при всех значениях угла θ^0 соответствовал стандартным образцам кладки. При действии сжимающего усилия перпендикулярно плоскости горизонтальных швов ($\theta=0^0$), а также при $\theta=22,5^0$ первые вертикальные трещины возникали в кирпичах в средней по высоте части призмы, что свидетельствовало о работе кирпича на растяжение в плоскости горизонтальных растворных

швов. Разрушение образцов происходило хрупко в результате раздавливания кирпича. При $\theta=45^\circ$ и $67,5^\circ$ разрушение образцов-призм вызывалось сдвигом каменной кладки в плоскости контакта между опорными растворными швами и ложковой поверхностью кирпичей. Характер разрушения образцов-призм при различных значениях угла θ^0 приведен на рисунке 6.

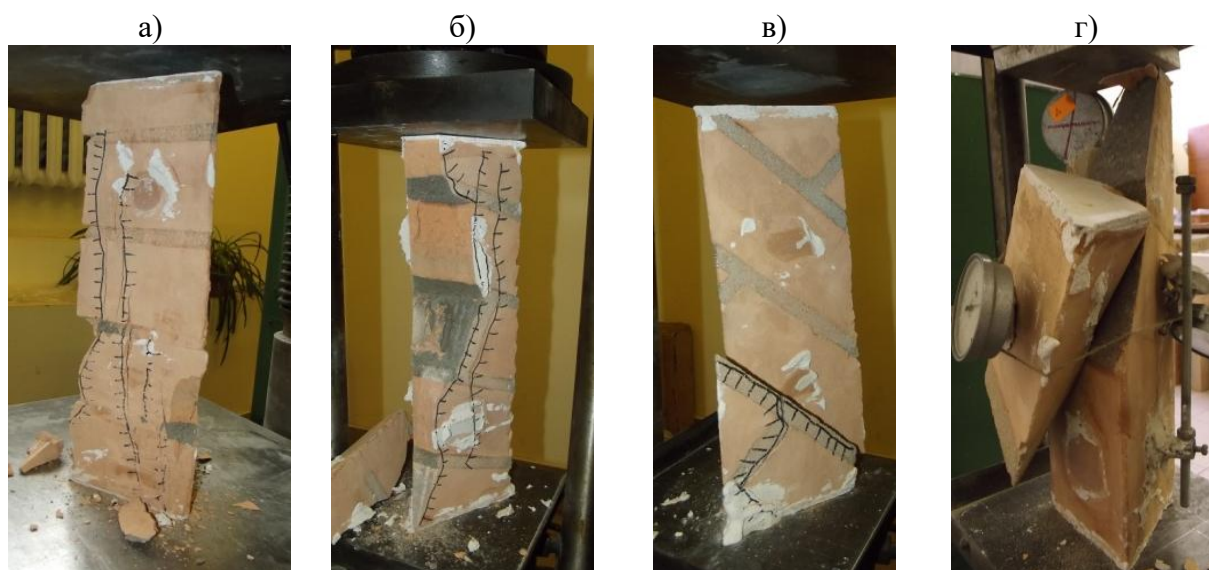


Рисунок 6 – Характер разрушения образцов-призм:
а) $\theta=0^\circ$; б) $\theta=22,5^\circ$; в) $\theta=45^\circ$; г) $\theta=67,5^\circ$

В таблице 1 приведено сопоставление результатов определения прочности каменной кладки на сжатие по образцам в виде треугольных призм и стандартным образцам.

Таблица 1- Результаты определения прочности каменной кладки на сжатие

Угол θ^0	Среднее значение прочности на сжатие		$f_{\theta 1}/f_{\theta 2}$
	Образцы-призмы $f_{\theta 1}$ (МПа)	Стандартные образцы $f_{\theta 2}$ (МПа)	
0	15,79	15,09	1,05
22,5	10,99	7,97	1,38
45	6,61	4,92	1,34
67,5	5,18	3,62	1,43
90	10,73	11,4	0,94

Из таблицы 1 следует, что при действии сжимающей нагрузки перпендикулярно и параллельно плоскости горизонтальных швов каменной кладки разница в ее значениях прочности на сжатие, установленных на основании испытаний образцов-призм и стандартных образцов составила около 5%. При углах наклона направления сжимающего усилия по отношению к горизонтальным швам кладки $0^\circ < \theta < 90^\circ$ разница в значениях прочности на сжатие кладки стандартных образцов и образцов-призм находилась в пределах 30-40%. Данный факт свидетельствует о более существенном влиянии касательных напряжений на прочность на сжатие каменной кладки стандартных образцов, по сравнению с образцами призмами. При испытаниях образцов-призм определялся секущий модуль упругости каменной кладки, E . При действии сжимающего усилия перпендикулярно плоскости горизонтальных растворных швов среднее значение E составило 11284 МПа. По результатам испытаний стандартных образцов $E=11146$ МПа.

Если известны значения прочности на сжатие образцов-призм при углах $0^0 < \theta < 90^0$, f_θ , то в соответствие с рисунком 5 б, значения касательных и нормальных сжимающих напряжений, действующих в плоскости опорных швов определяются по формулам (3), (4).

$$\sigma = f_\theta \cdot \cos^2 \theta, \quad (3)$$

$$\tau = f_\theta \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta. \quad (4)$$

Установив значения касательных напряжений τ и соответствующие им значения сжимающих напряжений σ , при $\theta=45^0$ и $67,5^0$ можно построить линейный график зависимости « $\tau-\sigma$ ». Начальную прочность на сдвиг f_{v0} (касательное сцепление) устанавливают путем экстраполяции графика до ординаты $\sigma=0$ МПа. Угол наклона графика к оси абсцисс являлся углом внутреннего трения c_j (рисунок 7).

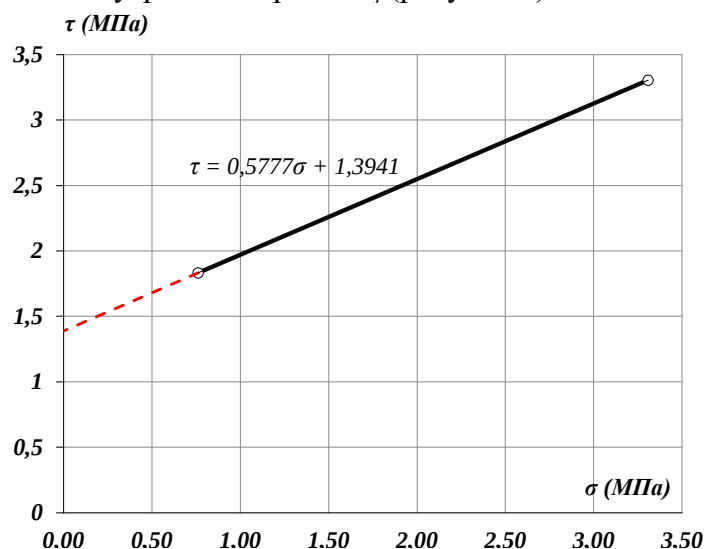


Рисунок 7 – График зависимости « $\tau-\sigma$ »

По результатам испытаний образцов каменной кладки при одновременном действии сжимающих и сдвигающих усилий согласно стандарту [20], значение начальной прочности на сдвиг $f_{v0}=0,5$ МПа, а угла внутреннего трения $c_j= 0,54$ [11]. Значения f_{v0} и c_j , установленные на основании испытаний образцов-призм, соответственно были равны 1,39 МПа и 0,57. Разница в значениях f_{v0} и c_j объясняется разной методикой испытаний и разной формой опытных образцов. Коэффициент корреляции между начальной прочностью на сдвиг испытанных образцов-призм и прочностью стандартных образцов составил 0,4.

Выводы

1. Экспериментальные исследования показали удовлетворительное согласование результатов определения прочности на сжатие и модуля упругости каменной кладки образцов-призм и стандартных образцов при действии сжимающего усилия перпендикулярно плоскости горизонтальных растворных швов. Разница в средних значениях прочности на сжатие кладки образцов-призм и стандартных образцов не превысила 5%, а модулей упругости 1,2%.

2. Характер разрушения стандартных образцов и образцов-призм при углах наклона направления сжимающего усилия по отношению к горизонтальным швам $0^0 < \theta < 90^0$ был одинаков. При этом разница в значениях прочности на сжатие кладки, установленная двумя методами, находилась в пределах 30-40%, что свидетельствует о более существенном влиянии касательных напряжений на прочность на сжатие каменной кладки стандартных образцов, по сравнению с образцами-призмами.

3. Начальная прочность на сдвиг каменной кладки полученная по результатам испытаний согласно стандарту [20] оказалась в 2,8 ниже, установленной по результатам

испытаний образцов-призм на сжатие, при этом значения угла внутреннего трения, определенные двумя методами, были близки. Полученную испытаниями на сжатие образцов-призм начальную прочность на сдвиг кладки, следует приводить к прочности стандартных образцов умножением на коэффициент корреляции. По результатам испытаний значение коэффициента корреляции составило 0,4. Установление коэффициентов корреляции для разных комбинаций растворов и кирпича в каменной кладке требует проведения дополнительных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зимин С.С., Кокоткова О.Д., Беспалов В.В. Сводчатые конструкции исторических зданий // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. № 2(29). С. 57–62.
2. Беспалов В.В., Зимин С.С. Прочность каменной кладки сводчатых конструкций // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2016. № 11(50). С. 37–51.
3. Орлович Р.Б., Беспалов В.В., Семенова М.Д. О совместной работе каменных арок и стен // Строительство и реконструкция. 2018. № 5(79). С. 32–40.
4. Орлович Р.Б., Зимин С.С. Устройство сквозных проемов в каменных сводах исторических зданий // Строительство и реконструкция. 2022. № 6(104). С. 69–77.
5. Lourenco P.B. Computational strategies for masonry structures: PhD Dissertation // Delfi University of Technology. Delfi University Press. The Netherlands. 1996. 210 p.
6. Malyszko L. Modelowanie zniszczenia w konstrukcjach murowych z uzglednieniem anizotropii. Olsztyn: UWM, 2005. 158 p.
7. Кабанцев О.В. Структурный анализ процесса пластического деформирования и разрушения каменной кладки в условиях двухосного напряженного состояния // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2015. ISSUE 3. Vol. 11(4). Pp. 36–51.
8. Пангаев В.В., Албаут Г.И., Федоров А.В., Табанюхова М.В. Модельные исследования напряженно-деформированного состояния каменной кладки при сжатии // Изв. Вузов. Строительство. 2003. № 2. С. 24–29.
9. Соколов Б.С., Антаков А.Б. Исследования сжатых элементов каменных и армокаменных конструкций. М: АСВ, 2010. 104 с.
10. Кашеварова Г.Г., Зобачева А.Ю. Моделирование процесса разрушения кирпичной кладки // Вестн. Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Строительство и архитектура. 2010. № 1. С. 106–116.
11. Kozłowski M, Galman I, Jasiński R. Finite Element Study on the Shear Capacity of Traditional Joints between Walls Made of AAC Masonry Units // Materials. 2020, 18, 4035. 23 p. doi:10.3390/ma13184035.
12. Derkach V., Galalyuk A. Calculation model of the Anisotropy of Strength at Compression of Masonry // Research, Design & Cad in Construction: Theory and Practice (RDCAD 2021): MATEC Web of Conferences 350, 00003 (2021), Brest, Belarus, December, 2021. 6 p.
13. Материалы стеновые. Методы определения пределов прочности при сжатии и изгибе: ГОСТ Р 58527-2019. Введ. 01.01.2021. М.: Стандартиформ, 2019. 12 с.
14. Растворы строительные. Методы испытаний: ГОСТ 5802-86. Введ. 11.12.1985. М.: Государственный комитет СССР по делам строительства, 1985. 22 с.
15. Testing of mortars containing mineral binders - Part 9: Determination the compressive strength of hardened mortar: DIN 18555-9: 2019. Published 04.01.2019. Berlin: Deutsches Institut für Normung, 2019. 14 p.
16. Деркач В.Н. Каменные и армокаменные конструкции. Оценка технического состояния, ремонт и усиление. Минск: СтройМедиаПроект, 2021. 256 с.
17. UIC – International Union of Railways: UIC Code. Recommendations for the Inspection, Assessment, Reliability and Maintenance of Masonry Arch Bridges. final draft, 2008. 16 p.
18. Методы испытаний каменной кладки. Часть 1. Определение прочности при сжатии: СТБ EN 1052-1-2015. Введ. 01.11.2015. Минск: РУП «Стройтехнорм», 2015. 12 с.
19. Gaber K., Kupper R. Vorschlag für ein neues Verfahren zur Prüfung der Druckfestigkeit von bestehendem Mauerwerk // Mauerwerk. 2012. No. 16. Heft 6. Pp. 297–300.
20. Методы испытаний каменной кладки. Часть 3. Определение начальной прочности при сдвиге: СТБ EN 1052-3-2017. Введ. 01.08.2018. Минск: РУП «Стройтехнорм», 2013. 17 с.
21. Галалюк А.В. Прочность каменной кладки при сжатии под различными углами к горизонтальным растворным швам // Строительная наука. 2014: теория, образование, практика, инновации (посвящается 55-

летию ИСИА САФУ). Сборник трудов междунар. научно-техн. конф., г. Архангельск, 22-23 мая 2014 г. Под ред. Лабудина Б.В. Архангельск: Изд-во ООО «Типография «ТОЧКА». 2014. С. 68-73.

22. Деркач В.Н. Оценка анизотропии прочности при сжатии каменной кладки при обследовании зданий старой постройки // Вестник БрГТУ. Строительство и архитектура. 2019. № 1. С. 58-61.

23. Nowak R., Kania T., Derkach V., Orłowicz R., Halaliuk A., Ekiert E., Jaworski R. Strength Parameters of Clay Brick Walls with Various Directions of Force // Materials. 2021. No. 14(21), Pp. 6461. <https://doi.org/10.3390/ma14216461>

REFERENCES

1. Zimin S.S., Kokotkova O.D., Bepalov V.V. Svodchatye konstrukcii istoricheskikh zdaniy [Vaulted structures of historic buildings]. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzhenij*. 2015. Vol. 29. No. 2. Pp. 57-62. (rus)
2. Bepalov V.V., Zimin S.S. Prochnost' kamennoj kladki svodchatykh konstrukcij [The strength of vaulted masonry structures]. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzhenij*. 2016. Vol. 50. No. 11. Pp. 37-51. (rus)
3. Orlovich R. B., Bepalov V.V., Semenova M.D. O sovместnoy rabote kamennykh arok i sten [About the joint work of masonry arches and walls]. *Stroitel'stvo i rekonstrukciya*. 2018. Vol. 79. No. 5. Pp. 32-40. (rus)
4. Orlovich R.B., Zimin S.S. Ustrojstvo skvozykh proemov v kamennykh svodakh istoricheskikh zdaniy. [Arrangement of through openings in the masonry vaults of historical buildings]. *Stroitel'stvo i rekonstrukciya*. 2022. Vol. 104. No. 6. Pp. 69-77. (rus)
5. Lourenco P.B. Computational strategies for masonry structures: PhD Dissertation. *Delfi University of Technology. Delfi University Press. The Netherlands*. 1996. 210 p.
6. Malyszko L. Modelowanie zniszczenia w konstrukcjach murowych z uzglednieniem anizotropii. Olsztyn: UWM, 2005. 158 p.
7. Kabancev O.V. Strukturnyj analiz processa plasticheskogo deformirovaniya i razrusheniya kamennoj kladki v usloviyakh dvuhosnogo napryazhennogo sostoyaniya [Structural analysis of the process of plastic deformation and destruction of masonry under biaxial stress conditions]. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2015. ISSUE 3. Vol. 11(4). Pp. 36-51. (rus)
8. Pangaev V.V., Al'baut G.I., Fedorov A.V., Tabanyuhova M.V. Model'nye issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya kamennoj kladki pri szhatii [Model studies of the stress-strain state of masonry under compression]. *Izv. Vuzov. Stroitel'stvo*. 2003. No. 2. Pp. 24-29 (rus)
9. Sokolov B.S., Antakov A.B. Issledovaniya szhatykh elementov kamennykh i armokamennykh konstrukcij [Studies of compressed elements of masonry and reinforced masonry structures]. M: ASV, 2010. 104 p. (rus)
10. Kashevarova G.G., Zobacheva A.YU. Modelirovanie processa razrusheniya kirpichnoj kladki [Modelling of the process of destruction of masonry]. *Vestn. Perm. nac. issled. politekhn. un-ta. Stroitel'stvo i arhitektura*. 2010. No. 1. Pp. 106–116. (rus)
11. Kozłowski M, Galman I, Jasiński R. Finite Element Study on the Shear Capacity of Traditional Joints between Walls Made of AAC Masonry Units // *Materials*. 2020, 18, 4035. 23 p. doi:10.3390/ma13184035.
12. Derkach V., Galalyuk A. Calculation model of the Anisotropy of Strength at Compression of Masonry // Research, Design & Cad in Construction: Theory and Practice (RDCAD 2021): MATEC Web of Conferences 350, 00003 (2021), Brest, Belarus, December, 2021. 6 p.
13. Materialy stenovye. Metody opredeleniya predelov prochnosti pri szhatii i izgibe: GOST R 58527-2019 [Masonry materials. Methods for determining the ultimate strength in compression and bending: GOST R 58527-2019.] // Vved. 01.01.2021. M.: Standartinform. 2019. 12 p. (rus)
14. Rastvory stroitel'nye. Metody ispytaniy: GOST 5802-86. [Building mortars. Test methods: GOST 5802-86] // Vved. 11.12.1985. M.: Gosudarstvennyy komitet SSSR po delam stroitel'stva. 1985. 22 p. (rus)
15. Testing of mortars containing mineral binders - Part 9: Determination the compressive strength of hardened mortar: DIN 18555-9: 2019. Published 04.01.2019. Berlin: Deutsches Institut für Normung, 2019. 14 p.
16. Derkach V.N. Kamennye i armokamennye konstrukcii. Ocenka tekhnicheskogo sostoyaniya, remont i usilenie [Masonry and reinforced masonry structures. Assessment of the technical condition, repair and strengthening]. Minsk: StrojMediaProekt. 2021. 256 p (rus)
17. UIC – International Union of Railways: UIC Code. Recommendations for the Inspection, Assessment, Reliability and Maintenance of Masonry Arch Bridges. final draft, 2008. 16 p.
18. Metody ispytaniy kamennoj kladki. CHast' 1. Opredelenie prochnosti pri szhatii STB EN 1052-1-2015 [Test methods for masonry. Part 1. Determination of compressive strength: STB EN 1052-1-2015]. Vved. 01.11.2015. Minsk: RUP «Strojtekhnorm». 2015. 12 p. (rus)
19. Gaber K., Kupper R. Vorschlag für ein neues Verfahren zur Prüfung der Druckfestigkeit von bestehendem Mauerwerk. *Mauerwerk*. 2012. No.16. Heft 6. Pp. 297-300.

20. Metody ispytanij kamЕННОj kladki. CHast' 3. Opredelenie nachal'noj prochnosti pri sdvige: STB EN 1052-3-2017 [Test methods for masonry. Part 1. Determination of the initial shear strength: STB EN 1052-3-2017]. Vved. 01.08.2018. Minsk: RUP «Strojtekhnorm». 2013. 17 p. (rus)
21. Galalyuk A.V. Prochnost' kamЕННОj kladki pri szhatii pod razlichnymi ugłami k gorizontálnym rastvornym shvam [Compressive strength of masonry at different angles to horizontal mortar joints]. *Stroitel'naya nauka. 2014: teoriya, obrazovanie, praktika, innovacii (posvyashchaetsya 55-letiyu ISiA SAFU)*. Sbornik trudov mezhdunar. nauchno-tekhn. konf., g. Arhangel'sk, 22-23 maya 2014 g. Pod red. Labudina B.V. Arhangel'sk: Izd-vo OOO «Tipografiya «TOCHKA». 2014. Pp. 68-73. (rus)
22. Derkach V.N. Ocenka anizotropii prochnosti pri szhatii kamЕННОj kladki pri obsledovanii zdaniy staroj postrojki [Evaluation of anisotropy of compressive strength of masonry in the inspection of old buildings]. *Vestnik BrGTU. Stroitel'stvo i arhitektura*. 2019. No. 1. Pp. 58-61. (rus)
23. Nowak R., Kania T., Derkach V., Orłowicz R., Halaliuk A., Ekiert E., Jaworski R. Strength Parameters of Clay Brick Walls with Various Directions of Force. *Materials*. 2021. No. 14(21), Pp. 6461. <https://doi.org/10.3390/ma14216461>.

Информация об авторах:

Галалюк Антон Владимирович

Филиал РУП «Институт БелНИИС» - Научно-технический центр, г. Брест, Республика Беларусь, начальник отдела.

E-mail: Halaliuk@mail.ru

Деркач Валерий Николаевич

Филиал РУП «Институт БелНИИС» - Научно-технический центр, г. Брест, Республика Беларусь, доктор технических наук, директор.

E-mail: v-derkach@yandex.ru

Information about authors:

Halaliuk Anton V.

Branch office of the RUE «Institute BelNIIS» - Scientific-Technical Center, Brest, Republic of Belarus, head of department.

E-mail: Halaliuk@mail.ru

Derkach Valery N.

Branch office of the RUE «Institute BelNIIS» - Scientific-Technical Center, Brest, Republic of Belarus, doctor of technical sciences, director.

E-mail: v-derkach@yandex.ru

В.А. ГЛАДКИХ¹, Е.В. ДОМАРОВА¹, Д.С. ПОПОВ¹, И.С. ШАКАЛОВА¹¹ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия

УСИЛЕНИЕ ТОРКРЕТ-БЕТОНОМ НЕСУЩИХ СТЕН ИЗ КАМЕННОЙ КЛАДКИ

Аннотация. Выполнен анализ типов повреждений вертикальных несущих элементов из каменной кладки от взрывных воздействий, описаны основные признаки таких повреждений, требующих специальных способов усиления. Современные методы восстановления несущей способности каменной кладки требуют доработки и адаптации при рассмотрении случаев взрывных воздействий. Предметное обследование несущих стен выявило снижение сил сцепления (адгезии) между кирпичом и раствором, деградацию связей между наружной верстой и основным массивом кладки. Для восстановления несущей способности поврежденных элементов предложен современный метод, заключающийся в устройстве односторонних аппликаций из торкрет-бетона, позволяющий восстановить разрушенные связи внутри кладки и обеспечивающий высокий уровень механизации труда. Для определения физико-механических характеристик торкрет-бетона, а также адгезионной прочности между бетоном аппликации и кирпичом кладки, обеспечивающей совместность работы конструкции усиления из торкрет-бетона и существующей каменной кладки, были проведены экспериментальные исследования. Испытания проводились на 20 образцах с основанием из керамического кирпича для определения физико-механических характеристик, испытывались призмы и цилиндры, изготовленные из торкрет-бетона. Определено, что технология нанесения торкрет-бетона со скоростью 150 м/с приводит к уменьшению удельного веса смеси за счет ее уплотнения. Установлено, что при одинаковом модуле упругости торкрет-бетона и тяжелого бетона призмчатая прочность торкрет-бетона значительно больше. По результатам исследований получены модуль упругости торкрет-бетона 26400 МПа, средняя призмчатая прочность торкрет-бетона 42 МПа. Полученные характеристики могут быть использованы для численного моделирования и расчетного обоснования при разработке проекта усиления конструкций.

Ключевые слова: каменная кладка, взрывные воздействия, усиление, торкрет-бетон, экспериментальные исследования, адгезионная прочность.

V.F. GLADKIKH¹, E.V. DOMAROVA¹, D.S. POPOV¹, I.S. SHAKALOVA¹¹National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

REINFORCEMENT OF LOAD-LOADING MASONRY WALLS WITH SHOTCRETE

Abstract. The analysis of the types of damage to vertical load-bearing elements of masonry from explosive impacts is carried out, the main signs of such damage requiring special reinforcement methods are described. Modern methods of restoring the bearing capacity of masonry require refinement and adaptation when considering cases of explosive impacts. A substantive examination of the load-bearing walls revealed a decrease in the adhesion forces between the brick and mortar, degradation of the connections between the outer verst and the main masonry array. To restore the bearing capacity of damaged elements, a modern method is proposed, consisting in the device of one-sided applications of shotcrete, which allows to restore the destroyed connections inside the masonry and provides a high level of mechanization of labor. Experimental studies were conducted to determine the physical and mechanical characteristics of shotcrete, as well as the adhesive strength between the concrete of the application and the masonry

brick, which ensures the compatibility of the reinforcement structure of shotcrete and existing masonry. Tests were carried out on 20 samples with a ceramic brick base to determine the physical and mechanical characteristics, prisms and cylinders made of shotcrete were tested. It is determined that the technology of applying shotcrete at a speed of 150 m / s leads to a decrease in the specific weight of the mixture due to its compaction. It is established that with the same modulus of elasticity of shotcrete and heavy concrete, the prismatic strength of shotcrete is significantly greater. According to the research results, the modulus of elasticity of shotcrete is 26400 MPa, the average prismatic strength of shotcrete is 42 MPa. The obtained characteristics can be used for numerical modeling and computational justification when developing a structural reinforcement project.

Keywords: *masonry, explosive effects, reinforcement, shotcrete, experimental studies, adhesion strength.*

Введение

Проведение восстановительных работ для обеспечения жильем населения освобожденных территорий является приоритетной государственной задачей.

Жилые здания на территории Донбасса получили значительные повреждения при взрывных и температурных воздействиях. При этом характер повреждений от такого рода воздействий отличается от часто встречаемых повреждений при обследовании зданий при обычных эксплуатационных нагрузках [1].

Значительный объем жилых зданий в новых регионах РФ имеют несущие конструкции, выполненные из каменной кладки. При обследовании таких зданий были выявлены три типа повреждений вертикальных несущих элементов от взрывных воздействий [2]:

- 1 - полное разрушение локального участка кладки в пределах одного этажа;
- 2 - полное разрушение обширного участка каменной кладки в пределах нескольких этажей с разрушением прилегающих участков перекрытий;
- 3 - полное разрушение фрагмента здания.

При этом стоит отметить, что существует небольшое количество публикаций, рассматривающих вопросы усиления зданий с несущими конструкциями из каменной кладки, имеющие повреждения при взрывных нагрузках, например, в изданиях 1930-х – 1940-х годов [3, 4].

В связи со специфичными особенностями повреждений при минно-взрывных воздействиях [2, 5], методы усиления конструкций для обеспечения требуемого уровня несущей способности, изложенные в нормативных документах по усилению каменных конструкций [6, 7], требуют доработки.

При обследовании таких конструкций было выявлено разрушение связей наружной версты с основным массивом каменной кладки, а также разрушение адгезионного взаимодействия кирпича и раствора. Поэтому при выборе метода усиления кладки необходимо исходить из необходимости восстановления монолитности кладки [8]. Одним из наиболее эффективных методов восстановления каменной кладки является устройство односторонних аппликаций из торкрет-бетона [9-13], позволяющий восстановить разрушенные связи внутри кладки и обеспечивающий высокий уровень механизации труда.

Совместность работы конструкции усиления из торкрет-бетона и существующей каменной кладки обеспечивается за счет шпонок, образующихся в швах кладки, и за счет сил адгезии между бетоном аппликации и кирпичом кладки.

Для определения основных характеристик материала усиления, таких как адгезионная прочность взаимодействия бетона с базовой поверхностью кладки, прочности на сжатие и модуля упругости торкрет-бетона, были проведены экспериментальные исследования в НИИЦ «МГСУ СТРОЙ-ТЕСТ». Данные характеристики могут быть учтены при описании каменной кладки с повреждениями от минно-взрывных воздействий моделью В.Э. Вильдемана, Г.Г. Кашеваровой, О.В. Кабанцева «каменная кладка как кусочно-

однородный разномодульный композит с разрывными полями адгезионного взаимодействия элементов композита» [14-17].

Модели и методы исследования

Первой целью проведения экспериментальных исследований является оценка прочности сцепления (адгезии) торкрет-бетона с основанием, выполненного из кирпича.

Для проведения экспериментальных испытаний изготовлено четыре плиты (О1, О2, О3, О4) размером 800х260х170 мм с основанием из кирпича керамического одинарного полнотелого.

Перед испытанием на каждой плите были подготовлены по 5 участков измерения, количество участков выбрано в соответствии с ГОСТ Р 58277-2018.

В процесс подготовки входило:

- шлифование участков, для выравнивания поверхности;
- прорезание слоя состава «АПЕКС Торкрет 60» режущим инструментом до основания с получением образца диаметром 50 мм (рисунок 3).

После проведения подготовки, к образцам быстротвердеющим клеем высокой прочности были приклеены металлические штампы. Таким образом подготовлены образцы для испытаний диаметром 50 мм в количестве 20-ти штук.



Рисунок 1 – Подготовка образцов для оценки прочности сцепления:

а) прорезание слоя состава «АПЕКС Торкрет 60» режущим инструментом до основания с получением образца диаметром 50 мм; б) образцы, подготовленные к приклеиванию штампов

Определение прочности сцепления производилось согласно [18], по силе отрыва образца затвердевшего состава торкрет-бетона от основания из кирпича, приложенной к образцу через металлический диск с анкером (штамп), приклеенный к поверхности образца (рисунок 2).



Рисунок 2 - Проведение испытания образцов на плите (а); образцы после испытания (б)

Силу отрыва образцов от основания определяли при помощи измерителя адгезии ПСО-10 МГ4С, при этом согласно [18] возможны следующие варианты отрыва (рисунок 3): разрушение на границе между слоем затвердевшего раствора и основанием (Р/О); разрушение по слою затвердевшего раствора (Р/Р); разрушение материала основания (О/О).

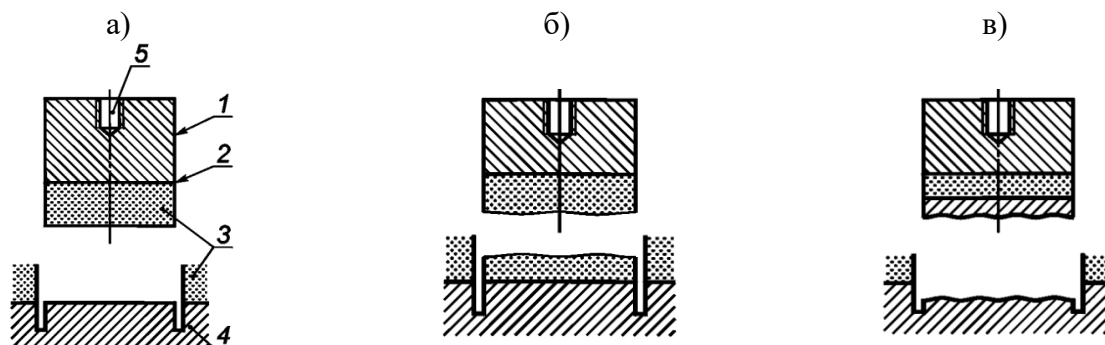


Рисунок 3 – Варианты разрушения образцов:

- а) Р/О - разрушение на границе между слоем затвердевшего раствора и основанием;
 б) Р/Р - разрушение по слою затвердевшего раствора; в) О/О - разрушение материала основания:
 1 — металлическая пластинка; 2 — слой клея; 3 — слой затвердевшего раствора; 4 — основание;
 5 — отверстие с внутренней резьбой по центру пластинки для крепления приспособления для отрыва образцов от основания

Прочность сцепления (адгезию) с основанием при испытании одного образца A_i , МПа, вычисляли по формуле (1):

$$A_i = \frac{F}{S} \quad (1)$$

где F - максимальная сила отрыва образца от основания, Н; S - площадь контакта поверхности образца с основанием, мм.

Второй целью проведения экспериментальных исследований является определение физико-механических свойств торкрет-бетона.

Для проведения экспериментальных исследований была изготовлена плита из торкрет-бетона. Из плиты вырезаны образцы-призмы размером $70 \times 70 \times 280$ мм в количестве 4 шт., для определения призмочной прочности и модуля упругости согласно [19]. Также были выбурены установкой алмазного бурения образцы-цилиндры диаметром 64 мм в количестве 3 штук для оценки прочности на сжатие (рисунок 4).

На образцах-призмах закреплялись рамки, в которых монтировались 4 индикатора часового типа с ценой деления 0,001 мм (рисунок 5). После центровки образца по физической оси, призмы нагружались нагрузкой в диапазоне $0,01-0,1R_b$. Нагрузка прикладывалась ступенями с 5-минутной выдержкой на ступени. Деформации при подъеме нагрузки принимались за упругие, а набежавшие за 5 минут - быстроснаблюдаемыми деформациями ползучести.



Рисунок 4 – Подготовка образцов (а) и вид образцов для испытаний (б)



Рисунок 5 – Образец-призма в испытательной установке (а) и испытанный образец-цилиндр (б)

Результаты исследования и их анализ

В таблице 1 представлены результаты экспериментальных исследований по определению прочности сцепления торкрет-бетона с основанием из кирпичной кладки.

Таблица 1 - Результаты определения прочности сцепления торкрет-бетона с основанием из кирпичной кладки

Маркировка плиты	Номер образца	Результаты измерений		
		Фактическое значение, МПа	Среднее значение, МПа	Вид отрыва
О1	О 1.1	1,0	0,9	О/О (разрушение материала основания)
	О 1.2	0,7		О/О (разрушение материала основания)
	О 1.3	0,9		О/О (разрушение материала основания)
	О 1.4	0,8		О/О (разрушение материала основания)
	О 1.5	1,0		О/О (разрушение материала основания)
О2	О 2.1	0,9	0,6	О/О (разрушение материала основания)
	О 2.2	0,5		О/О (разрушение материала основания)
	О 2.3	0,6		О/О (разрушение материала основания)
	О 2.4	0,9		О/О (разрушение материала основания)
	О 2.5	0,3		О/О (разрушение материала основания)
О3	О 3.1	0,6	0,7	О/О (разрушение материала основания)
	О 3.2	0,8		О/О (разрушение материала основания)
	О 3.3	0,7		О/О (разрушение материала основания)
	О 3.4	0,7		О/О (разрушение материала основания)
	О 3.5	0,8		О/О (разрушение материала основания)
О4	О 4.1	0,4	0,5	О/О (разрушение материала основания)
	О 4.2	0,2		О/О (разрушение материала основания)
	О 4.3	0,7		О/О (разрушение материала основания)
	О 4.4	0,5		О/О (разрушение материала основания)
	О 4.5	0,7		О/О (разрушение материала основания)

Анализ проведенных испытаний показал, что все образцы разрушились по материалу основания (рисунок б), то есть по кирпичной кладке, что показывает высокую прочность сцепления (адгезии) торкрет-бетона с основанием.



Рисунок 6 – Образцы после испытания (плита 04)

Результаты определения средней плотности, прочности и скорости ультразвука, проходящего через образцы-цилиндры представлены в таблице 2. Значения призмной прочности и модуля упругости определенных на образцах-призмах представлены в таблице 3.

Таблица 2- Результаты испытаний образцов-цилиндров

№ п/п	Размеры, см.		S, см ²	V, см ³	m, г	ρ, г/см ²	V, м/сек	R, МПа
	d	h						
1	6,39	5,29	32,05	169,6	371	2,188	4610	68,33
2	6,37	5,18	31,85	165,0	363	2,200	4697	63,33
3	6,37	5,23	31,85	166,6	347	2,083	4171	42,26

Таблица 3 - Результаты испытаний образцов-призм

№ п/п	Размеры, см			S, см ²	V, см ³	m, г	ρ, г/см ²	V, м/сек	R, МПа	E _b , ×10 ³ , МПа
	a	b	h							
1	7,14	7,14	28,4	50,28	1447,8	3118	2,154	4364	46,68	28,0
2	6,93	7,32	27,9	50,73	1415,3	3052	2,156	4175	43,60	26,2
3	7,46	7,36	28,0	54,87	1536,3	3306	2,152	4143	37,28	25,9
4	7,15	7,24	28,0	51,73	1448,4	3126	2,158	4172	40,48	25,6

При сравнении характеристик тяжелого бетона с исследуемыми параметрами торкрет-бетона получены следующие значения:

- средняя плотность торкрет-бетона составляет в среднем 2150 кг/м³, плотность тяжелого бетона в среднем 2400 кг/м³, что на 10% больше. Такое уменьшение плотности достигается за счет мелкозернистого заполнителя и плотного послойного нанесения состава со скоростью около 150 м/с;

- средний модуль упругости торкрет-бетона составляет 26400 МПа, что примерно соответствует тяжелому классу бетона В20 [20] с нормативной призмной прочностью $R_{bn}=15$ МПа, но как показали испытания средняя призмная прочность торкрет-бетона составляет 42 МПа, что на 64% больше, чем прочность тяжелого бетона.

Измерения деформаций на этапах нагружения для определения модуля упругости представлены в таблице 4, а диаграмма деформирования σ - ϵ на рисунке 7.

Таблица 4 -Результаты обработки по оценке модуля упругости

N, кг	σ , кг/см ²	Образец №1			Образец №2			Образец №3			Образец №4		
		$\Delta \varepsilon_{1-4}$ × 10-5 (*)	$\Sigma \Delta \varepsilon_{1-4}$ ×10-5 (*)	$\frac{\Delta E^y}{\Delta E^{y+n}}$	$\Delta \varepsilon_{1-4}$ × 10-5 (*)	$\Sigma \Delta \varepsilon_{1-4}$ ×10-5 (*)	$\frac{\Delta E^y}{\Delta E^{y+n}}$	$\Delta \varepsilon_{1-4}$ × 10-5 (*)	$\Sigma \Delta \varepsilon_{1-4}$ ×10-5 (*)	$\frac{\Delta E^y}{\Delta E^{y+n}}$	$\Delta \varepsilon_{1-4}$ × 10-5 (*)	$\Sigma \Delta \varepsilon_{1-4}$ ×10-5 (*)	$\frac{\Delta E^y}{\Delta E^{y+n}}$
3000	60	22,50 (0,17)	22,50 (22,67)	267 265	23,17 (0,50)	23,17 (23,67)	259 253	24,83 (0,67)	24,83 (25,50)	220 214	23,00 (0,17)	23,00 (23,17)	252 250
4500	90	10,83 (0,67)	33,50 (34,17)	277 261	11,33 (0,17)	35,00 (35,17)	265 261	10,67 (1,00)	36,17 (37,17)	256 234	11,00 (0,83)	34,17 (35,00)	264 245
6000	120	10,83 (1,33)	45,00 (46,33)	277 247	11,67 (1,33)	46,84 (48,17)	257 231	10,50 (1,50)	47,67 (49,17)	260 228	11,50 (1,33)	46,50 (47,83)	252 226
7500	150	10,50 (1,33)	56,85 (58,16)	286 254	11,33 (2,0)	59,50 (61,50)	265 225	10,50 (1,83)	59,67 (61,50)	260 240	11,33 (1,50)	59,16 (60,66)	256 226
9000	180	10,67 (1,83)	68,83 (70,66)	281 240	12,00 (3,00)	73,50 (76,50)	250 200	11,17 (1,83)	72,67 (74,50)	245 210	11,50 (2,67)	72,16 (74,83)	252 205
10500	210	10,65 (3,24)	81,31 (84,56)	282 216	11,50 (3,50)	88,00 (91,50)	261 200	10,83 (3,17)	85,33 (88,50)	252 195	11,17 (3,33)	86,00 (89,33)	260 200
12000	240	14,11 (3,86)	95,66 (99,52)	270 200	12,00 (4,17)	103,50 (107,67)	250 186	10,83 (4,00)	99,33 (103,33)	252 184	11,17 (4,17)	100,50 (104,67)	260 189
13500	270	11,27 (4,94)	110,79 (115,73)	266 185	12,17 (5,33)	119,84 (125,17)	247 171	12,67 (3,00)	116,00 (119,00)	216 174	12,00 (4,83)	116,07 (121,50)	242 172
15000	300	11,73 (6,02)	127,46 (133,48)	256 169	12,67 (6,50)	137,84 (144,34)	237 156	11,50 (6,17)	130,5 (136,67)	238 155	12,00 (5,83)	133,50 (139,33)	242 163

(*)-в скобках указаны значения с учетом пластических деформаций

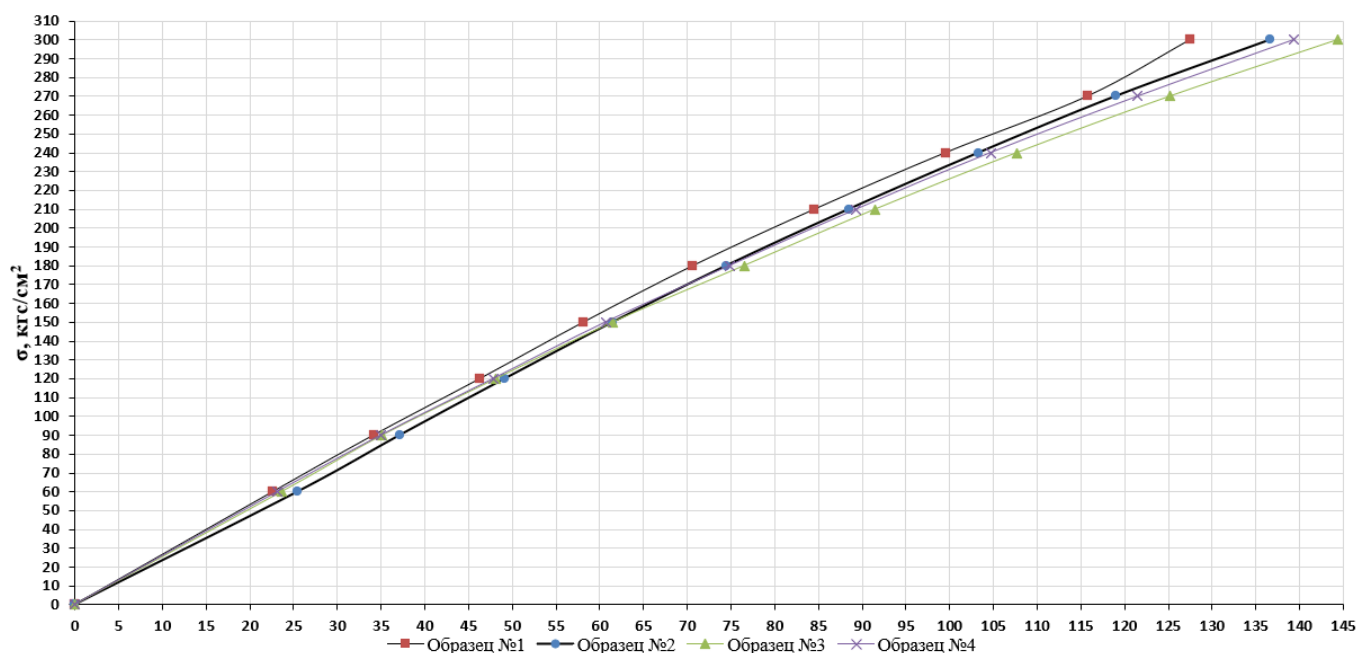


Рисунок 7 – Диаграмма деформирования σ - ε

Данные об адгезионной прочности, прочности и модуля упругости торкрет-бетона позволят более корректно оценить работу конструкций усиливаемых торкретированием при численном моделировании и расчетном обосновании.

Выводы

На основании проведенных экспериментальных исследований торкрет-бетона на предмет адгезии с основанием и прочностных свойств можно сделать следующие выводы:

1. В результате испытаний получен полный спектр физико-механических характеристик торкрет-бетона, с целью применения в численном моделировании усиления различных конструкций. Средний модуль упругости торкрет-бетона составил 26400 МПа. При одинаковом значении модуля упругости торкрет-бетона и тяжелого бетона, соответствующего классу В20, при торкретировании средняя плотность бетонной смеси меньше на 10% (2150 кг/м³), а призмная прочность больше на 64% (42 МПа).

2. Результаты испытаний опытных образцов кирпича с нанесенным слоем торкрет-бетона показали высокий уровень адгезии к базовому материалу кладки (швы, повышающие сцепление, были исключены), при котором разрушение происходило исключительно по кирпичу. Данный факт позволяет обоснованно применять торкрет-бетон при усилении каменной кладки без специальных мероприятий, повышающих сцепление (шпонки и микрошпонки, анкерный крепеж).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдеев К.В., Бобров В.В., Скакун П.В., Левин Д.И., Домарова Е.В. Обследование и восстановление поврежденных конструкций зданий вследствие взрывных и температурных воздействий // Промышленное и гражданское строительство. 2023. № 7. С. 36-42. doi:10.33622/0869-7019.2023.07.36-42
2. Кабанцев О.В., Симаков О.А., Нещадинов 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
3. Шведова В.И., Тумольский А.П., Молчанова А.В. Применение стахановских методов на восстановительных работах. Общестроительные работы. М.-Л., 1945. 88 с.
4. Басов М.А. Восстановление зданий, разрушенных бомбардировкой. М.-Л.: Наркомзем РСФСР, 1943. 88 с.
5. Barazesh M., Shamim I., Anvar S. Masonry Infill Walls Enhanced with the Reinforced Shotcrete in Blast Incidents // Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering. 2023. doi:10.1007/s40996-023-01177-9.
6. Facconi L., Lucchini S., Minelli F., Plizzari G. Analytical model for the in-plane resistance of masonry walls retrofitted with steel fiber reinforced mortar coating // Engineering Structures. 2023. No. 275. Pp. 115232. doi:10.1016/j.engstruct.2022.115232.
7. СП 427.1325800.2018 Каменные и армокаменные конструкции. Методы усиления (с Изменением N 1)
8. Тонких Г.П., Симаков О.А., Симаков А.Б., Кабанцев О.В., Баев С.М., Панфилов П.С. Экспериментальные исследования сейсмоусиления каменной кладки наружными бетонными аппликациями // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2011. № 2. С. 35-42.
9. Ghezelbash A., Beyer K., Dolatshahi K., Yekrangnia M. Shake table test of a masonry building retrofitted with shotcrete // Engineering Structures. 2020. No. 219. doi:10.1016/j.engstruct.2020.110912.
10. Adil M. Shear Strength Evaluation of Strengthened Unreinforced Brick Masonry Walls by Using Shotcrete. ARPN Journal of Science and Technology. 2015. № 5. С. 138.
11. Rismanian Y.B., Tafti M., Mirjalili A. Experimental study on in-plane seismic behavior of unreinforced and damaged unreinforced masonry walls retrofitted with vertical concrete ties and bed rebar with and without shotcrete. Innovative Infrastructure Solutions. 2023. No. 8. doi:10.1007/s41062-023-01207-5.
12. Wang F. Experimental Research on Seismic Performance of Masonry-Infilled RC Frames Retrofitted by Using Fabric-Reinforced Cementitious Matrix Under In-Plane Cyclic Loading // International Journal of Concrete Structures and Materials. 2023. No. 17. doi:10.1186/s40069-023-00594-4.
13. Altoubat S., Maalej M., Karzad A., Estephane P. Rapid Strengthening of Unreinforced Masonry Walls for Out-of-Plane Actions using Fiber Reinforced Shotcrete. 2018.
14. Вильдеман В.Э. Соколкин Ю.В., Ташкинов А.А. Механика неупругого деформирования и разрушения композиционных материалов. М.: Наука, 1997. 228 с.
15. 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.
16. Кабанцев О.В. Дискретная модель каменной кладки в условиях двухосного напряженного состояния // Вестник ТГАСУ. 2015. № 4. С. 113-134.

17. Кабанцев О.В., Тамразян А.Г. Моделирование упругопластического деформирования каменной кладки в условиях двухосного напряженного состояния // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2015. Iss. 3. Vol. 11. Pp. 87–100.
18. ГОСТ Р 58277-2018 Смеси сухие строительные на цементном вяжущем. Методы испытаний.
19. ГОСТ 24452-80 Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона.
20. СП 63.13330.2018 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. СНиП 52-01-2003 (с Изменениями N 1, 2).

REFERENCES

1. Avdeev K.V., Bobrov V.V., Skakun P.V., Levin D.I., Domarova E.V. Inspection and restoration of damaged structures of buildings due to explosive and temperature influences. *Industrial and Civil Engineering*. 2023. No. 7. Pp. 36-42. (rus)
2. Kabantsev O.V., Simakov O.A., Neshchadimov V.A., Shtyrlov D.A. Reinforcement of Bearing Masonry Walls of Damaged Multi-Storey Buildings. *Industrial and Civil Construction*. 2023. No. 7. Pp. 29-35. doi:10.33622/0869-7019.2023.07.29-35 (rus)
3. Shvedova V.I., Tumol'skiy A.P., Molchanova A.V. Primenenie stahanovskikh metodov na vosstanovitel'nyh rabotah. Obshchestroitel'nye raboty [Application of Stakhanov methods in restoration work. General construction works]. Moskva-Leningrad, 1945. 88 p. (rus)
4. Basov M.A. Vosstanovlenie zdaniy, razrushennykh bombardirovkoj [Restoration of buildings destroyed by bombing]. Moskva-Leningrad, Narkomzem RSFSR Publ., 1943. 88 p. (rus)
5. Barazesh M., Shamim I., Anvar S. Masonry Infill Walls Enhanced with the Reinforced Shotcrete in Blast Incidents. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*. 2023. doi:10.1007/s40996-023-01177-9.
6. Facconi L., Lucchini S., Minelli F., Plizzari G. Analytical model for the in-plane resistance of masonry walls retrofitted with steel fiber reinforced mortar coating. *Engineering Structures*. 2023. No. 275. Pp. 115232. doi:10.1016/j.engstruct.2022.115232.
7. СП 427.1325800.2018 Masonry and reinforced masonry structures. Methods of strengthening (rus)
8. 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. (rus)
9. Ghezlbash A., Beyer K., Dolatshahi K., Yekrangnia M. Shake table test of a masonry building retrofitted with shotcrete. *Engineering Structures*. 2020. No. 219. doi:10.1016/j.engstruct.2020.110912.
10. Adil M. Shear Strength Evaluation of Strengthened Unreinforced Brick Masonry Walls by Using Shotcrete. *ARPJ Journal of Science and Technology*. 2015. No. 5. Pp. 138.
11. Rismanian Y.B., Tafti M., Mirjalili A. Experimental study on in-plane seismic behavior of unreinforced and damaged unreinforced masonry walls retrofitted with vertical concrete ties and bed rebar with and without shotcrete. *Innovative Infrastructure Solutions*. 2023. No. 8. doi:10.1007/s41062-023-01207-5.
12. Wang F. Experimental Research on Seismic Performance of Masonry-Infilled RC Frames Retrofitted by Using Fabric-Reinforced Cementitious Matrix Under In-Plane Cyclic Loading. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2023. No. 17. doi:10.1186/s40069-023-00594-4.
13. Altoubat S., Maalej M., Karzad A., Estephane P. Rapid Strengthening of Unreinforced Masonry Walls for Out-of-Plane Actions using Fiber Reinforced Shotcrete. 2018
14. 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. (rus)
15. Kashevarova G.G., Zobacheva A.Yu. Modeling of process of destruction of brickwork. *PNRPU Construction and Architecture Bulletin*. 2010. No. 1. Pp. 106–116. (rus)
16. Kabantsev O.V. A discrete model of masonry under conditions of biaxial stress state. *Vestnik of TSUAB*. 2015. No. 4. Pp. 113–134. (rus)
17. 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. (rus)
18. GOST R 58277-2018 Dry building mixes based on cement binder. Test methods
19. GOST 24452-80 Concretes. Methods of prismatic, compressive strength, modulus of elasticity and Poisson's ratio determination.
20. СП 63.13330.2018 Concrete and reinforced concrete structures. General provisions.

Информация об авторах:

Гладких Виталий Александрович

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
г. Москва, Россия,
кандидат технических наук, директор НИиИЦ МГСУ СТРОЙ-ТЕСТ.
E-mail: GladkikhVA@mgsu.ru

Домарова Екатерина Владимировна

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
г. Москва, Россия,
старший преподаватель кафедры железобетонных и каменных конструкций.
E-mail: cathie_p@mail.ru

Попов Дмитрий Сергеевич

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
г. Москва, Россия,
кандидат технических наук, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций.
E-mail: popovds89@mail.ru

Шакалова Ирина Станиславовна

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
г. Москва, Россия,
зам. директора НИиИЦ МГСУ СТРОЙ-ТЕСТ.
E-mail: ShakalovaIS@mgsu.ru

Information about authors:

Gladkikh Vitaly Al.

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
candidate of technical sciences, director of the NIIC MGSU STROY-TEST.
E-mail: GladkikhVA@mgsu.ru

Domarova Ekaterina V.

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
senior teacher of the department of reinforced concrete and stone structures.
E-mail: cathie_p@mail.ru

Popov Dmitriy S.

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
candidate of technical sciences, associated professor of the department of reinforced concrete and stone structures.
E-mail: popovds89@mail.ru

Shakalova Irina S.

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
deputy director of the NIIC MGSU STROY-TEST.
E-mail: ShakalovaIS@mgsu.ru

VL.I. KOLCHUNOV¹, S.B. KRYLOV², S.S. FEDOROV¹¹Moscow State University of Civil Engineering (NIU MGSU), Moscow, Russia²Gvozdev Research Institute of Reinforced Concrete, JSC SIC Construction, Moscow, Russia.

STIFFNESS OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES UNDER BENDING CONSIDERING SHEAR AND AXIAL FORCES (PART 1)

Abstract. The paper provides a physical and computational model for determining the parameters of limit states of reinforced concrete structures under complex stress state such as bending with effect of axial and shear forces. The forward and backward transitions for determining the stiffness matrix coefficients of reinforced concrete bar structures with inclined and normal cracks have been constructed on the basis of the adopted cross-section discretization scheme and the duality theorem between force and deformation parameters by A.R. Rzhantsyn. Determination of the stiffness of structures in the zone of inclined cracks was performed on the basis of the model of composite strips into which the zone with inclined cracks is divided. It is assumed a hypothesis about the character of deformation distribution in a complexly stressed reinforced concrete element with inclined cracks. For this model the effective shear modulus has been obtained. It 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. Using this model and the experimentally obtained value of the relative shear in the inclined crack, the dowel forces in the reinforcing bar crossed by the inclined crack were determined. The use of the obtained analytical dependences in the practice of designing reinforced concrete structures allows to clarify significantly the definition of displacements and width of opening of inclined and normal cracks, as well as to bring the calculation and physical model based on experimental data as close as possible.

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

ВЛ.И. КОЛЧУНОВ¹, С.Б. КРЫЛОВ², С.С. ФЕДОРОВ¹¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия²НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство»», г. Москва, Россия

ЖЕСТКОСТЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ИЗГИБЕ С УЧЁТОМ ПОПЕРЕЧНОЙ И ПРОДОЛЬНОЙ СИЛ (ЧАСТЬ 1)

Аннотация. Приведены физическая и расчётная модель для определения параметров предельных состояний железобетонных конструкций при сложном напряжённом состоянии изгиба с продольной и поперечными силами. На основе принятой схемы дискретизации поперечного сечения и теоремы двойственности между силовыми и деформационными параметрами А.Р. Ржаницына 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 сложно напряжённом 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 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.

Intbaruction

The development of research on the creation of new calculation models with complex stress states [1-4, 6, 7] is associated with an increase in the accuracy and reliability of calculation reinforced concrete structures buildings and constructions. The main factor in the creation of effective building structures is the emergence of new technologies at the convergence of physical phenomena, theory and practice of calculation of reinforced concrete [5-9, 19, 20].

The main purpose of long-term experimental and theoretical research of inclined cracks for bending elements, considering shear and axial forces, was to assess the crack resistance and strength of reinforced concrete structures [10-22].

However, there are few researches [16-21] to determine the stiffness of structures considering inclined cracks, including intersecting cracks. This article contains the developed model for estimating the stiffness of reinforced concrete structures under bending taking into account effect of shear and axial forces with inclined cracks using single composite strips in the block - in the wedge and arch between inclined cracks. In addition, the approximation of rectangular cross-sections using small squares in the stiffness matrix elements is also considered.

Based on the analysis of the research of N.I. Karpenko and S.N. Karpenko [23-25], in the axial tensile reinforcement the "dowel" forces Q_s and drift in the crack Δ_s are obtained as a function of the opening width and strains in concrete to the cosine of the crack slope angle (θ). The experimental value "dowel" forces $Q_{s,exp}$ and experimental drift in a crack dependence for the connection between drift ($\Delta_{cr,exp}$) and shear span (a/h_0) are determined, also experimental relationship between an anchoring zone length (and reinforcement strains [10] ($\varepsilon_s \cdot m_{s,3}$)).

The composite strip calculation model and approximation model for rectangular cross-sections using small squares in the stiffness matrix elements

A new effect of the theory of reinforced concrete is established, the concept of conditional modulus of joint (ξ_m) has been intbaruced based on the hypotheses presented in the papers [16-18, 22]. The conditional modulus of joint is defined in a single compound for the shear zone of the joint for the difference of average relative linear and angular $\gamma_{zx, stitch, s, i}$ strains of reciprocal displacements of the concrete (or reinforcement). This allows for reinforced concrete to reduce A.R. Rzhnitsyn's system of differential equations by an order of magnitude and to obtain the total angular strains $\gamma_{zx, stitch, sum, i}$ of concrete in each shear joint and "dowel" effect of reinforcement deformation. The physical characteristics stiffness matrix compressed zone of concrete and the working reinforcement are derived in an equation system of static, deformation and physical equations.

The bending element stiffness considering axial and shear forces is calculated by approximation with small squares of the cross-sections of the structure with lateral inclined and normal cracks (figure 1). Bending moment $M^{bend, ij}$, axial force N_{ij} and shear force Q_{ij} diagrams are plotted for a number of sections 1 to 6 in the crack area. The stiffness characteristics of the sections with cracks D_{ij} (i, j - 1, 2, 3) for equations from [19-21] are obtained in the system of reinforced concrete blocks that is the wedges and arch in the area between inclined cracks ($l_{cr, i}$).

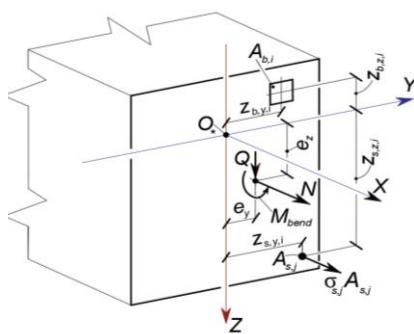


Figure 1 - Small-square approximation scheme in the tensile and compressed zones of a bending element cross-section, taking into account the action of shear and axial forces and the presence of inclined and normal cracks

To solve the problem, we perform a direct transition with known forces M_x , N , Q , but

unknown deformations is performed $\frac{1}{r_x}$, ε_0 and ΔQ :

$$\frac{1}{r_x} = D_{11,*} \cdot M_x + D_{13,*} \cdot N + D_{14,*} \cdot Q ; \quad (1)$$

$$\varepsilon_0 = D_{31,*} \cdot M_x + D_{33,*} \cdot N + D_{34,*} \cdot Q ; \quad (2)$$

$$\Delta Q = D_{41,*} \cdot M_x + D_{43,*} \cdot N + D_{44,*} \cdot Q ; \quad (3)$$

write down the expression for M_x from the equation (1):

$$M_x = \frac{1}{D_{11,*}} \left(\frac{1}{r_x} - D_{13,*} \cdot N - D_{14,*} \cdot Q \right) . \quad (4)$$

Find the values N from the equation (2):

$$N = \frac{1}{D_{33,*}} \left(\varepsilon_0 - D_{31,*} \cdot M_x - D_{34,*} \cdot Q \right) . \quad (5)$$

Find the values Q from the equation (3):

$$Q = \frac{1}{D_{44,*}} \left(\Delta Q - D_{41,*} \cdot M_x - D_{43,*} \cdot N \right) ; \quad (6)$$

We can then write down a system of equations:

$$\begin{cases} M_x = \frac{\frac{1}{r_x} - D_{13,*} \cdot N - D_{14,*} \cdot Q}{D_{11,*}} \\ N = \frac{\varepsilon_0 - D_{31,*} \cdot M_x - D_{34,*} \cdot Q}{D_{33,*}} \\ Q = \frac{\Delta Q - D_{41,*} \cdot M_x - D_{43,*} \cdot N}{D_{44,*}} \end{cases} ; \quad (7)$$

Substitute the value of N from the second equation of this system into the first equation of system (7):

$$M_x = \frac{1}{r_x} \cdot \frac{D_{33,*}}{D_{11,*}D_{33,*} - D_{13,*} \cdot D_{31,*}} + \varepsilon_0 \frac{-D_{13,*}}{D_{11,*}D_{33,*} - D_{13,*} \cdot D_{31,*}} + Q \frac{D_{13,*} \cdot D_{34,*} - D_{33,*} \cdot D_{14,*}}{D_{11,*}D_{33,*} - D_{13,*} \cdot D_{31,*}} ; \quad (8)$$

Then substitute the value of M_x from the first equation of this system into the second equation of system (7)

$$N = \varepsilon_0 \cdot \frac{D_{11,*}}{D_{33,*}D_{11,*} - D_{31,*}D_{13,*}} + \frac{1}{r_x} \cdot \frac{-D_{31,*}}{D_{33,*}D_{11,*} - D_{31,*}D_{13,*}} + Q \cdot \frac{D_{31,*}D_{14,*} - D_{11,*}D_{34,*}}{D_{33,*}D_{11,*} - D_{31,*}D_{13,*}} ; \quad (9)$$

Then let's substitute the obtained value M_x and from equation (8) and (9) into the third equation of the system:

$$Q = D_{41,**} \cdot \frac{1}{r_x} + D_{43,**} \cdot \varepsilon_0 + D_{44,**} \cdot \Delta Q \quad , \quad (10)$$

here the relevant coefficients are of the form D:

$$D_{41,**} = \frac{-D_{41,*} \cdot D_{33,*} + D_{43,*} \cdot D_{31,*}}{D_{44,*}D_{11,*}D_{33,*} - D_{44,*}D_{13,*} \cdot D_{31,*} + D_{41,*} \cdot D_{13,*} \cdot D_{34,*} - D_{41,*} \cdot D_{33,*} \cdot D_{14,*} + D_{43,*} \cdot D_{31,*}D_{14,*} - D_{43,*} \cdot D_{11,*}D_{34,*}} ; \quad (11)$$

$$D_{43,**} = \frac{D_{41,*} \cdot D_{13,*} - D_{43,*} \cdot D_{11,*}}{D_{44,*}D_{11,*}D_{33,*} - D_{44,*}D_{13,*} \cdot D_{31,*} + D_{41,*} \cdot D_{13,*} \cdot D_{34,*} - D_{41,*} \cdot D_{33,*} \cdot D_{14,*} + D_{43,*} \cdot D_{31,*}D_{14,*} - D_{43,*} \cdot D_{11,*}D_{34,*}} ; \quad (12)$$

$$D_{44,**} = \frac{D_{11,*}D_{33,*} - D_{13,*} \cdot D_{31,*}}{D_{44,*}D_{11,*}D_{33,*} - D_{44,*}D_{13,*} \cdot D_{31,*} + D_{41,*} \cdot D_{13,*} \cdot D_{34,*} - D_{41,*} \cdot D_{33,*} \cdot D_{14,*} + D_{43,*} \cdot D_{31,*}D_{14,*} - D_{43,*} \cdot D_{11,*}D_{34,*}} ; \quad (13)$$

Substitute the value Q from equation (10) into equation (8) we obtain:

$$M_x = D_{11,**} \cdot \frac{1}{r_x} + D_{13,**} \cdot \varepsilon_0 + D_{14,**} \cdot \Delta Q \quad . \quad (14)$$

Here the relevant coefficients take the form of D:

$$D_{11,**} = \frac{D_{33,*} + D_{41,**} \cdot D_{13,*} \cdot D_{34,*} - D_{41,**} \cdot D_{33,*} \cdot D_{14,*}}{D_{11,*}D_{33,*} - D_{13,*} \cdot D_{31,*}} ; \quad (15)$$

$$D_{13,**} = \frac{-D_{13,*} + D_{43,**}D_{13,*} \cdot D_{34,*} - D_{43,**}D_{33,*} \cdot D_{14,*}}{D_{11,*}D_{33,*} - D_{13,*} \cdot D_{31,*}} ; \quad (16)$$

$$D_{14,**} = \frac{D_{44,**} \cdot D_{13,*} \cdot D_{34,*} - D_{44,**} \cdot D_{33,*} \cdot D_{14,*}}{D_{11,*}D_{33,*} - D_{13,*} \cdot D_{31,*}} ; \quad (17)$$

Similarly for N we obtain:

$$N = D_{31,**} \cdot \frac{1}{r_x} + D_{33,**} \cdot \varepsilon_0 + D_{34,**} \cdot \Delta Q \quad ; \quad (18)$$

Here the relevant coefficients take the form of D:

$$D_{31,**} = \frac{-D_{31,*} + D_{41,**} \cdot D_{31,*}D_{14,*} - D_{41,**} \cdot D_{11,*}D_{34,*}}{D_{33,*}D_{11,*} - D_{31,*}D_{13,*}} ; \quad (19)$$

$$D_{33,**} = \frac{D_{11,*} + D_{43,**} \cdot D_{31,*}D_{14,*} - D_{43,**} \cdot D_{11,*}D_{34,*}}{D_{33,*}D_{11,*} - D_{31,*}D_{13,*}} ; \quad (20)$$

$$D_{34,**} = \frac{D_{44,**} \cdot D_{31,*}D_{14,*} - D_{44,**} \cdot D_{11,*}D_{34,*}}{D_{33,*}D_{11,*} - D_{31,*}D_{13,*}} ; \quad (21)$$

As a result, we can write the matrix D:

$$D = \begin{bmatrix} D_{11,**} & D_{13,**} & D_{14,**} \\ D_{31,**} & D_{33,**} & D_{34,**} \\ D_{41,**} & D_{43,**} & D_{44,**} \end{bmatrix}, \quad (22)$$

where $D_{11,**}, D_{13,**}, D_{14,**}, D_{31,**}, D_{33,**}, D_{34,**}, D_{41,**}, D_{43,**}, D_{44,**}$, are defined from equation system:

$$\begin{cases} M_x = D_{11,**} \cdot \frac{1}{r_x} + D_{13,**} \cdot \varepsilon_0 + D_{14,**} \cdot \Delta Q; \\ N = D_{31,**} \cdot \frac{1}{r_x} + D_{33,**} \cdot \varepsilon_0 + D_{34,**} \cdot \Delta Q; \\ Q = D_{41,**} \cdot \frac{1}{r_x} + D_{43,**} \cdot \varepsilon_0 + D_{44,**} \cdot \Delta Q. \end{cases}$$

$D_{11,**}$ is the second-level coefficient in the matrix elements in equation (22), which is written in the form:

$$D_{11,**} = \frac{D_{33,*} + D_{41,**} \cdot D_{13,*} \cdot D_{34,*} - D_{41,**} \cdot D_{33,*} \cdot D_{14,*}}{D_{11,*} D_{33,*} - D_{13,*} \cdot D_{31,*}}, \quad (23)$$

$D_{11,*}$ and $D_{41,*}$ ($D_{12,*} = 0$) are the first-level coefficient in equations (19-21). The coefficients are also obtained: $D_{11,*} - D_{44,*}$.

The coefficient $D_{41,*}$ in the matrix elements at the first level is determined from equation:

$$D_{41,*} = \frac{-D_{14} \cdot D_{33} + D_{34} \cdot D_{13}}{D_{44} D_{11} D_{33} - D_{44} D_{13} \cdot D_{13} + 2 D_{14} \cdot D_{13} \cdot D_{34} - D_{14} \cdot D_{14} \cdot D_{33} - D_{34} \cdot D_{34} D_{11}}. \quad (24)$$

Here $D_{11} - D_{14}$ are the coefficients in the matrix elements, at the first level are determined according to the formulas SP 63.13330.2018.

Now perform the reverse transition when the curvatures and strains in the element cross-section $\frac{1}{r_x}$, ε_0 and ΔQ are known, but the forces M_x , N , Q are unknown:

$$M_x = D_{11} \cdot \frac{1}{r_x} + D_{13} \cdot \varepsilon_0 + D_{14} \cdot \Delta Q; \quad (25)$$

$$N = D_{13} \cdot \frac{1}{r_x} + D_{33} \cdot \varepsilon_0 + D_{34} \cdot \Delta Q; \quad (26)$$

$$Q = D_{14} \cdot \frac{1}{r_x} + D_{34} \cdot \varepsilon_0 + D_{44} \cdot \Delta Q. \quad (27)$$

Get the curvature values $\frac{1}{r_x}$ from the expression (25):

$$\frac{1}{r_x} = \frac{M_x - D_{13} \cdot \varepsilon_0 - D_{14} \cdot \Delta Q}{D_{11}}, \quad (28)$$

The values of axial strains ε_0 and drifts ΔQ we obtain from expressions (26) and (27) respectively:

$$\varepsilon_0 = \frac{N \cdot -D_{13} \cdot \frac{1}{r_x} - D_{34} \cdot \Delta Q}{D_{33}} ; \quad (29)$$

$$\Delta Q = \frac{Q - D_{14} \cdot \frac{1}{r_x} - D_{34} \cdot \varepsilon_0}{D_{44}} . \quad (30)$$

As a result, we obtain a system of equations similar to (22):

$$\begin{cases} \frac{1}{r_x} = \frac{M_x - D_{13} \cdot \varepsilon_0 - D_{14} \cdot \Delta Q}{D_{11}} ; \\ \varepsilon_0 = \frac{N - D_{13} \cdot \frac{1}{r_x} - D_{34} \cdot \Delta Q}{D_{33}} ; \\ \Delta Q = \frac{Q - D_{14} \cdot \frac{1}{r_x} - D_{34} \cdot \varepsilon_0}{D_{44}} . \end{cases} \quad (31)$$

In the first equation of the system (31), substitute the strain value from the second equation of the system:

$$\frac{1}{r_x} = \frac{D_{33}}{D_{11}D_{33} - D_{13} \cdot D_{13}} \cdot M_x + \frac{-D_{13}}{D_{11}D_{33} - D_{13} \cdot D_{13}} \cdot N + \frac{D_{13} \cdot D_{34} - D_{14} \cdot D_{33}}{D_{11}D_{33} - D_{13} \cdot D_{13}} \cdot \Delta Q \quad (32)$$

Then substitute the curvature values $\frac{1}{r_x}$ from the first equation of the system into the second equation of the system (31):

$$\varepsilon_0 = \frac{D_{11}}{D_{33}D_{11} - D_{13} \cdot D_{13}} \cdot N + \frac{-D_{13}}{D_{33}D_{11} - D_{13} \cdot D_{13}} \cdot M_x + \frac{D_{13} \cdot D_{14} - D_{34}D_{11}}{D_{33}D_{11} - D_{13} \cdot D_{13}} \cdot \Delta Q \quad (33)$$

Now substitute the curvature value $\frac{1}{r_x}$ and axial strains ε_0 obtained from equations (32) and (33) into the third equation of the system (31). The result is as follows:

$$\Delta Q = D_{41,*} \cdot M_x + D_{43,*} \cdot N + D_{44,*} \cdot Q \quad (34)$$

Here the coefficients D are of the form:

$$D_{41,*} = \frac{-D_{14} \cdot D_{33} + D_{34} \cdot D_{13}}{D_{44}D_{11}D_{33} - D_{44}D_{13} \cdot D_{13} + 2D_{14} \cdot D_{13} \cdot D_{34} - D_{14} \cdot D_{14} \cdot D_{33} - D_{34} \cdot D_{34}D_{11}} ; \quad (35)$$

$$D_{44,*} = \frac{D_{11}D_{33} - D_{13} \cdot D_{13}}{D_{44}D_{11}D_{33} - D_{44}D_{13} \cdot D_{13} + 2D_{14} \cdot D_{13} \cdot D_{34} - D_{14} \cdot D_{14} \cdot D_{33} - D_{34} \cdot D_{34}D_{11}} ; \quad (36)$$

$$D_{43,*} = \frac{D_{14} \cdot D_{13} - D_{34} \cdot D_{11}}{D_{44}D_{11}D_{33} - D_{44}D_{13} \cdot D_{13} + 2D_{14} \cdot D_{13} \cdot D_{34} - D_{14} \cdot D_{14} \cdot D_{33} - D_{34} \cdot D_{34}D_{11}} . \quad (37)$$

And then substitute the value of ΔQ obtained from equation (34) into the expression (32) and get as a result:

$$\frac{1}{r_x} = D_{11,*} \cdot M_x + D_{13,*} \cdot N + D_{14,*} \cdot Q ; \quad (38)$$

Here the coefficients D are of the form:

$$D_{11,*} = \frac{D_{33} + D_{41,*} \cdot D_{13} \cdot D_{34} - D_{41,*} \cdot D_{14} \cdot D_{33}}{D_{11}D_{33} - D_{13} \cdot D_{13}} ; \quad (39)$$

$$D_{13,*} = \frac{-D_{13} + D_{13} \cdot D_{34} \cdot D_{43,*} - D_{14} \cdot D_{33} \cdot D_{43,*}}{D_{11}D_{33} - D_{13} \cdot D_{13}} ; \quad (40)$$

$$D_{14,*} = \frac{D_{13} \cdot D_{34} \cdot D_{44,*} - D_{14} \cdot D_{33} \cdot D_{44,*}}{D_{11}D_{33} - D_{13} \cdot D_{13}} ; \quad (41)$$

After that substitute the value of ΔQ from equation (34) into the expression (33) and we obtain:

$$\varepsilon_0 = D_{31,*} \cdot M_x + D_{33,*} \cdot N + D_{34,*} \cdot Q . \quad (42)$$

Here the coefficients D are of the form:

$$D_{31,*} = \frac{D_{13} \cdot D_{14} \cdot D_{41,*} - D_{34}D_{11} \cdot D_{41,*} - D_{13}}{D_{33}D_{11} - D_{13} \cdot D_{13}} ; \quad (43)$$

$$D_{33,*} = \frac{D_{11} + D_{13} \cdot D_{14} \cdot D_{43,*} - D_{34}D_{11} \cdot D_{43,*}}{D_{33}D_{11} - D_{13} \cdot D_{13}} ; \quad (44)$$

$$D_{34,*} = \frac{D_{13} \cdot D_{14} \cdot D_{44,*} - D_{34}D_{11} \cdot D_{44,*}}{D_{33}D_{11} - D_{13} \cdot D_{13}} . \quad (45)$$

As a result, we obtain the following system for obtaining the coefficients of matrix D :

$$\begin{cases} \frac{1}{r_x} = D_{11,*} \cdot M_x + D_{13,*} \cdot N + D_{14,*} \cdot Q; \\ \varepsilon_0 = D_{31,*} \cdot M_x + D_{33,*} \cdot N + D_{34,*} \cdot Q; \\ \Delta Q = D_{41,*} \cdot M_x + D_{43,*} \cdot N + D_{44,*} \cdot Q. \end{cases} , \quad (46)$$

here

$$D_{13,*} = \frac{D_{13} \cdot D_{34} \cdot D_{43,*} - D_{14} \cdot D_{33} \cdot D_{43,*} - D_{13}}{D_{11}D_{33} - D_{13} \cdot D_{13}} ; \quad (47)$$

$$D_{14,*} = \frac{D_{13} \cdot D_{34} \cdot D_{44,*} - D_{14} \cdot D_{33} \cdot D_{44,*}}{D_{11}D_{33} - D_{13} \cdot D_{13}} ; \quad (48)$$

$$D_{31,*} = \frac{D_{13} \cdot D_{14} \cdot D_{41,*} - D_{34}D_{11} \cdot D_{41,*} - D_{13}}{D_{33}D_{11} - D_{13} \cdot D_{13}} ; \quad (49)$$

$$D_{33,*} = \frac{D_{11} + D_{13} \cdot D_{14} \cdot D_{43,*} - D_{34}D_{11} \cdot D_{43,*}}{D_{33}D_{11} - D_{13} \cdot D_{13}} ; \quad (50)$$

$$D_{34,*} = \frac{D_{13} \cdot D_{14} \cdot D_{44,*} - D_{34}D_{11} \cdot D_{44,*}}{D_{33}D_{11} - D_{13} \cdot D_{13}} ; \quad (51)$$

$$D_{41,*} = \frac{-D_{14} \cdot D_{33} + D_{34} \cdot D_{13}}{D_{44}D_{11}D_{33} - D_{44}D_{13} \cdot D_{13} + 2D_{14} \cdot D_{13} \cdot D_{34} - D_{14} \cdot D_{14} \cdot D_{33} - D_{34} \cdot D_{34}D_{11}} ; \quad (52)$$

$$D_{43,*} = \frac{D_{14} \cdot D_{13} - D_{34} \cdot D_{11}}{D_{44}D_{11}D_{33} - D_{44}D_{13} \cdot D_{13} + 2D_{14} \cdot D_{13} \cdot D_{34} - D_{14} \cdot D_{14} \cdot D_{33} - D_{34} \cdot D_{34}D_{11}}; \quad (53)$$

$$D_{44,*} = \frac{D_{11}D_{33} - D_{13} \cdot D_{13}}{D_{44}D_{11}D_{33} - D_{44}D_{13} \cdot D_{13} + 2D_{14} \cdot D_{13} \cdot D_{34} - D_{14} \cdot D_{14} \cdot D_{33} - D_{34} \cdot D_{34}D_{11}}. \quad (54)$$

Thus, the matrix elements $D_{p,q}$ are determined by the given transformations. And there is also a **direct transition 1** from the internal forces M_x, N, Q in the section of the structure to deformations $\frac{1}{r_x}, \varepsilon_0, \Delta_Q$.

The mathematical levels obtained are from the first to the second level, respectively.

Equations of a reinforced concrete composite bar and formulas for determining its stiffness parameters

Write down the dependences for the axial strains $\varepsilon_{0,x,j,i}$, curvatures $\frac{1}{r_{y,j,i}}$ and shear drifts $\Delta_{Q,\Sigma}$ using the proposed discretization scheme of the section by small squares.

Axial strain $\varepsilon_{b,0,x,j,i}$ due to the bending of the neutral axis (N.A.) $\varepsilon_{b,0,x,j,i}^*$ obtained in [10, 16-21] has the form:

$$\varepsilon_{b,0,x,j,i} = \varepsilon_{b,0,x,j,i}^* + \frac{a_{crc,0}}{l_{crc,0}}. \quad (55)$$

Here $\Delta\varepsilon_{b,0,x,j,i}$ is the internal additional axial strain caused by crack opening a_{crc} from

concrete spalling $\Delta\varepsilon_{b,0,x,j,i} = \frac{a_{crc,0}}{l_{crc,0}}$ or reinforcement strains $\Delta\varepsilon_{s,0,x,j,i} = \frac{a_{crc,0} \cdot k_r}{l_{crc,0}};$

internal additions of axial strain $\Delta\varepsilon_{b,0,x,j,i}$ and $\Delta\varepsilon_{s,0,x,j,i}$ fibers, located in the neutral axis (i.e., point O*) of concrete or reinforcement.

Determine the curvature of the reinforced concrete element $\frac{1}{r_{y,j,i}}$ using the equation (56):

$$\begin{aligned} \frac{1}{r_{y,j,i}} &= \frac{\varepsilon_{n,up,i}}{z_{n,up,i} - z_{n,b,A,0,i}} = \frac{\varepsilon_{n,up,i} + \varepsilon_{n,d,i}}{\Delta h_i} \pm \Delta_{j,i} \left(\frac{1}{r_x} \right) = \\ &= \frac{\varepsilon_{n,up,i} + \varepsilon_{n,d,i}}{\Delta h_i} \pm \frac{\left(\frac{a_{crc} \cdot k_r}{l_{crc}} \right)_{n,up,i} + \left(\frac{a_{crc} \cdot k_r}{l_{crc}} \right)_{n,d,i}}{\Delta h_i}. \end{aligned} \quad (56)$$

Here $\varepsilon_{n,up,i}$ and $\varepsilon_{n,d,i}$ are the strains in the upper and lower areas of one small square; Δh_i is the

small square height; $\pm \Delta_{j,i} \left(\frac{1}{r_x} \right)$ is the internal addition from the crack opening a_{crc} for concrete

$\Delta\varepsilon_{b,up,x,j,i} = a_{crc} \cdot k_r / l_{crc}$ or for reinforcement $\Delta\varepsilon_{s,d,x,j,i} = a_{crc} / l_{crc}.$

Shear drift from shear force Q is:

$$\Delta_{Q,b,\Sigma} = \Delta_{Q,j,i} + \Delta_{don,b} = \frac{Q_{j,i}}{G_b(\lambda) \cdot A_{b,j,i}} \cdot \eta_{Q,b} + \Delta_{add,zx,b}(k_r); \quad (57)$$

$$\Delta_{Q,s,\Sigma} = \frac{Q_{j,i}}{G_s(\lambda) \cdot \frac{A_{s,j,i}}{\mu_s}} \cdot \eta_{Q,s} + \Delta_{add,zx,s}(k_r) \quad (58)$$

Here $\Delta_{Q,\Sigma}$ is the total shear drifts from shear force $\Delta_{Q,j,i}$ as for a solid body, defined by structural mechanics methods; $\Delta_{add,zx,b}(k_r)$ is the internal (from crack opening) addition of drift (i.e., $\Delta_{crc,zx}$).

Then, determine **the drift Δ_Q from the shear force** in the inclined section. Then the stiffness of the section in the zone of inclined cracks will be obtained through intersecting cracks using the single composite strip model and the block that is wedge and arch $l_{crc,i}$ model in the area of the curved axis for internal forces (figure 2).

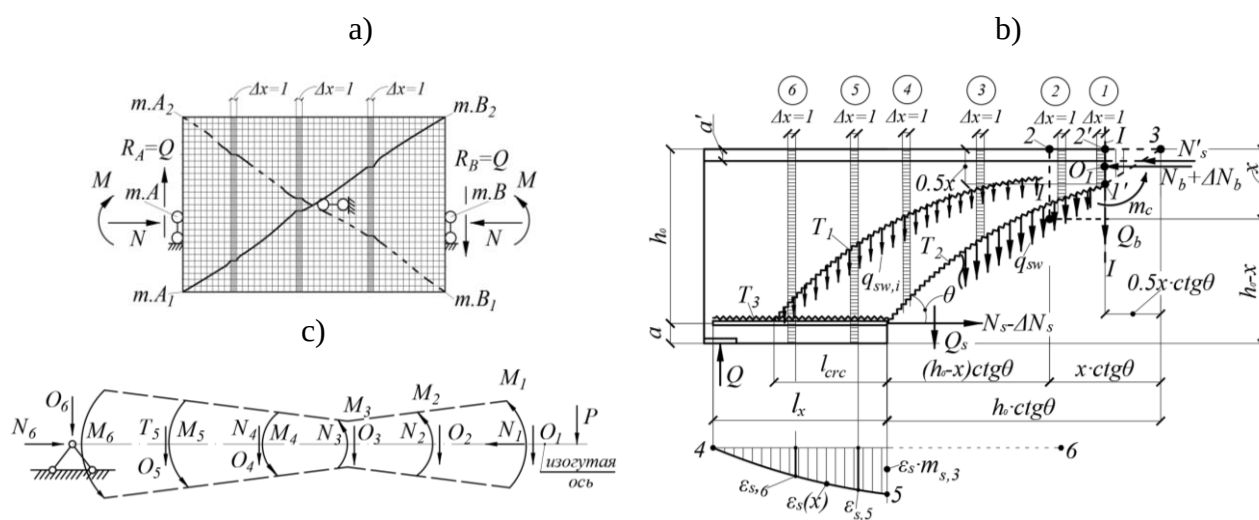


Figure 2 - Inclined (crossed) cracks and shear single composite strips (a); block - wedge and arches $l_{crc,i}$ (b), curved axis for internal forces (c)

The proposed hypothesis and model of composite bar [16-22] allows the system of differential equations of Prof. A.R. Rzhanitsyn to be reduced by an order of magnitude in the presence of cracks arising at an arbitrary point of shear joint.

Following [16-22] for the reinforced concrete composite bar model in question, it can be written:

$$k_{i,m} \cdot \gamma_{b,m} = \varepsilon_{qm}, \quad (59)$$

$$\tau_q = k_{i,m} \cdot \gamma_{b,m} \cdot \xi_m = \varepsilon_{qm} \xi_m \quad (60)$$

$$\tau' = \frac{T''}{\xi_\Delta}; \quad (61)$$

$$\tau' = \frac{T'}{\xi_m} = \frac{T'}{\xi_m} = \gamma T + \Delta; \quad (62)$$

$$\begin{cases} \frac{T'_1}{\xi_{m,1}} - \Delta_{11}T_1 - \Delta_{12}T_2 - \dots - \Delta_{1n}T_n = \Delta_{10}; \\ \frac{T'_2}{\xi_{m,2}} - \Delta_{21}T_1 - \Delta_{22}T_2 - \dots - \Delta_{2n}T_n = \Delta_{20}; \\ \frac{T'_n}{\xi_{m,n}} - \Delta_{n1}T_1 - \Delta_{n2}T_2 - \dots - \Delta_{nn}T_n = \Delta_{n0}. \end{cases} \quad (63)$$

For calculated element with cracks:

$$\Delta = -\frac{N_{0,1}}{(E_{b,1}A_{b,1})_{ekv}} + \frac{N_{0,2}}{(E_{b,2}A_{b,2})_{ekv}} - \frac{f(x_{crc})}{r_y}; \quad (64)$$

$$\lambda = \sqrt{\xi\gamma} = \sqrt{\xi \left[\frac{1}{(E_{b,1}A_{b,1})_{ekv}} + \frac{1}{(E_{b,2}A_{b,2})_{ekv}} + \frac{f^2(x_{crc})}{M \times r_y} \right]}; \quad (65)$$

For (63) T_1, T_2, T_n are the shear forces in the 1st, 2nd, ..., n^{th} bars accumulated along the length of the bar to the section; $\xi_{m,1}, \xi_{m,2}, \xi_{m,n}$ are modulus in a single shear band of the joint, Δ is the drift along a given direction; $\varepsilon_{qm}, \gamma_{b,m}$ are the difference in the average linear and angular strains of concrete and reinforcement in the joint point adjacent to the joint between adjacent cracks; $(E_{b,1}A_{b,1})_{ekv}, (E_{b,2}A_{b,2})_{ekv}$ are the equivalent sectional stiffnesses [10, 16-22].

The experimental dependence of the crack drift $\Delta_{crc,exp}(a/h_0)$ is plotted from experimental data [10] graphically (figure 3):

$$\Delta_{crc,exp} = e^{-\lambda \left(\frac{a}{h_0} + A \right)} + C. \quad (66)$$

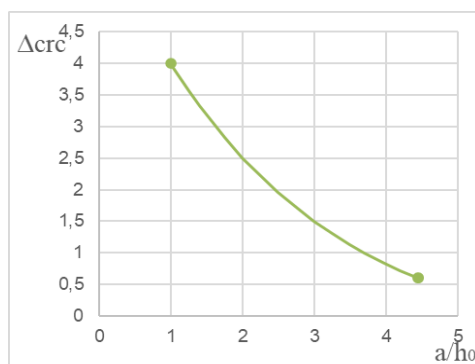


Figure 3 - Dependency graph $\Delta_{crs} - \frac{a}{h_0}$

The above exponent has the following characteristic points:

p.1 - $\Delta_{crs,1} = 4 \text{ mm}$, $a_1/h_0 = 1 \text{ mm}$; p.2 - $\Delta_{crs,2} = 1.5 \text{ mm}$, $a_2/h_0 = 3$; p.3 - $\Delta_{crs,3} = 1 \text{ mm}$, $a_3/h_0 = 3.7 \text{ mm}$.

From equation (66) we obtain: $4 = e^{-\lambda(1+A)} + C$; $1.5 = e^{-\lambda(3+A)} + C$; $1 = e^{-\lambda(3.7+A)} + C$.

The result is as follows: $\lambda = 0,397512$; $A = -4,816204$; $C = -0,55847$.

After the constants determination dependence (66) takes the form:

$$\Delta_{crc} = e^{-0,397512 \left(\frac{a}{h_0} - 4,816204 \right)} - 0,55847. \quad (67)$$

It is important to define the dependence of the strains of the reinforcement ε_s in the anchoring zone (Fig. 2b) in the form of:

$$\varepsilon_s \cdot m_{s,3} = A \cdot l_x^2 + B \cdot l_x + C. \quad (68)$$

Here $\frac{l_x}{l_{an}} = m_{s,3}$ is the coefficient and the parameters for the anchoring zone: $A = \frac{\varepsilon_s \cdot m_{s,3}}{l_x^2 - 2l_x}$;
 $B = -\frac{\varepsilon_s \cdot m_{s,3}}{l_x^2 - 2l_x} 2l_x$; $C = 0$.

Then we obtain:

$$\varepsilon_s \cdot m_{s,3} = \frac{\varepsilon_s \cdot m_{s,3}}{l_x^2 - 2l_x} \cdot l_x^2 - \frac{\varepsilon_s \cdot m_{s,3}}{l_x^2 - 2l_x} 2l_x \cdot l_x. \quad (69)$$

Determination of deformations and tensions. After determining the shear bond force, the axial force N_i in each constituent element of the composite bar is determined from the expression:

$$N_i = N_i^0 - T_i + T_{i+1} \quad (70)$$

where T_i, T_{i+1} are the total shear forces in the i^{th} bars.

The internal moment M_i in one bar element is equal:

$$M_i = \frac{M^0 E_i I_i}{\sum EI} - \sum_{j=1}^n \frac{T_j c_j E_j I_j}{\sum EI}. \quad (71)$$

Here c_i is the distance between centers of gravity of adjacent bars, separated by the i^{th} joint;
 $\sum EI$ is the sum of the stiffnesses of the elements of the composite bar.

The deflection of a bar composed of several elements can be obtained after determining total bending moment:

$$M = M^0 - \sum_{i=1}^n T_i c_i \quad (72)$$

The axial tensions and linear strains in each element of the composite bar are defined by the expressions:

$$\sigma_{x,i} = \frac{N_i}{A_{ix,i}} + \frac{M_i z_i}{I_i}. \quad (73)$$

$$\varepsilon_{x,i} = \frac{N_i}{E(\lambda) A_i} + \frac{M_i z_i}{E(\lambda) I_i}. \quad (74)$$

Here z_i is the distance from the center of gravity of the cross-section of the i^{th} element of the composite bar to the fiber in question.

Then the expression for the curvature of the composite bar is obtained:

$$\frac{1}{r_x} = y'' = -\frac{M}{\sum EI}. \quad (75)$$

The axial force diagram of the composite bar is graduated in all the bars.

Consider the equilibrium of a prism of length dx and height $z_i + b_{i+1}$ cut from the i^{th} bar to determine the tangential tensions τ_{zx} in the i^{th} bar. Project all forces onto the x-axis, we obtain:

$$B(z_i)\tau_{zx} = -\frac{d}{dx} \int_{-b_{i-1}}^{z_i} B(t) \cdot \sigma_x(t) dt + \tau_{i-1}, \quad (76)$$

and taking into account the formula we get (73):

$$\tau_{zx} = \frac{1}{B(z_i)} \left[-\frac{N'_i}{F_i} F(z_i) - \frac{M'_i S(z_i)}{I_i} + \tau_{i-1} \right], \quad (77)$$

Here $F(z_i)$, $S(z_i)$ are the cross-sectional area of the i^{th} bar above the level z_i and the static moment of this area in relation to the central axis of the i^{th} bar; $B(z_i)$ is the section width at the level of z_i ; for a rectangular cross-section $B(t) = B = \text{const}$ and $S(z_i) = S$.

Then taking into account formulas (70) and (71), tangential tensions in each constituent bar at $N_i^0 = \text{const}$, are equal:

$$\tau_{zx} = \frac{1}{B(z_i)} \left[\frac{\tau_i - \tau_{i-1}}{F_i} F(z_i) - \frac{Q^0 E_i I_i}{\sum EI} \cdot \frac{S(z_i)}{I_i} + \sum_{j=1}^n \tau_{i,j} c_{i,j} \frac{E_i I_i}{\sum EI} \frac{S(z_i)}{I_i} + \tau_{i-1} \right], \quad (78)$$

where $Q^0 = M^0$.

The angular strains in each element of the composite bar are [19-22]:

$$\gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G(\lambda)} = \frac{\tau_{zx} \cdot 2(1 + \nu(\lambda))}{E(\lambda)}. \quad (79)$$

The angular strains in each joint of the composite bar are:

$$\gamma_{zx, \text{stitch}, b, i} = \frac{T'_{zx, \text{stitch}, b, i}}{G_m} = \frac{\tau_{zx, \text{stitch}, b, i}}{G_m} = \frac{\tau_{zx, \text{stitch}, b, i}}{k_{i,m} \cdot \xi_m}. \quad (80)$$

Find here the value $T'_{zx, \text{stitch}, b, i}$ from the system of differential equations (63), i.e., find the value of the tangential tensions $\tau_{zx, \text{stitch}, b, i}$.

Then determine the additional force taking into account the "dowel" effect in the stirrups.

The force in the stirrups from the axial force Q_{sw} for the block that is wedge and arch models is taken into account separately [10, 24-26]:

$$Q_s = \frac{\sigma_s A_s \text{ctg} \theta}{\eta_\tau} \leq Q_{s, \text{exp}}, \quad (81)$$

$$\Delta_s = \frac{0.5 a_{\text{cr}, s} \sin \theta - N_s B_s}{0.5 \cos \theta} \leq \Delta_{\text{exp}, s}. \quad (82)$$

Here η_τ is the transient coefficient before yield strength in the reinforcement $\eta_\tau = 13-17$ (in average $\eta_\tau = 16$), and after yield strength is reached, at $\sigma_s = R_s$, $\eta_\tau = 20-25$ [10, 23-28]; $Q_{s, \text{exp}}$ is experimental determined "dowel" force in the reinforcement.

The shear in the crack $\tau^{\Delta_{\text{cr}}}$ is found by the equation (67).

Tangential tensions and angular strains from the "dowel" effect are determined by the expressions:

$$\tau_{zx, stitch, s, i} = \frac{Q_s}{A_s} = \frac{\sigma_s A_s \operatorname{ctg} \theta}{\eta_\tau A_s} = \frac{\sigma_s \operatorname{ctg} \theta}{\eta_\tau}, \quad (83)$$

and

$$\gamma_{zx, stitch, s, i} = \frac{Q_s}{A_s G_m} = \frac{\tau_{zx, stitch, i}}{G_m} = \frac{\tau_{zx, stitch, i}}{k_{i, m} \cdot \xi_m} = \frac{\sigma_s \operatorname{ctg} \theta}{\eta_\tau \cdot k_{i, m} \cdot \xi_m}. \quad (84)$$

The total angular strains of concrete and reinforcement are determined by the equation:

$$\gamma_{zx, stitch, sum, i} = \gamma_{zx, stitch, b, i} + \gamma_{zx, stitch, s, i}. \quad (85)$$

The jumps in the axial tension diagram in each shear joint are determined by the relation T'_i / ξ_i .

Conclusions

Based on these studies, the following conclusions can be drawn.

1. A scheme is proposed for approximating rectangular cross-sections of complexly stressed reinforced concrete structures using small squares to determine the elements a_{pq} of the matrix of stiffness characteristics from $D_{11, **}$ to $D_{33, **}$, and also built direct (for internal forces) and reverse,

(where, $\frac{1}{r_x}$, ε_0 and ΔQ are known, but unknown M_x , N , Q) transition to determine the coefficients - stiffness characteristics of the matrix D_{pq} ($p, q - 1, 2, 3$) of the compressed area of concrete and tensioned working reinforcement in the system of equations, - static, geometric and physical equations.

2. To solve the problems of determining the design parameters of the limit states of group II in the zone of inclined (cross) cracks, a deformation model of single composite strips was constructed that simulates deformations in the zone of inclined cracks, taking into account the change in the position of the curved axis during the formation of cracks.

3. Rigidity of sections in the zone of inclined cracks of reinforced concrete structures under the action of a bending moment M_{bend} , axial N and shear forces Q for the model of single composite

strips are found based on axial strains $\varepsilon_{0, x, j, i, *}$ (from the neutral axis), curvature $\frac{1}{r_{x, j, i, *}}$, as well as shear drifts $\Delta Q_{j, i, *}$, taking the scheme of breaking down cross sections into small squares and taking into account elastic-plastic strains in compressed concrete and working reinforcement.

4. Based on the proposed hypothesis about the nature of the distribution of strains in a complexly stressed reinforced concrete element with cracks, the conditional shear modulus ξ_m in a single zone of a shear joint was obtained for average relative linear and angular strains from mutual displacements of concrete and reinforcement at the point of the joint adjacent to the shear joint between adjacent cracks. The use of this hypothesis allows us to reduce the order of the system of differential equations of composite A. P. Rzhanitsyn and take into account the presence of cracks in the structure.

5. For shears and internal forces in the model of reinforced concrete composite bars, axial stresses and linear strains in each component bar are obtained. The plot of axial and tangential stresses (strains) in the cross section of a composite bar is stepped.

6. The gradient of the dependence of the crack shear on the diagram of axial and shear stresses in each composite bar for each weld is determined by the ratio of the derivative of the shear force in the i^{th} joint to the conditional shear modulus.

7. The dowel force in the reinforcement Q_s from the shear force in the inclined section was obtained on the basis of the model of the support zone in the form of composite strips and the experimentally determined shear value in the crack.

REFERENCES

1. Arzamastsev S.A., Barevich 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. Kalkan I., Kartal S. 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. No. 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 regulations. *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 of Heavy Concrete for Strength, Cracking and Deformation. Moscow: Publishing House ABC, 2010. 352 p.
7. Krylov S.B. Formation of exact general solution of bending equation of reinforced concrete bar considering creep and cracking. *Concrete and Reinforced Concrete in Ukraine*. 2002. No. 4(14). Pp. 2-4.
8. Travush V.I., Karpenko N.I., Kolchunov V.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 V.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 V.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. Pp. 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. Golyshev A.B., Kolchunov V.I. Reinforced concrete resistance. Kiev: Osnova, 2009. 432 p.
19. Golyshev A.B., Kolchunov V.I. Resistance of reinforced concrete structures erected in complex engineering-geological conditions. Kiev: Osnova, 2010. 286 p. (rus)
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. *Industrial and Civil Engineering*. 2013. No. 12. Pp. 64–71. (rus)

21. Veryuzhsky Yu.V., Golyshev 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 ASV. 2014. 432 p.
22. 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.
23. Karpenko N.I. The theory of deformation of reinforced concrete with cracks, Moscow: Stroyizdat. 1976. 204 p.
24. Karpenko N.I. General models of reinforced concrete mechanics. Moscow: Stroyizdat, 1996. 410 p.
25. 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.
26. 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. No. 116. Pp. 251-233.
27. Bernardo L. Modeling the Full Behavior of Reinforced Concrete Flanged Beams under Torsion. *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9. Pp. 2730.
28. Tsai H.-C., Liao M.-C. Modeling Torsional Strength of Reinforced Concrete Beams using Genetic Programming Polynomials with Building Codes. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2019. Vol. 23. Pp. 3464–3475.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Arzamastsev S.A., Barevich 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. Kalkan I., Kartal S. 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. No. 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 В.И., Каприелов С.С., Демьянов А.И., Конорев 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 В.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., Аль-Хашими О.И., Протченко М.В. Жесткость железобетонных конструкций при изгибе с поперечной и продольной силами // *Строительство и реконструкция*. 2021. № 6. С. 5-19.
11. Колчунов В. 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 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. Pp. 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. Горностаев И.С., Ключева Н.В., Колчунов В.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 В.И. Расчетные модели силового сопротивления железобетона. М.: Изд-во АСВ, 2004. 471 с.
17. Вержужский Ю.В., Колчунов В.И. Методы механики железобетона. Учебное пособие. К.: Книжное издательство НАУ, 2005. 653 с.
18. Голышев А.Б., Колчунов В.И. Сопротивление железобетона. 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. 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.
22. Баширов Х.З., Колчунов Вл.И., Федоров В.С., Яковенко И.А. Железобетонные составные конструкции зданий и сооружений. Москва: Издательство АСВ, 2017. 248 с.
23. Карпенко Н.И. Теория деформирования железобетона с трещинами. М: Стройиздат. 1976. 204 с.
24. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. М.: Стройиздат, 1996. 410 с.
25. Карпенко С.Н. Об общем подходе к построению теории прочности железобетонных элементов при действии поперечных сил // Бетон и железобетон. 2007. № 2. С. 21-27.
26. 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. No. 116. Pp. 251-233.
27. Bernardo L. Modeling the Full Behavior of Reinforced Concrete Flanged Beams under Torsion // Applied Sciences. 2019. Vol. 9. P. 2730.
28. Tsai H.-C., Liao M.-C. Modeling Torsional Strength of Reinforced Concrete Beams using Genetic Programming Polynomials with Building Codes // KSCE Journal of Civil Engineering. 2019. Vol. 23. Pp. 3464–3475.

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.
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

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.
E-mail: vlik52@mail.ru

Крылов Сергей Борисович

НИИЖБ им. А.А. Гвоздева, АО «НИЦ «Строительство»», г. Москва, Россия,
Член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией Научно-исследовательского института бетона и железобетона им. А.А. Гвоздева.
E-mail: niizhb_lab8@mail.ru

Федоров Сергей Сергеевич

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,
кандидат технических наук, заведующий кафедрой инженерной графики и компьютерного моделирования.
E-mail: fedorovss@mgsu.ru

В.А. ЛЮБЛИНСКИЙ¹, В.С. СТРУЧКОВ¹¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

ПРОЧНОСТЬ И ПОДАТЛИВОСТЬ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТЫКОВ ПАНЕЛЬНЫХ ЗДАНИЙ ПРИ СДВИГЕ И КРУЧЕНИИ

Аннотация. При действии горизонтальной ветровой и сейсмической нагрузки в несимметричных несущих системах многоэтажных зданий возникает кручение. Причина кручения заключается в появлении эксцентриситета приложения горизонтальной нагрузки между центром масс и центром жесткостей. Вертикальные несущие элементы панельных зданий соединяются в пространственную систему различными связями сдвига. Податливость плотных сварных связей в нелинейной постановке базируется на экспериментальных данных на действие сдвигающих усилий. Принимая во внимание, что податливость зависит не только от сдвигающего воздействия, но и является функцией высоты здания, необходима полная диаграмма деформирования рассматриваемой плотной связи. Влияние крутящего воздействия на податливость плотных связей ранее не рассматривалось.

В данной работе представлена конечно-элементная модель, реализованная в программном комплексе ANSYS фрагмента панельного здания. Фрагмент здания определяется из условия проведения дальнейших экспериментальных исследований по прочности и деформативности сварного стыка, соединяющего две вертикальные несущие конструкции. Численным моделированием определено напряженно-деформированное состояние вертикального плотного стыка панельных зданий при действии сдвига и кручения. Шаговое нагружение исследуемого образца велось в вертикальной и горизонтальной плоскости. История нагружения принята в первом приближении самая простая - пропорциональная. Определена несущая способность и деформативность стыка при действии сдвига и кручения. Получены диаграммы деформирования плотного стыка. Определена предельная нагрузка, при которой соединение превращается в шарнир. Крутящее воздействие приводит к увеличению податливости плотной связи. Результаты проведенного анализа могут быть использованы при диаграммном методе расчета железобетонных конструкций панельных зданий подверженных кручению.

Ключевые слова: панельные здания, кручение, центр жесткостей, центр масс, несущая способность.

V.A. LYUBLINSKIY¹, V.S. STRUCHKOV¹¹Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), Moscow, Russia

STRENGTH AND FLEXIBILITY OF VERTICAL JOINTS OF PANEL BUILDINGS IN SHEAR AND TORSION

Abstract. Under the action of horizontal wind and seismic loads, torsion occurs in asymmetric load-bearing systems of multi-storey buildings. The reason for torsion is the appearance of an eccentricity between the center of mass and the center of rigidity of the application of a horizontal load. Vertical load-bearing elements of panel buildings are connected into a spatial system by various shear bonds. The deformability of welded butt joints in a nonlinear formulation is based on experimental data on the action of shear forces. Considering that the deformability of a shear connection depends not only on the shear force, but is also a function of all forces and stresses along the height of a multi-story building, a complete deformation diagram of the shear connections under consideration is necessary. The influence of torsional action on the deformability of shear bonds has not been previously considered.

This paper presents a finite element model realized in the ANSYS software package of a fragment of a panel building. The building fragment was determined under the condition of further experimental studies on the strength and deformability of the welded joint connecting two vertical load-bearing structures.

Numerical simulation determined the stress-strain state of a vertical dense joint of panel buildings under the action of shear and torsion. Step loading of the investigated fragment was carried out in the vertical and horizontal plane. The loading history adopted in the first approximation is the simplest – proportional. The bearing capacity and deformability of the joint under the action of shear and torsion are determined. Diagrams of the deformation of a dense joint are obtained. The ultimate load at which the joint becomes a hinge is determined. The torsional effect leads to an increase in the deformability of the dense bond. The results of the analysis can be used in the diagrammatic method of calculation of reinforced concrete structures of panel buildings subject to torsion.

Keywords: panel buildings, torsion, center of stiffness, center of mass, load capacity.

Введение

Несущие системы многоэтажных зданий в силу архитектурных и конструктивных особенностей могут проектироваться с несимметричным расположением вертикальных железобетонных конструкций. Горизонтальная ветровая и сейсмическая нагрузка приводят к возникновению кручения зданий. Горизонтальная нагрузка приложена к центру масс, а несущая система поворачивается относительно центра жесткостей [1-5]. Чем больше расстояние между центром масс и центром жесткостей, тем большее дополнительное усилие возникает в элементах жесткости вследствие поворота несущей системы. Для увеличения изгибной жесткости здания целесообразно элементы жесткости размещать максимально удаленно от центра здания, но именно в этих элементах возникают максимальные дополнительные усилия. Величину крутящего момента примерно можно определить по зависимости [2]:

$$F_{eq}^x e_x + F_{eq}^y e_y$$

где F_{eq}^x, F_{eq}^y – горизонтальная сейсмическая нагрузка по осям x и y , e_x, e_y – расстояние между центром масс и центром жесткостей по осям x и y .

Разработанные к настоящему времени нормативные документы ряда стран [6-9] содержат положения по ограничению появления кручения в несущих системах зданий. Так нормы Турции и ряда других стран ограничивают для любого ортогонального направления X или Y отношение максимального перемещения одного этажа здания к среднему значению перемещения величиной 1,2 [6]. При превышении этого значения предлагается провести перепроектирование объекта. Нормы ЕС [7] ограничивают эксцентриситет и радиус кручения, случайный эксцентриситет принимается равным 0,05 от максимального размера здания в плане, ограничивается общая гибкость здания. В КМК 2.01.03-19 [8] предлагается определять крутящий момент в зависимости от сдвигающих усилий в рассматриваемом уровне по высоте здания, расстояния между центром масс и центром жесткости здания. В отечественных нормах [9] при использовании консольной расчетной модели величина эксцентриситета между центром масс и центром жесткостей принимается равной не менее 0,1 размера здания в плане перпендикулярного действию сейсмической нагрузки. Устанавливается требование к первой и второй формам колебаний. Они также не должны быть крутильными. По сути, эффект закручивания здания ограничивается двумя способами – желательным распределением несущих конструкций в плане, уменьшающим эксцентриситет приложения горизонтальной нагрузки и ограничение периодов собственных колебаний при кручении, придание конструкции необходимых крутящих жесткостей. Значительное количество публикаций посвящено изучению жесткости зданий, влиянию проемов, оценке влияния кручения на несущие системы зданий и их элементов [10-14]. Горизонтальная нагрузка может привести близости крутильных колебаний к низшим формам колебаний. Появляются дополнительные инерционные силы. Динамическое воздействие ветра или сейсмике может создать дополнительные напряжения в несущих конструкциях здания [15, 16] и к перенапряжению торцевых периферийных элементов несущей системы. Для многих асимметричных конструкций чрезмерное кручение является основной причиной низкой сейсмостойкости. Снижение появляющегося кручения возможно за счет эффективной работы ядер жесткости в составе лестнично-лифтовых узлов, которые тоже часто располагаются асимметрично.

Пороговые значения ограничений приведенные выше требуют дополнительных подтверждающих исследований, видимо целесообразно учесть предложения [17]. Обычно используется линейно-упругий анализ при оценке крутящего воздействия. Но в железобетонных конструкциях при больших деформациях возникают пространственные трещины, изменяется жесткость и увеличивается крутящий момент. Создание модели прочности и деформируемости железобетонных конструкций под действием крутящих моментов далеко не завершено. В железобетонных конструкциях при изгибе и сжатии в поперечных сечениях конструкций может возникнуть крутящий момент, приводящий к сложному напряженно-деформированному состоянию [18, 19], которое при сейсмическом воздействии сопоставим с условиями приведенными в [20, 21]. В этих работах предложена расчетная модель комплексного сопротивления железобетонных конструкций зданий и сооружений при кручении с изгибом. Эти предложения могут быть в дальнейшем использованы в инженерной практике.

Следует заметить, что при кручении ядро-диафрагменных систем возникает депланация поперечного сечения конструкций [1], которая очевидно влияет на трещиностойкость, а далее жесткость вертикальных конструкций. Стены панельных зданий, пилоны, диафрагмы жесткости, ядра жесткости сопротивляются изгибу со стесненным кручением и соединены в пространстве связями сдвига. Связи сдвига, создающие пространственную несущую систему, работают не только в условиях некоторого одноосного напряженного состояния [22, 23], но и подвергаются дополнительному воздействию в виде кручения. В панельных зданиях увеличивается роль связей сдвига между несущими вертикальными конструкциями. Точечное значение податливости или применение диаграмм деформирования связей сдвига отражают только работу конструкций в вертикальной плоскости. Открытым остается вопрос пространственного деформирования связей при наличии кручения сдвига и кручения.

В данной работе численным моделированием была рассмотрена задача определения напряженно-деформированного состояния плотного вертикального стыка панельного здания подверженного сдвигу и кручению. В качестве объекта исследования использовалась реальная несущая конструкция стыка двух перпендикулярных панельных стен.

Модели и методы

Предполагалось рассмотреть наиболее простое плоское стыковое соединение на воздействие вертикальных усилий сдвига и горизонтального кручения для оценки податливости сдвиговых связей панельных зданий аналогично плоским образцам [24, 25]. Однако вопросы закрепления стыка в ходе экспериментальных испытаний, устойчивости испытательного образца и возможности приложения нагрузок одновременно в двух плоскостях определили пространственный вариант сопряжения панельных стен.

Выбран фрагмент крупнопанельного здания, состоящий из пересечения стен, соединенных сварными швами. В качестве связевого элемента между панелями использовалась плоская соединительная пластина. Общая высота образца составляет 55 сантиметров. Образец нагружался собственным весом, планируемой вертикальной сдвигающей нагрузкой 75 кН и двумя противоположно направленными горизонтальными силами по 5 кН вдоль оси X, имитируя эффект кручения от горизонтальной нагрузки на здание. Размер конечного элемента принимался равным 10 мм. Ввиду несколько сложной геометрии бетонных панелей и крепления закладных деталей, произведена разбивка стеновых панелей конечными элементами «тетраэдор». Металлические пластины закладной соединительной детали моделировались элементами «гексаэдор».

Для нелинейного расчета образца использовалась универсальная программная система анализа ANSYS MECHANICAL. Закладные детали замоделированы вместе со сварными швами. Испытываемый образец моделировался объемными конечными элементами типа SOLID186. Общий вид расчетной модели, а также конечно-элементная сетка представлены на рисунках 1 и 2.

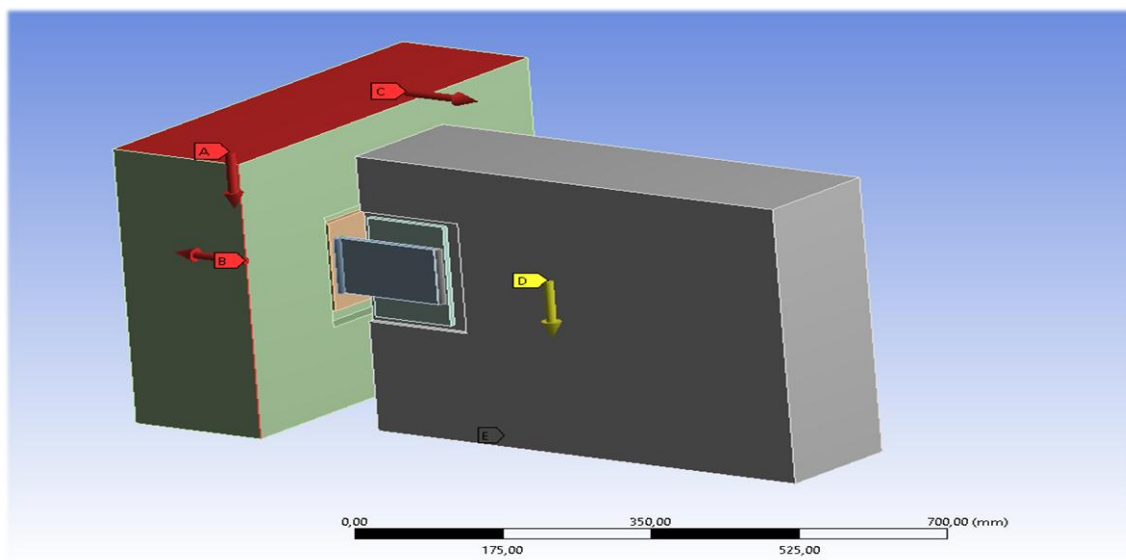


Рисунок 1 - Общий вид модели

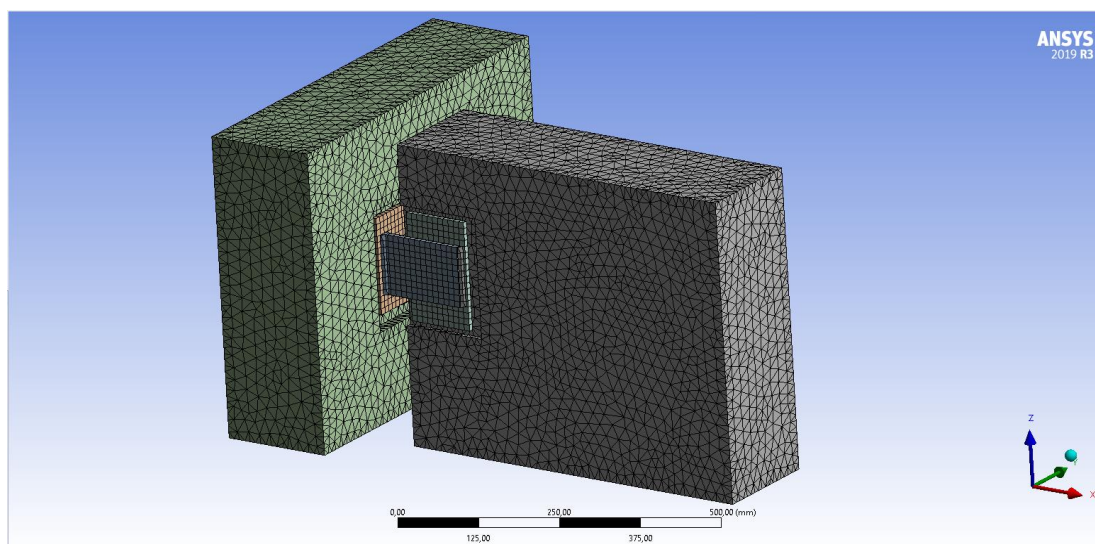


Рисунок 2 - Конечно-элементная сетка

Железобетонные панели изготовлены из тяжелого бетона класса В25 толщиной 180 мм. Металлические пластины толщиной 8 мм выполнены из стали С255 с временным нормативным сопротивлением стали R_{un} 425,4 МПа для третьего класса напряженно-деформированного состояния металла.

Предварительно рассматривалась упругая работа бетона железобетонных панелей и вследствие этого в численной модели не использовались диаграммы нелинейной работы бетона. Предполагалось, что закладные детали надежно закреплены в несущие конструкции по требованиям нормативных документов. Ожидались небольшие деформации и напряжения, возникающие в бетоне вблизи закладных деталей (что впоследствии подтвердилось по результатам численного эксперимента).

Режим нагружения принят шаговый. Использовалось 10 шагов приложения нагрузки. История нагружения в первом приближении принята самая простая – одновременное увеличение вертикальной и горизонтальной нагрузки (см. таблицу 1).

Таблица 1 – История нагружения

№ шага	Вертикальная нагрузка, Н	Горизонтальная нагрузка, Н
1	5000	500
2	12778	1000
3	20556	1500
4	28333	2000
5	36111	2500
6	43889	3000
7	51667	3500
8	59444	4000
9	67222	4500
10	75000	5000

Результаты исследования и их анализ

В результате последовательного нагружения было получено напряженно-деформированное состояние закладных деталей и в швах по десяти этапам одновременного нагружения. В рассматриваемой модели, при нагружении девятого этапа минимальные главные напряжения составили - 427,28 МПа, а максимальные главные напряжения в этот же момент времени - 422,62 МПа (см. рисунок 3, 4). По представленным данным можно сделать вывод, что при вертикальной нагрузке примерно 72,66 кН и горизонтальной 4,85 кН образовался пластический шарнир, и конструкция стыка перешла в стадию значительных деформаций.

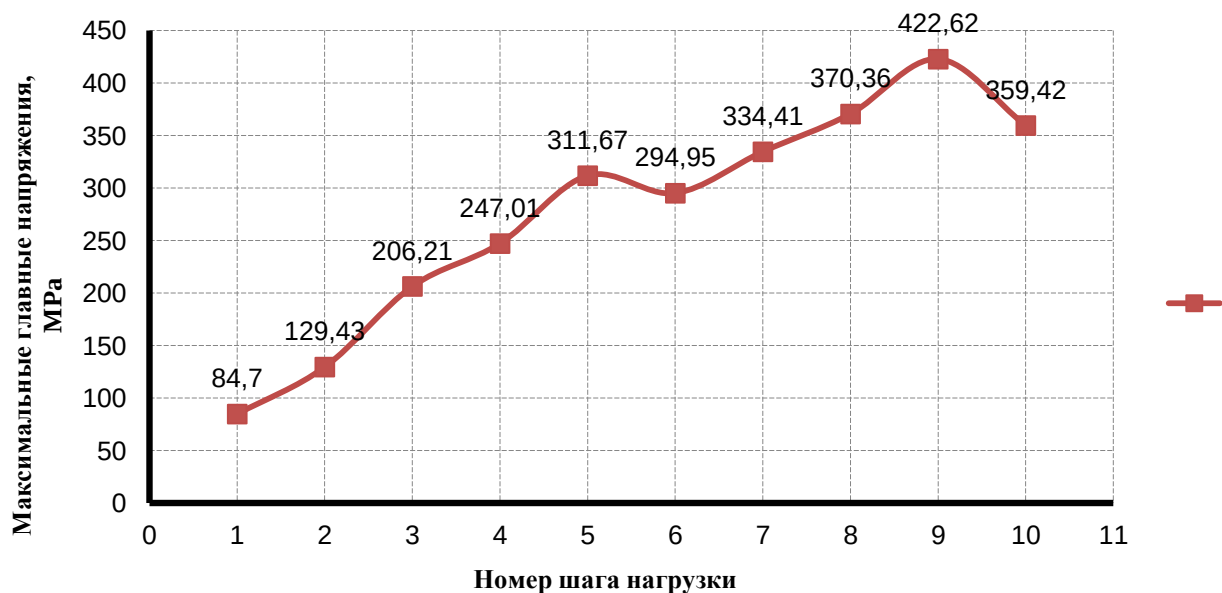


Рисунок 3 - Максимальные главные напряжения в зависимости от шага нагрузки

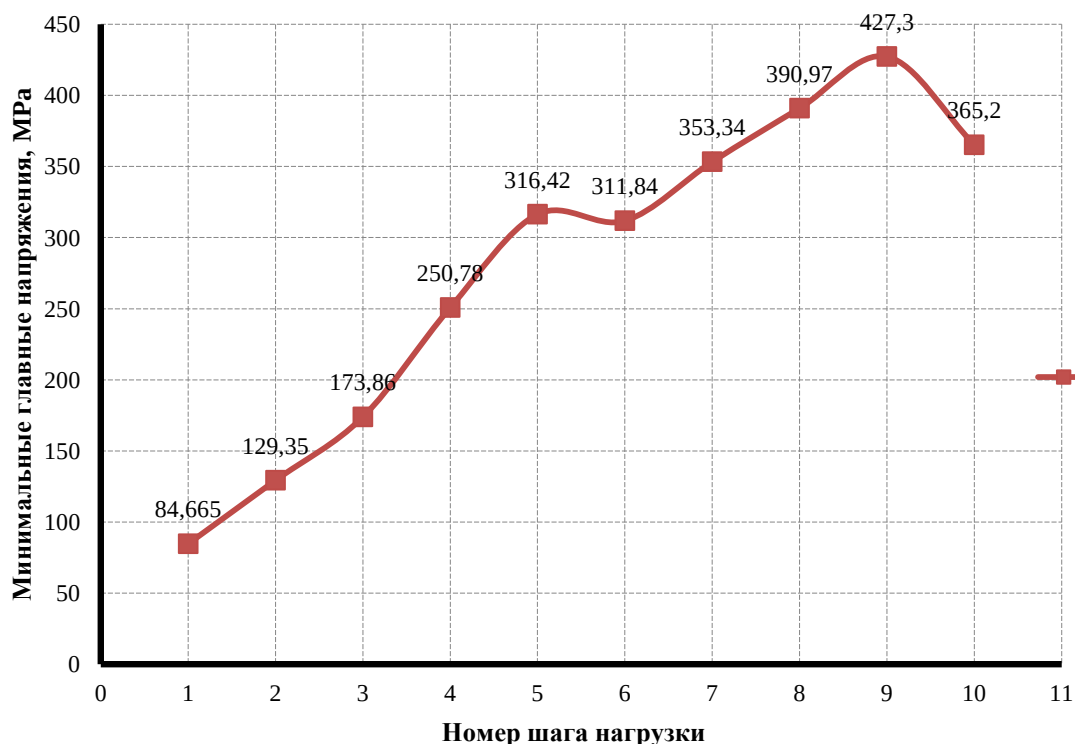


Рисунок 4 - Минимальные главные напряжения в зависимости от шага нагрузки

Получены перемещения стыка по направлениям Z и X (см. рисунок 5). Математическое описание полученных диаграмм деформирования плотного стыка при действии сдвига и кручения не производилось. Данный этап работы будет проведен после экспериментального подтверждения на натурных образцах проведенных аналитических исследований.

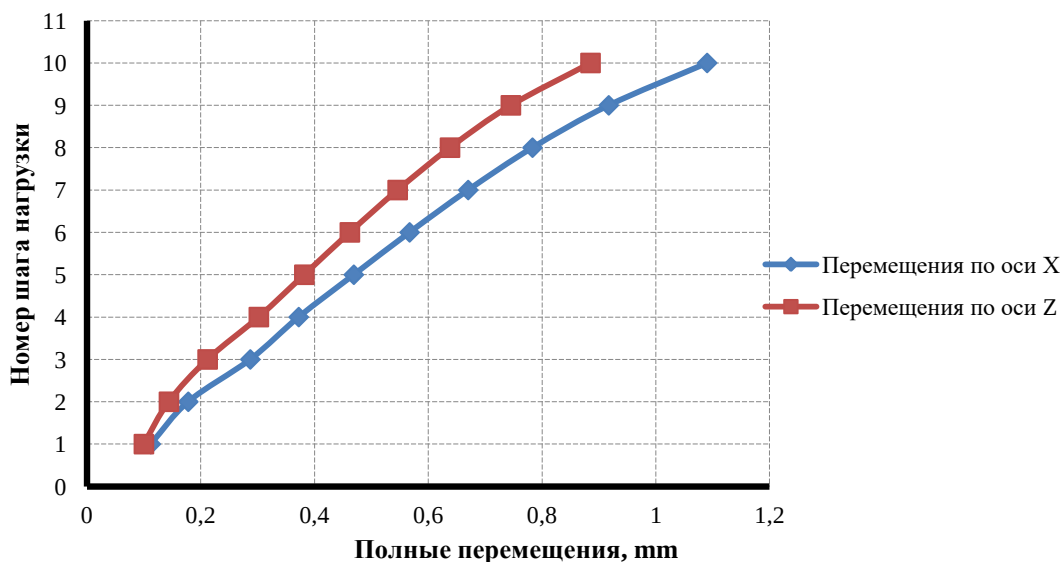


Рисунок 5 - Перемещения стыка по направлениям X и Z в зависимости от шага нагрузки

Используя данные по полученным перемещениям и крутящему моменту податливость связи на кручение в процессе нагружения изменилась с $1,78 \cdot 10^{-4}$ м/кН до $2,0378 \cdot 10^{-4}$ м/кН. Увеличение составило более 14%. Среднее значение податливости связи на сдвиг и кручение составило $1,084 \cdot 10^{-5}$ м/кН.

Выводы

На основании проведенных численных экспериментов в ANSYS MECHANICAL было получено напряженно-деформированное состояние вертикальных плотных связей сдвига для принятого режима нагружения при действии сдвига и кручения.

Установлена разрушающая нагрузка для конструкции стыка, определена деформация плотного стыка панельных зданий, определена суммарная величина податливости связи на сдвиг и кручение. Получены диаграммы деформирования связей сдвига подверженных сдвигу с кручением.

Диаграммы деформирования стыка при действии вертикального сдвига и кручения необходимые для оценки сопротивления несущих систем многоэтажных зданий горизонтальным нагрузкам нуждаются в дальнейшей верификации с натурными испытаниями образцов положенных в основу численных экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дроздов П. Ф. Конструирование и расчет несущих систем многоэтажных зданий и их элементов. М.: Стройиздат, 1977. 223 С.
2. Gokdemir H., Ozbasaran H., Dogan M., Unluoglu E., Albayrak U. Effects of torsional irregularity to structures during earthquakes // Engineering Failure Analysis. 2013. Vol. 35. Pp. 713-717. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.06.028>
3. Burgan H.I. Numerical Modeling of Structural Irregularities on Unsymmetrical Buildings // Tehnički vjesnik. 2021. Vol. 28, 3. Pp. 856-861. <https://doi.org/10.17559/TV-20200328103359>
4. Botis M., Cerbu C. A. Method for Reducing of the Overall Torsion for Reinforced Concrete Multi-Storey Irregular Structures // Applied Sciences. 2020. No. 10. 5555. <https://doi.org/10.3390/app10165555>.
5. Hussein G., Eid N., Khaled H. Torsional behavior of irregular structures during Earthquakes // Journal of Mechanical and Engineering. 2019. Vol. 16. I. 5. Ser. IV. Pp. 40-55. <https://doi.org/10.9790/1684-1605044055>.
6. TBEC 2018 Turkish Earthquake Code: Specifications for building design under earthquake effects. Ankara, Turkey.
7. EN 1998-1:2004 Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/02/en.1998.1.2004.pdf>
8. СП КМК 2.01.03-19 Строительство в сейсмических районах. https://shank_uz/wp-content/uploads/2021/07/shank_2.01.03-19
9. СП 14.13330.2018 Строительство в сейсмических районах. <https://docs.cntd.ru/document/550565571>
10. Khatiwada P., Lumantarna E. Simplified Method of Determining Torsional Stability of the Multi-Storey Reinforced Concrete Buildings // Civil Engineering. 2021. No. 2. Pp. 290-308.
11. Dimova S.L., Alashki I. Seismic design of symmetric structures for accidental torsion // Bull. Earthquake Eng. 2003. No. 1. Pp. 303–320.
12. Manish J., Syed Z.I. Seismic analysis of torsional irregularity in multi-storey symmetric and asymmetric buildings // Eurasian J. Anal. Chem. 2017. No. 13. Pp. 286–292.
13. Cando M.A., Hube M.A., Parra P.F., Arteta C.A. Effect of stiffness on the seismic performance of code-conforming reinforced concrete shear wall build //Engineering Structures. 2020. V. 219, 110724. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110724>.
14. Varma V., Kumar U. Seismic response on multi-storied building having shear walls with and without openings // Materials Today: Proceedings. 2021. Vol. 37. Part 2. Pp. 801-805, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.827>.
15. Naresh Kumar B.G., Punith N., Bhyrav R.B., Arpitha T.P. Assessment of location of centre of mass and centre of rigidity for different setback buildings // Int. J. Eng. Res. Technol. (IJERT). 2017. Vol. 6. Pp. 801-804.
16. Ankur J., Mitesh S. Floor displacement-based torsional amplification factors for seismic design of acceleration-sensitive non-structural components in torsionally irregular RC buildings. Vol. 254, 12022, 113871. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.113871>.
17. Перельмутер А.В., Кабанцев О.В. О концептуальных положениях норм сейсмостойкого строительства // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 12. С. 1673-1884.
18. Колчунов В.И., Демьянов А. И., Протченко М.В. Моменты в железобетонных конструкциях при изгибе с кручением // Строительство и реконструкция. 2021. № 3. С. 27-46. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2021-95-3-27-46>.
19. Карпенко Н., Колчунов Вл., Колчунов В., Травуш В. Расчетная модель сложноподвинутого железобетонного элемента при кручении с изгибом // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2021. № 17(1). С. 34–47. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2021-17-1-34-47>.

20. Тамразян А.Г. Оценка риска и надежности несущих конструкций и ключевых элементов — необходимое условие безопасности зданий и сооружений // Вестник ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко «Исследования по теории сооружений». 2009. № 1. С. 160–171.
21. Травуш В.И., Колчунов В.И., Ключева Н. В. Некоторые направления развития теории живучести конструктивных систем зданий и сооружений // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 3. С. 4-11.
22. Lyublinskiy V., Struchkov V. Resistance of Vertical Joints During Torsion of Multistorey Buildings. In: Akimov P., Vatin N., Tusnin A., Doroshenko A. (eds) Proceedings of FORM. 2022. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 282. Springer, Cham. (2022). <https://doi.org/10.1007/978-3-031-10853-238>.
23. Люблинский В.А. О кручении несущих систем многоэтажных зданий // Железобетонные конструкции. 2023. Т. 1. № 1. С. 37-45. doi:10.22227/2949-1622.2023.1.37-45
24. Люблинский В.А., Томина М.В. Экспериментальное исследование прочности и податливости вертикального сварного стыка // Системы Технологии. Методы. 2018. № 3 (39). С.154–158.
25. Люблинский В.А. Испытания вертикальных сварных стыковых соединений панельных зданий // Строительство и реконструкция. 2019. № 5. С. 17-22. doi:10.33979/2073-7416-2019-85-5-17-22.

REFERENCES

1. Drozdov P.F. Design and Calculation of Load-bearing Systems of Multi-storey Buildings and their Elements. Moscow: Stroyizdat, 1977. 223 p. (rus)
2. Gokdemir H., Ozbasaran H., Dogan M., Unluoglu E., Albayrak U. Effects of torsional irregularity to structures during earthquakes. *Engineering Failure Analysis*. 2013. Vol. 35. Pp. 713-717. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.06.028>
3. Burgan H.I. Numerical Modeling of Structural Irregularities on Unsymmetrical Buildings. *Tehnički vjesnik*. 2021. Vol. 28, 3. Pp. 856-861 <https://doi.org/10.17559/TV-20200328103359>
4. Botis M., Cerbu C.A. Method for Reducing of the Overall Torsion for Reinforced Concrete Multi-Storey Irregular Structures. *Applied Sciences*. 2020. No. 10. 5555. <https://doi.org/10.3390/app10165555>.
5. Hussein G., Eid N., Khaled H. Torsional behavior of irregular structures during Earthquakes. *Journal of Mechanical and Engineering*. 2019. Vol. 16. I. 5. Ser. IV. Pp. 40-55. <https://doi.org/10.9790/1684-1605044055>.
6. TBEC 2018 Turkish Earthquake Code: Specifications for building design under earthquake effects. Ankara, Turkey.
7. EN 1998-1:2004 Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/02/en.1998.1.2004.pdf>
8. Uzbekistan Standards KMK 2.01.03-19 Construction in seismic regions. https://shank_uz/wp-content/uploads/2021/07/shank_2.01.03-19
9. SP 14.13330.2018 Construction in seismic regions. <https://docs.cntd.ru/document/550565571>
10. Khatiwada P., Lumantarna E. Simplified Method of Determining Torsional Stability of the Multi-Storey Reinforced Concrete Buildings. *Civil Engineering*. 2021. No. 2. Pp. 290-308.
11. Dimova S.L., Alashki I. Seismic design of symmetric structures for accidental torsion. *Bull. Earthquake Eng.* 2003. No. 1. Pp. 303–320.
12. Manish 2, Syed Z.I. Seismic analysis of torsional irregularity in multi-storey symmetric and asymmetric buildings. *Eurasian J. Anal. Chem.* 2017. No. 13. Pp. 286–292.
13. Cando M.A., Hube M.A., Parra P.F., Arteta C.A. Effect of stiffness on the seismic performance of code-conforming reinforced concrete shear wall build. *Engineering Structures*. 2020. V. 219, 110724. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110724>.
14. Varma V., Kumar U. Seismic response on multi-storied building having shear walls with and without openings. *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 37. Part 2. Pp. 801-805. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.827>.
15. Naresh Kumar B.G., Punith N., Bhyrav R.B., Arpitha T.P. Assessment of location of centre of mass and centre of rigidity for different setback buildings. *Int. J. Eng. Res. Technol. (IJERT)*. 2017. Vol. 6. Pp. 801-804.
16. Ankur J., Mitesh S. Floor displacement-based torsional amplification factors for seismic design of acceleration-sensitive non-structural components in torsionally irregular RC buildings. Vol. 254, 12022, 113871. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.113871>.
17. Perelmuter A.V., Kabantsev O.V. On conceptual provisions of design standards for earthquake resistant construction. *Vestnik MGSU*. 2020. No. 15 (12). Pp. 1673–1684. (rus)
18. Kolchunov V.I., Demyanov A.I., Protchenko M.V. Moments in reinforced concrete structures under bending with torsion. *Building and Reconstruction*. 2021. No. 3. Pp. 27-46. (rus) <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2021-95-3-27-46>
19. Karpenko I, Kolchunov V.I., Kolchunov V., Travush V. Calculation model of a complex stressed reinforced concrete element under torsion with bending. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2021. No. 17(1). Pp. 34–47. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2021-17-1-34-47>.

20. Tamrazyan A.G. An assessment of the risk and reliability of load-bearing structures and key elements is a necessary condition for the safety of buildings and structures. *Bulletin TSNIISK them. V.A. Kucherenko «Studies in the theory of structures»*. 2009. No. 1. Pp. 160-171. (rus)
21. Travush V.I., Kolchunov V.I., Klyueva N.V. Some directions of development of survivability theory of structural systems of buildings and structures. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel 'stvo [Industrial and Civil Engineering]*. 2015. No. 3. Pp. 4–11. (rus)
22. Lyublinskiy V., Struchkov V. Resistance of Vertical Joints During Torsion of Multistorey Buildings. In: Akimov P., Vatin N., Tusnin A., Doroshenko A. (eds) *Proceedings of FORM. 2022. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 282. Springer, Cham. (2022). <https://doi.org/10.1007/978-3-031-10853-238>.
23. Lyublinskiy V.A. On the torsion of asymmetric bearing systems of multi-storey buildings. *Reinforced concrete structures*. 2023. No. 1(1). Pp. 37-45. doi:10.22227/2949-1622.2023.1.37-45
24. Lyublinskiy V.A., Tomina M.V. Experimental study of the strength and suppleness of a vertical welded joint. *System Technology Methods*. 2018. No. 3(39). Pp. 154–158.
25. Lyublinskiy V.A. Tests of vertical welded butt joints of panel buildings. *Building and Reconstruction*. 2019. No. 5. Pp. 17-22. doi:10.33979/2073-7416-2019-85-5-17-22

Информация об авторах:

Люблинский Валерий Аркадьевич

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия, кандидат технических наук, профессор кафедры железобетонных и каменных конструкций.

E-mail: LyublinskiyVA@mgsu.ru

Стручков Владислав Сергеевич

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия, аспирант кафедры железобетонных и каменных конструкций.

E-mail: struchkov2018@gmail.com

Information about authors:

Lyublinskiy Valery Ar.

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), Moscow, Russia, candidate of technical science, professor of the department of Reinforced Concrete and Masonry Structures.

E-mail: LyublinskiyVA@mgsu.ru

Struchkov Vladislav S.

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), Moscow, Russia, postgraduate of the department of Reinforced Concrete and Masonry Structures.

E-mail: struchkov2018@gmail.com

С.И. МЕРКУЛОВ¹, С.О. КАШУБА², С.М. ЕСИПОВ²¹ФГБОУ ВО «Курский государственный университет», г. Курск, Россия²ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»,
г. Белгород, Россия

ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ВНЕШНИМ АРМИРОВАНИЕМ КОМПОЗИТНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ ПРИ ИЗГИБЕ С КРУЧЕНИЕМ

Аннотация. Внешнее армирование железобетонных конструкций композитными материалами успешно применяется при усилении поврежденных элементов. При этом кручение с изгибом таких железобетонных конструкций мало изучено и требует проведения экспериментально-теоретического исследования. В научной литературе представлены результаты исследования прочности и деформативности при изгибе с кручением железобетонных элементов различной формы сечения при статическом и при динамическом действиях нагрузок, элементов составного сечения. Для железобетонных конструкций, усиленных внешним армированием композитными материалами, такие исследования выполнялись лишь для изгибаемых элементов. Авторами разработана программа и методика экспериментальных исследований таких конструкций. Результаты экспериментальных исследований по предлагаемой методике позволят проверить предполагаемую расчетную модель, положенные в ее основу рабочие предпосылки и выявить закономерности деформирования железобетонных конструкций с внешним композитным армированием при сопротивлении изгибу с кручением.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, внешнее армирование, композитный материал, кручение с изгибом, экспериментальная установка.

S.I. MERKULOV¹, S.O. KASHUBA², S.M. ESIPOV²¹Kursk State University, Kursk, Russia²Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia

PROGRAM AND METHODOLOGY OF EXPERIMENTAL STUDIES OF REINFORCED CONCRETE ELEMENTS WITH EXTERNAL REINFORCEMENT WITH COMPOSITE MATERIALS IN BENDING WITH TORSION

Abstract. External reinforcement of reinforced concrete structures with composite materials is successfully used for strengthening of damaged elements. At the same time, torsion with bending of such reinforced concrete structures is poorly studied and requires experimental and theoretical investigation. The scientific literature presents the results of the study of strength and deformability in bending with torsion of reinforced concrete elements of different cross-sectional shapes under static and dynamic loads, elements of composite cross-section. For reinforced concrete structures strengthened with external reinforcement by composite materials, such studies were carried out only for bending elements. The authors have developed a program and methodology of experimental studies of such structures. The results of experimental investigations according to the proposed methodology will allow us to verify the assumed design model, the working assumptions put in its basis and reveal the regularities of deformation of reinforced concrete structures with external composite reinforcement under bending with torsion.

Keywords: reinforced concrete structures, external reinforcement, composite material, torsion with bending, experimental installation.

Введение

В современной практике строительства все чаще встречаются сложные очертания строительных конструкций, требующие особого подхода к проектированию и конструированию. Для достижения всех требований безопасной эксплуатации зданий и сооружений, при экономической обоснованности и эффективности, необходимо применение самых современных методик проектирования.

Частью жизненного цикла любого здания или сооружения является реконструкция. В процессе восстановления или перевооружения объекта капитального строительства может быть изменена расчетная схема здания в целом, что повлечет за собой изменение принципов работы его отдельных конструкций, например появление эксцентриситета в центрально нагруженных колоннах или возникновение кручения в изгибаемых элементах. Даже без изменения расчетной схемы, при реконструкции отдельные элементы здания требуют увеличения несущей способности с обоснованным подходом к технико-экономическим показателям.

Внешнее армирование железобетонных конструкций композитными материалами успешно применяется при усилении поврежденных элементов, такие технические решения имеют малые геометрические размеры, и просты в технологии производства работ [1-2]. Наряду с усилением сжатых и изгибаемых элементов возникает необходимость усиления и при более сложных напряженных состояниях, в частности, при изгибе с кручением. В действующих нормативных документах отсутствуют разработанные указания по проектированию усиления железобетонных конструкций при совместном действии изгибающего и крутящего моментов. К настоящему времени выполнены работы по изучению прочности и деформативности изгибаемых железобетонных элементов при усилении внешним армированием композитными материалами [3-7].

Поэтому представляется актуальным проведение экспериментальных и теоретических исследований сопротивления железобетонных конструкций, усиленных композитными материалами, при изгибе с кручением.

Конструкции экспериментальных балок

Кручение с изгибом железобетонных конструкций является мало изученной областью, что требует проведения экспериментально-теоретического изучения данного класса конструкций. Выполнены исследования прочности и деформативности при изгибе с кручением железобетонных элементов различной формы сечения при статическом и при динамическом действиях нагрузок, элементов составного сечения, а также предложены расчетные модели силового сопротивления [8-13].

Для решения вопросов проектирования усиления железобетонных конструкций внешним армированием композитным материалом выполнены исследования изгибаемых элементов [7, 14-15]. Установлено, что на напряженно-деформированное состояние железобетонных конструкций, усиленных композитными материалами, большое влияние оказывает сцепление между бетоном усиливаемой конструкции и композитом усиления [16-17]. Однако на сегодняшний день отсутствуют теоретические и экспериментальные исследования усиленных железобетонных конструкций при изгибе с кручением [18].

Авторами разработана программа и методика экспериментальных исследований. Объем и основные параметры экспериментальных конструкций приведены в таблице 1. Задачами экспериментальных исследований является: разработка методики эксперимента испытаний железобетонного элемента, усиленного внешним композитным армированием, проведение эксперимента, анализ полученных результатов. Полученные результаты позволят проверить предполагаемую расчетную модель, положенные в ее основу рабочих предположений и выявления закономерностей деформирования железобетонных конструкций с внешним композитным армированием при сопротивлении изгибу с кручением.

Программа экспериментального исследования включает в себя испытание железобетонных конструкций с внешним композитным армированием балочного типа. Конструкции предполагают изготовление в заводских условиях по чертежам (рисунок 1) из тяжелого бетона класса В20, с основным армированием стержневой арматурой $\varnothing 10$ А500 по ГОСТ 34028-2016 и хомутами из стержневой арматуры $\varnothing 6$ А240 по ГОСТ 34028-2016, внешнее композитное армирование из холстов FibArm Tape 430/150, приклеенных к телу бетона двухкомпонентным составом на основе эпоксидных смол WallWrap Resin 535. Количество испытываемых конструкций принято с учетом варьирования способов и моментов нанесения внешнего композитного армирования. Конструкция опытных образцов приведена на рисунке 1.

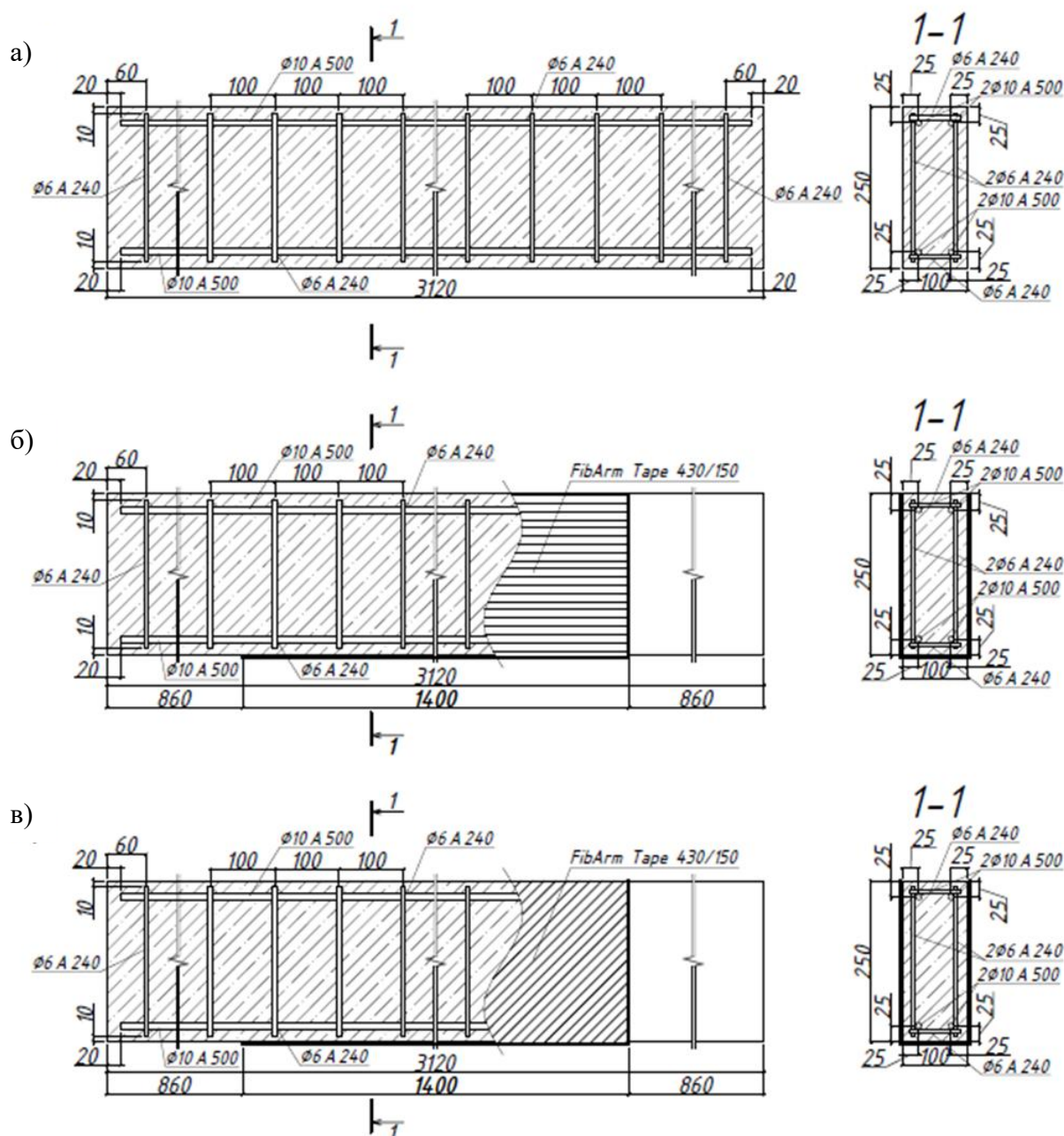


Рисунок 1 – Конструкции балок серии Б0-0 (а); Б1-1, Б1-2, Б1-3 (б); Б2-1, Б2-2, Б2-3 (в)

Таблица 1 – Объем и основные параметры экспериментальных конструкций

Серия образца	h, мм	b, мм	L, мм	Вариант исполнения внешнего композитного армирования	Момент нанесения внешнего композитного армирования
Б0-0	250	100	3120	- (рисунок 1 а)	-
Б1-1				U-образная обойма с волокнами, расположенными вдоль продольной оси балки (рисунок 1 б)	25% $R_{кр}$
Б1-2					50% $R_{кр}$
Б1-3					70% $R_{кр}$
Б2-1				U-образная обойма с волокнами, расположенными под углом 45° к продольной оси балки, перпендикулярно пространственной трещине (рисунок 1 в)	25% $R_{кр}$
Б2-2					50% $R_{кр}$
Б2-3					70% $R_{кр}$

Методика испытания

Схема испытаний опытных образцов приведена на рисунке 2. Для достоверности результатов необходимо ступенчатое нагружение образцов с шагом 5% от $R_{кр}$ и выдерживанием не менее 5 минут паузы после каждого этапа нагружения. $R_{кр}$ определяется экспериментально, путем доведения эталонных балок (Б0-0) до разрушения, предварительно рассчитанная разрушающая нагрузка балок без усиления составляет 16 кН.

Балки Б1-1 и Б2-1 нагружаются до 25% $R_{кр}$, после чего усиливаются внешним композитным армированием и доводятся до разрушения. Балки Б1-2 и Б2-2 нагружаются до 50% $R_{кр}$, после чего усиливаются внешним композитным армированием и доводятся до разрушения. Балки Б1-3 и Б2-3 нагружаются до 70% $R_{кр}$, после чего усиливаются внешним композитным армированием и доводятся до разрушения.

В пролете между приложенными силами возникает изгибающий момент, который в 2,5 раза больше крутящего момента, данное соотношение обусловлено расчетом, для разрушения балки по пространственному сечению.

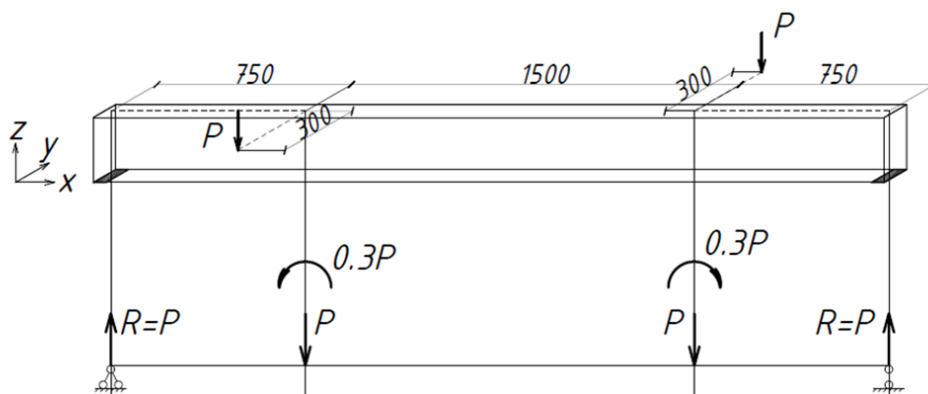


Рисунок 2 – Схема испытаний опытных образцов на изгиб с кручением

Для определения прогиба балки в середине пролёта будет установлен индикатор часового типа (рисунок 3 а). При определении угла закручивания балки в местах приложения силы, над опорами и в середине пролёта, будут установлены инклинометры (рисунок 4).

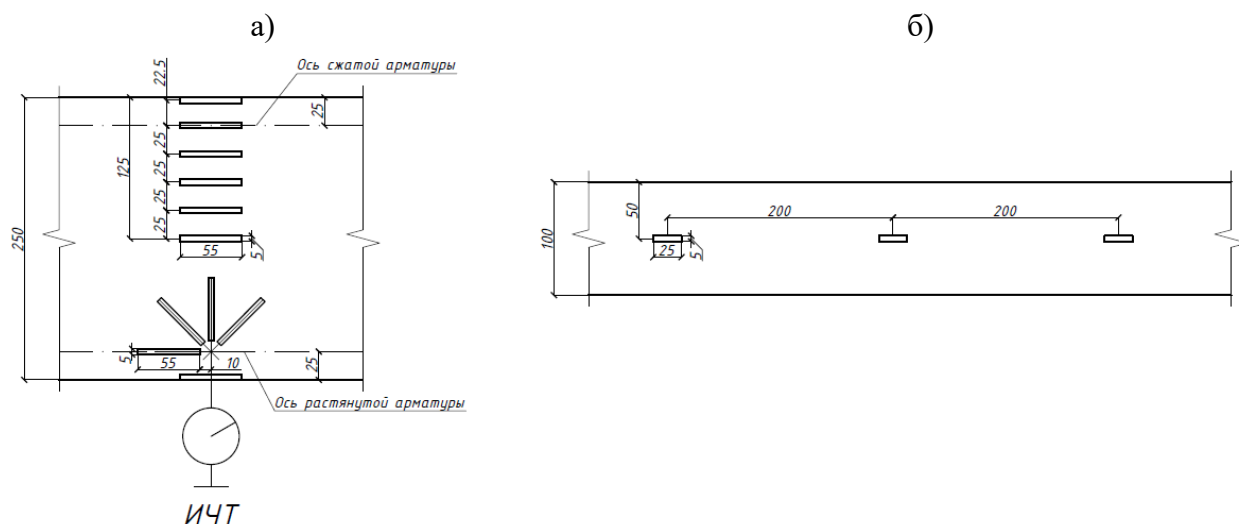


Рисунок 3 – Схема расстановки электротензорезисторов на боковой грани (а), на нижней грани (б)

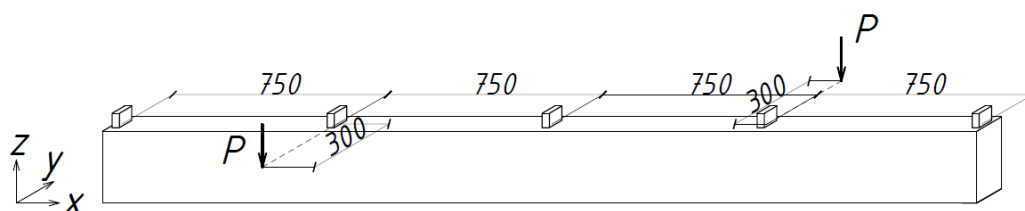


Рисунок 4 – Схема расстановки инклинометров

Для определения напряжения в теле бетона в середине пролета образца будут установлены электротензорезисторы, расположенные с двух сторон балки, в сжатой зоне, для определения ее высоты, параллельно друг другу с шагом 25 мм, в растянутой зоне под углом 45° друг к другу (рисунок 3 а). Установка датчиков будет произведена на бетон. Для определения качества сцепление между бетоном усиливаемой конструкции и композитом усиления на растянутой грани будут установлены на бетон и композит парные электротензорезисторы с шагом 200 мм (рисунок 3 б).

Заключение

1. Предложены конструктивные решения железобетонных балок, усиленных U-образной обоймой из холстов композитного материала FibArm Tape 430/150 с волокнами, расположенными вдоль продольной оси (1) и под углом 45° (2) к продольной оси балки.

2. Разработана методика экспериментальных исследований работы железобетонных элементов с внешним армированием композитными материалами при изгибе с кручением, которая позволяет выявить характер напряженно-деформированного состояния таких элементов и проверить принятые теоретические основы работы исследуемых конструкций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Меркулов С.И., Есипов С.М., Есипова Д.В. Композитные системы внешнего армирования железобетонных конструкций // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2022. № 4. С. 39-48. doi:10.34031/2071-7318-2021-7-4-39-48. EDN HMWONY.
2. Римшин В.И., Меркулов С.И., Есипов С.М. Бетонные конструкции, усиленные композитным материалом // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2018. № 2(35). С. 93-100. doi:10.5281/zenodo.1286034. EDN USTLHE.
3. Меркулов С.И., Есипов С.М. Использование тканых композитов для восстановления строительных // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2019. № 3(381). С. 256-259. EDN KWLBP.

4. Есипов С.М., Меркулов С.И. Усиление железобетонных элементов внешним армированием. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2023. 179 с. ISBN 978-5-361-00890-2. EDN AZCHQU.
5. Бадалова Е.Н. Усиление изгибаемых железобетонных конструкций углепластиковой арматурой // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F: Прикладные науки. Строительство. 2007. № 6. С. 54-59. EDN XDDHSP.
6. Параничева Н.В., Назмеева Т.В. Усиление строительных конструкций с помощью углеродных композиционных материалов // Инженерно-строительный журнал. 2010. № 2(12). С. 19-22. EDN MZJCWT.
7. Бокарев С.А., Смердов Д.Н. Экспериментальные исследования изгибаемых железобетонных элементов, усиленных композитными материалами // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2010. № 2(614). С. 112-124. EDN OZHSPD.
8. Колчунов В.И., Сальников А.С. Экспериментальные исследования трещинообразования железобетонных конструкций при кручении с изгибом // Строительство и реконструкция. 2016. № 3(65). С. 24-32. EDN WFGVSH.
9. Меркулов Д.С. К выбору расчетной модели силового сопротивления железобетонных элементов при изгибе с кручением // Промышленное и гражданское строительство. 2009. № 10. С. 46-48. EDN KWNHQP.
10. Демьянов А.И., Сальников А.С., Колчунов В.И. Экспериментальные исследования железобетонных конструкций при кручении с изгибом и анализ их результатов // Строительство и реконструкция. 2017. № 4(72). С. 17-26. EDN ZHNNHB.
11. Результаты экспериментальных исследований конструкций квадратного и коробчатого сечений из высокопрочного бетона при кручении с изгибом / В.И. Травуш, Н.И. Карпенко, В.И. Колчунов [и др.] // Строительство и реконструкция. 2018. № 6(80). С. 32-43. EDN VQNSNS.
12. Меркулов С.И., Стародубцев С.В. Экспериментальные исследования стержневых железобетонных элементов составного сечения, подвергнутых изгибу с кручением // Строительство и реконструкция. 2012. № 2(40). С. 20-24. EDN OZMBZH.
13. Родевич В.В., Арзамасцев С.А. Экспериментальные исследования железобетонных элементов, работающих на изгиб с кручением, при статическом и кратковременном динамическом воздействиях // Жилищное строительство. 2014. № 10. С. 15-18. EDN STWXON.
14. Дронов А.В., Дрокин С.В., Фролов Н.В. Экспериментальное исследование сцепления стеклопластиковой арматуры с бетоном // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 11. С. 80-83. EDN XACMZR.
15. Юшин А.В., Морозов В.И. Экспериментальные исследования двухпролетных железобетонных балок, усиленных композитными материалами по наклонному сечению // Вестник гражданских инженеров. 2014. № 5(46). С. 50-57. EDN TBPWWF.
16. Merkulov S.I., Esipov S.M., Esipova D.V. Computer Simulation of Bent Reinforced Concrete Elements with External Composite Reinforcement // Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 151 LNCE. Pp. 153-159. doi:10.1007/978-3-030-72910-3_22. EDN KYOWIG.
17. Modeling of the Stress-Strain State of a Composite External Strengthening of Reinforced Concrete Bending Elements / S.I. Merkulov, V.I. Rimshin, I.L. Shubin, S.M. Esipov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Science and Technology Conference "FarEastCon 2019". Vladivostok, Russky Island, 01–04 октября 2019 года. Vol. 753, 5, Chapter 4. – Vladivostok, Russky Island: Institute of Physics Publishing, 2020. Pp. 052044. doi:10.1088/1757-899X/753/5/052044. EDN ZPVTEJ.
18. Меркулов С.И., Есипов С.М., Кашуба С.О. Предварительное описание работы железобетонных элементов с внешним армированием композитными материалами при изгибе с кручением // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2022. № 11. С. 40-48. doi:10.34031/2071-7318-2022-7-11-40-48. – EDN EFOFCS.

REFERENCES

1. Merkulov S.I., Esipov S.M., Esipova D.V. Kompozitnye sistemy vneshnego armirovaniia zhelezobetonnykh konstruksii [Composite systems for external reinforcement of reinforced concrete structures]. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2022. No. 4. Pp. 39-48. doi:10.34031/2071-7318-2021-7-4-39-48. EDN HMWONY. (rus)

2. Rimshin V.I., Merkulov S.I., Esipov S.M. Betonnye konstruksii, usilennye kompozitnym materialom [Concrete structures strengthened with composite material]. *Vestnik Inzhenernoi shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta*. 2018. No. 2(35). Pp. 93-100. doi:10.5281/zenodo.1286034. EDN USTLHE (rus)
3. Merkulov S.I., Esipov S.M. Ispol'zovanie tkanykh kompozitov dlia vosstanovleniia stroitel'nykh konstruksii [The use of woven composites for the recovery of building structures]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2019. No. 3(381). Pp. 256-259. EDN KWLBPI. (rus)
4. Esipov S.M., Merkulov S.I. Usilenie zhelezobetonnykh elementov vneshnim armirovaniem [Strengthening of reinforced concrete elements by external reinforcement]. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2023. 179 p. ISBN 978-5-361-00890-2. EDN AZCHQU. (rus)
5. Badalova E.N. Usilenie izgibaemykh zhelezobetonnykh konstruksii ugleplastikovoii armaturoi [Strengthening of bending reinforced concrete structures with carbon fiber reinforcement]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F. Prikladnye nauki. Stroitel'stvo*. 2007. No. 6. Pp. 54-59. EDN XDDHSP. (rus)
9. Merkulov D.S. K vyboru raschetnoi modeli silovogo soprotivleniia zhelezobetonnykh elementov pri izgibe s krucheniiem [To the choice of the design model of the force resistance of reinforced concrete elements during bending with torsion]. *Industrial and civil engineering*. 2009. No. 10. Pp. 46-48. EDN KWNHQP. (rus)
10. Dem'ianov A.I., Sal'nikov A.S., Kolchunov V.I. Eksperimental'nye issledovaniia zhelezobetonnykh konstruksii pri kruchenii s izgibom i analiz ikh rezul'tatov [Experimental studies of reinforced concrete structures in torsion with bending and analysis of their results]. *Building and reconstruction*. 2017. No. 4(72). Pp. 17-26. EDN ZHHHHB. (rus)
11. Rezul'taty eksperimental'nykh issledovanii konstruksii kvadratnogo i korobchatogo sechenii iz vysokoprochnogo betona pri kruchenii s izgibom [Results of experimental studies of square and box-shaped cross-section structures made of high-strength concrete during torsion with bending]. V.I. Travush, N.I. Karpenko, V.I. Kolchunov [and others]. *Building and reconstruction*. 2018. No. 6(80). Pp. 32-43. EDN VQNSNS. (rus)
12. Merkulov S.I., Starodubtsev S.V. Eksperimental'nye issledovaniia sterzhnevnykh zhelezobetonnykh elementov sostavnogo secheniia, podvergnutykh izgibu s krucheniiem [Experimental studies of rod reinforced concrete elements of composite section subjected to bending with torsion]. *Building and reconstruction*. 2012. No. 2(40). Pp. 20-24. EDN OZMBZH. (rus)
13. Rodevich V.V., Arzamastsev S.A. Eksperimental'nye issledovaniia zhelezobetonnykh elementov, rabotaiushchikh na izgib s krucheniiem, pri staticheskom i kratkovremennom dinamicheskom vozdeistviiakh [Experimental studies of reinforced concrete elements working on bending with torsion under static and short-term dynamic influences]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo*. 2014. No. 10. Pp. 15-18. EDN STWXON. (rus)
14. Dronov A.V., Drokin S.V., Frolov N.V. Eksperimental'noe issledovanie stsepleniia stekloplastikovoii armatury s betonom [Experimental study of the adhesion of fiberglass reinforcement with concrete]. *Industrial and civil engineering*. 2016. No. 11. Pp. 80-83. EDN XACMZR. (rus)
15. Iushin A.V., Morozov V.I. Eksperimental'nye issledovaniia dvukhproletnykh zhelezobetonnykh balok, usilennykh kompozitnymi materialami po naklonnomu secheniiu [Experimental studies of two-span reinforced concrete beams strengthened with composite materials along an inclined section]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2014. No. 5(46). Pp. 50-57. EDN TBPWWF. (rus)
16. Merkulov S.I., Esipov S.M., Esipova D.V. Computer Simulation of Bent Reinforced Concrete Elements with External Composite Reinforcement. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021. Vol. 151 LNCE. P. 153-159. doi:10.1007/978-3-030-72910-3_22. EDN KYOWIG.
17. Modeling of the Stress-Strain State of a Composite External Strengthening of Reinforced Concrete Bending Elements / S.I. Merkulov, V.I. Rimshin, I.L. Shubin, S.M. Esipov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Science and Technology Conference "FarEastCon 2019"*, Vladivostok, Russky Island, 01–04 oktyabrya 2019 goda. Vol. 753, 5, Chapter 4. – Vladivostok, Russky Island: Institute of Physics Publishing, 2020. Pp. 052044. doi:10.1088/1757-899X/753/5/052044. EDN ZPVTEJ.
18. Merkulov S.I., Esipov S.M., Kashuba S.O. Predvaritel'noe opisanie raboty zhelezobetonnykh elementov s vneshnim armirovaniem kompozitnymi materialami pri izgibe s krucheniiem [Preliminary description of the work of reinforced concrete elements with external reinforcement with composite materials during bending with torsion]. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2022. No. 11. Pp. 40-48. doi:10.34031/2071-7318-2022-7-11-40-48. EDN EFOFCS. (rus)

Информация об авторах:

Меркулов Сергей Иванович

ФГБОУ ВО «Курский государственный университет», г. Курск, Россия,
член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой промышленного и гражданского строительства.
E-mail: mrsi.dom@yandex.ru

Кашуба Сергей Олегович

ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», г. Белгород, Россия,
аспирант кафедры строительства и городского хозяйства.
E-mail: kashuba_sergey@mail.ru

Есипов Станислав Максимович

ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», г. Белгород, Россия,
кандидат технических наук, доцент кафедры строительства и городского хозяйства.
E-mail: sk31.sm@gmail.com

Information about authors:

Merkulov Sergei Iv.

Kursk State University, Kursk, Russia,
corresponding Member of the RAACS, doctor of technical sciences, professor, head of the department of Industrial and Civil Engineering.
E-mail: mrsi.dom@yandex.ru

Kashuba Sergei Ol.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia,
graduate student of the department of Construction and Urban Economy.
E-mail: kashuba_sergey@mail.ru

Esipov Stanislav M.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia,
candidate of technical sciences, associate professor of the department of Construction and Urban Economy.
E-mail: sk31.sm@gmail.com

Н.Н. ALZAMILI¹, А.М. ELSHEIKH^{1,2}

¹Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russia

²Mansoura University, Mansoura, Egypt

NUMERICAL STUDY OF THE BEHAVIOR OF RC BEAM AT HIGH TEMPERATURES

Abstract. The numerical study focuses on analyzing the structural response of reinforced concrete (RC) beams at high temperatures. Gaining more insight into the behavior of reinforced concrete (RC) structures at high temperatures and the material properties of steel reinforcement and concrete are the main goals of this research. To conduct this analysis, finite element analysis (FEA) using the ABAQUS software package is adopted. FEA allows for the simulation of the behavior of the RC beam under fire by inputting relevant parameters, such as material properties, dimensions, and temperature. The program calculates the temperature distribution within the structure and predicts the resulting structural responses. Two phases are applied: before and after exposure to fire. Both normal-strength concrete (NSC) beams and high-strength concrete (HSC) beams are considered. The results indicate that high temperatures have a detrimental effect on the overall behavior of concrete beams. At 600°C, the residual strength of HSC beams is shown to be twice that of NSC beams.

Keywords: beam, concrete, fire, strength, ABAQUS.

Н.Н. АЛЬЗАМИЛИ¹, А.М. ЭЛЬШЕЙХ^{1,2}

¹Российский университет дружбы народов (РУДН), Москва, Россия

²Мансура университет, Мансура, Египет

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Аннотация. Численное исследование сосредоточено на анализе структурной реакции железобетонных (RC) балок при высоких температурах. Целью этого исследования является более глубокое понимание того, как железобетонные конструкции ведут себя при воздействии повышенных температур и как это влияет на свойства материалов бетона и стальной арматуры. Для проведения этого анализа используется анализ методом конечных элементов (FEA) с использованием пакета программного обеспечения ABAQUS. FEA позволяет моделировать поведение RC-балки под пожаром путем ввода соответствующих параметров, таких как свойства материала, размеры и температура. Программа рассчитывает распределение температуры внутри конструкции и прогнозирует результирующие структурные реакции. Применяются две фазы: до и после воздействия пожара. Рассматриваются балки как из нормального бетона (NSC), так и из высокопрочного бетона (HSC). Результаты показывают, что высокие температуры оказывают пагубное влияние на общее поведение бетонных балок. Показано, что при 600°C остаточная прочность балок HSC в два раза выше, чем балок NSC.

Ключевые слова: балка, железобетон, пожар, прочность, ABAQUS.

Introduction

When concrete is exposed to high temperatures, it undergoes physical and chemical changes that can have a negative effect on its structural integrity [1]. The severity of these effects depends on the level and duration of the elevated temperatures. The main changes that occur are a loss of strength. Concrete loses its compressive and tensile strength at high temperatures.

© Альзамилли Н.Н., Эльшейх А.М., 2023

This is primarily due to the dehydration of the cement paste, which leads to a decrease in the bond strength between the aggregates and the paste [2, 3].

As well as the most important changes that occur in concrete, it expands when exposed to high temperatures due to the thermal expansion of the constituent materials. This thermal expansion can lead to internal stresses and strains, resulting in cracking and spalling of the concrete [4].

Understanding how material properties change at elevated temperatures is crucial for assessing the behavior of fire-damaged constructions. When concrete is exposed to high temperatures. Thus, methods for the post-fire restoration of structural members are becoming more and more necessary in order to improve the structural safety of such members. Since several years ago, there has been a noticeable increase in the number of fire incidents in Iraq, which typically affect public markets, businesses, and government buildings. Each year, there are considerable losses in both lives lost and property lost as a result of these fire occurrences.

Concrete tunnel linings face significant challenges when exposed to fire. The behavior of these linings depends on factors such as fire duration, intensity, and concrete composition. Understanding the material properties and utilizing finite element simulations are crucial for evaluating the fire resistance and structural integrity of concrete tunnel linings. Advancements in simulation techniques contribute to better fire safety design and aid in formulating efficient fire protection strategies for tunnels [5].

Gao et al. [6] conducted a study on fire-exposed reinforced concrete beams using finite element modeling to assess the fire resistance of these beams and evaluate their structural response under different fire scenarios. The finite element model incorporates the geometric properties of the beams, the material properties of concrete and reinforcement, and the appropriate fire temperature-time curve.

Bin Cai et al. [7] conducted calculations and utilized a finite element analysis (FEA) method to assess the residual flexural capacity of post-fire RC beams. They also considered various factors for parametric studies on fire using the proposed FE model. Through their research, they found that the thickness of the concrete cover, longitudinal steel reinforcement ratio, fire exposure time, and fire exposure sides are the key parameters influencing the fire resistance of the beams. Figure 1 displays the temperature over time curve used in their study.

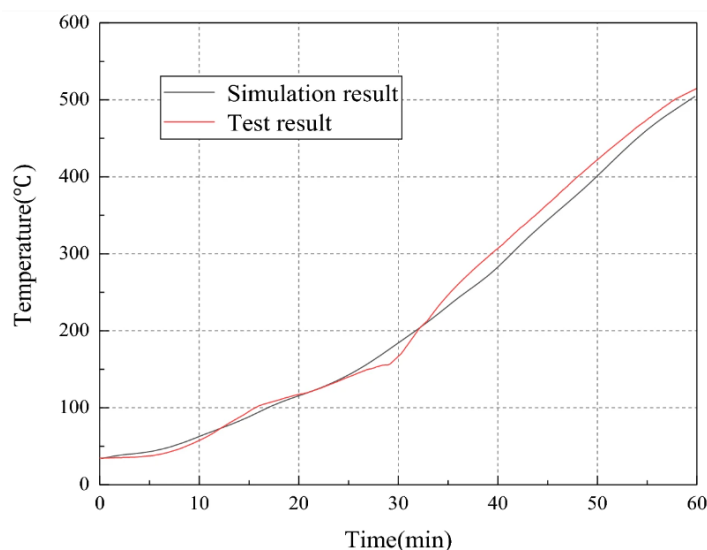


Figure 1 - Temperature-time curve [7]

Sajjad and Taher [8] focused on evaluating the impact of fire on reinforced concrete columns using the finite element method. They used the ABAQUS software for finite element analysis and validated their findings with experimental data. The columns were subject to a maximum temperature of 600 degrees Celsius for varying durations of 10, 15, and 20 minutes. Figure 2 illustrates the comparison of stiffness between the experimental and finite element results obtained from their study.

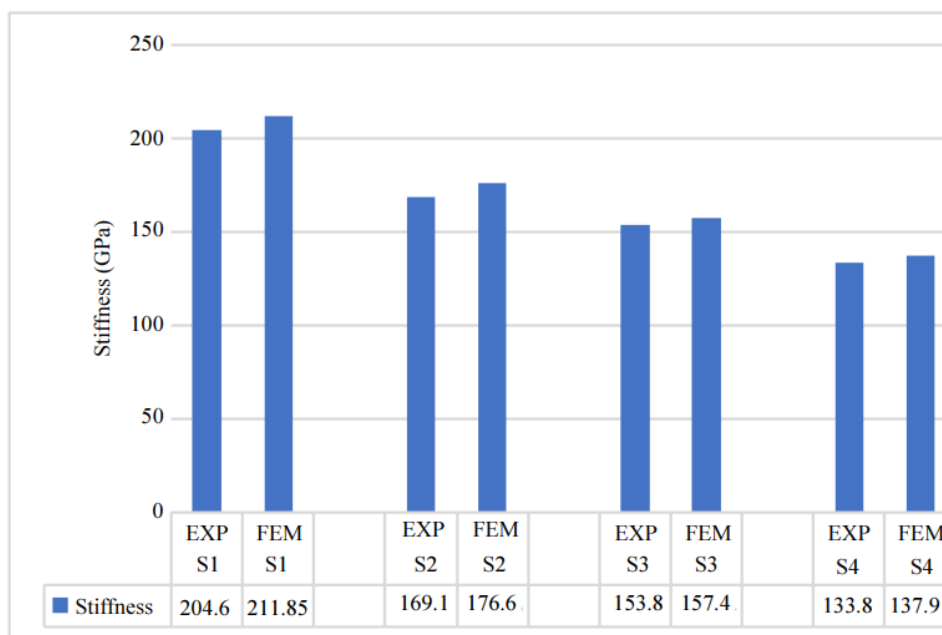


Figure 2 - Stiffness at different fire periods [27]

They found a strong correlation between the finite element (FE) analysis and experimental values in their study. The results demonstrated that the stiffness of reinforced concrete columns decreased as the duration of fire stress increased.

The methods used to model and analyze the behavior of the examined concrete element under various loading methods are presented and illustrated in this work. Numerical solver software development has been made easier by the widespread availability of computer devices and their recent advancements. ABAQUS is among the most powerful software programs that Simulia has created recently.

ABAQUS offers a range of tools and features to analyze various structural and thermal problems. It allows for the creation of detailed finite element models, the definition of material properties, and the application of thermal and mechanical loads. Additionally, the software provides post-processing capabilities to analyze and interpret the results obtained from the simulations [9].

In addition to having the capability to import components from other programs, like AutoCAD, with appropriate and different file extensions, ABAQUS also offers a flexible platform for modeling. Typically, the process for geometrical modeling involved creating individual parts based on their types, such as 3D, 2D, or 1D part. Moreover, some of parts are deformable, some others are rigid parts according to the simulation status [10].

The authors' approach of modeling steel bars as wire elements (1D parts) in the ABAQUS software package is a common simplification technique used to reduce computational time and complexity in structural analysis.

In many cases, especially when the focus is on the overall behavior of the reinforced concrete structure and not specifically on the steel-concrete interaction, modeling the steel bars as 1D elements is sufficient and efficient. By representing the steel bars as wire elements, the computational effort required to simulate the behavior of the individual steel bars is reduced compared to modeling them as full 3D elements [30].

This simplification is often justified when the mechanical properties of the steel bars, such as their Young's modulus and yield strength, are the main factors influencing the structural response.

The wire element approach allows for capturing the axial deformation and buckling behavior of the steel bars, which are the primary modes of deformation in most cases [11, 12].

Methods and Materials

Finite Element Modeling with ABAQUS

This study will provide a detailed description and discussion of the stages of modeling and simulation for the samples. The procedure is divided into two primary steps: simulation for the concrete beam samples that are exposed to high temperatures, and modeling and simulation for the reference samples, which are not fired concrete elements. To recreate any process or behavior of concrete elements using ABAQUS, the following key steps must be taken: part modeling; material properties; assembly; step; constraints and interaction properties; loading and boundary conditions; predefined field; and job [12].

Materials models and assigned section

The CDP (Concrete Damage Plasticity) model is a widely used constitutive model to simulate the behavior of concrete under various loading conditions. When using the CDP model for unfired concrete, it must define specific material parameters to accurately capture its behavior. Such as Young's modulus and Poisson's ratio. These parameters represent the stiffness and deformation characteristics of the material. In the plastic range, the stress-strain curve represents the nonlinear behavior of concrete as it undergoes deformation and damage. The CDP model takes into account the plastic behavior of concrete, which is characterized by parameters such as the compressive strength, tensile strength, fracture energy, and damage parameters.

By combining the elastic and plastic behavior, the CDP model can accurately simulate the response of concrete under different loading conditions, such as compressive loading. [13].

It's important to note that material parameters for unfired concrete may vary depending on factors such as the composition of the concrete mix, curing conditions, and specific test data. Experimental testing or established guidelines can help determine the appropriate values for these parameters [14]. The Selected CDP material parameters for unfired concrete are shown in table 1.

Table 1 - Selected CDP material parameter for unfired concrete

Parameter	Selected value
Material model	CDP model
E, MPa	23500 MPa for C25 and 38000 MPa for C65
Possion's ratio	varying based on the temperature
Dilation angel	30 for C25 MPa and 40 for C65
*Ecc	0.1
*Fb0/fc0	1.16
*K	2/3
*Viscosity parameter	0.001

*As recommended by Abaqus manual

It is necessary to enter a more substantial curve into the CDP model (20 °C) that represents the uniaxial, unconfined stress-strain behavior under compressive conditions at ambient temperature. Figure 3 shows an illustration of the unconfined compressive stress-strain of both normal and high-strength concrete. By utilizing the CDP model, these curves can be classified as plastic or elastic, depending on the elasticity modulus and Possion's ratio.

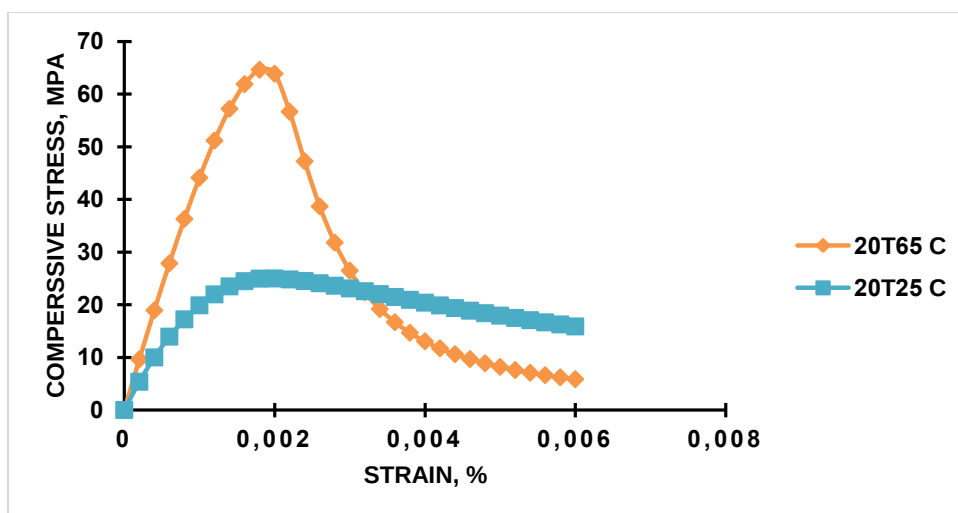


Figure 3 - Uniaxial concrete compressive stress- strain at ambient temperature (20C) for normal (25 MPa) and high (65 MPa) strength concrete class

Defining Steel material behavior

This study has exploited the elastic-perfectly plastic behavior of steel reinforcing rebar. This behavior assumes that the steel rebar behaves elastically up to its yield point and then exhibits perfect plasticity, meaning it undergoes permanent deformation without any further increase in stress.

To accurately define the elastic and plastic behavior of the steel rebar in the CDP model, it is necessary to have at least one point at the yielding stage, which corresponds to zero plastic strain. This point is crucial, as it helps determine the yield strength of the rebar [15].

Additionally, for the plastic phase, linear hardening points are required as a minimum. These points include the yield point and the rupture point. The yield point provides information about the onset of plastic deformation, while the rupture point represents the ultimate strength of the rebar before failure (see figure 4).

On the other hand, as shown in (table 2) points are required for the linear hardening of the plastic phase as a minimum: the yield point and the rupture point (2).

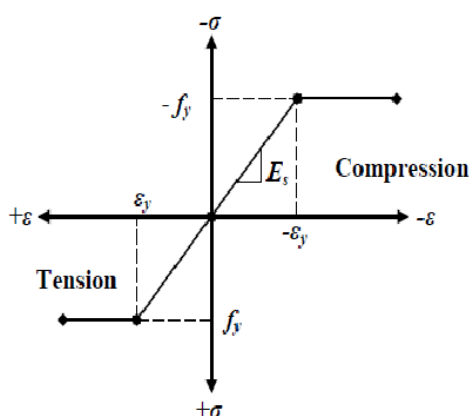


Figure 4 - Elastic perfect plastic behavior of steel reinforcement [16]

Table 2 - Parameters for define elastic perfect plastic model

Parameter	Selected value
Model type	Elastic perfect plastic behavior
E, MPa	200000
Yield stress, MPa	480
Possons ratio	0.3

Analysis and Results

Concrete element dimensions and cross sections

To demonstrate the effect of fire impact that occurred frequently in some infrastructure facilities such as hospitals, the beam has a full-scale dimension of 5500 mm in length, 300 mm in width, and 500 mm in thickness. The beam is reinforced with three steel bars at the top and bottom, each having a diameter of 16 mm. Additionally, transverse reinforcement in the form of stirrups is used along the length of the beam. The stirrups have a constant spacing of 200 mm and are made of steel bars with a diameter of 10 mm (see figure 5).

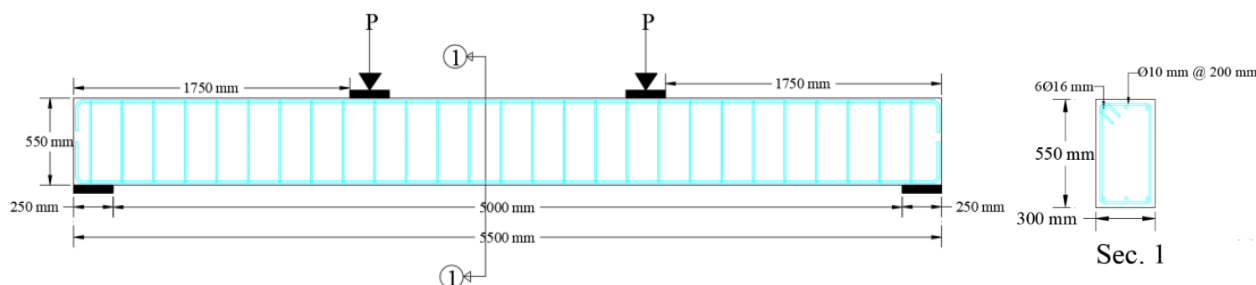


Figure 5 - The adopted full-scale dimensions and reinforcement of beam

Modeling of reference concrete beam samples (first phase)

Three components are needed to produce a geometrical model of the beam: loading and supporting plates, steel reinforcement, and the concrete beam. It is required that the simulation procedure for every generated part be carried out in three dimensions.

In particular, the concrete beam is made using the extraction process to build 3D deformable parts. This entails determining the proper extraction length for each component and drawing the beam's cross-section in the XY plane. 3D items having a straight longitudinal profile are frequently worked on using this technique.

A 1D wire method is applied to the steel reinforcement. This indicates that one-dimensional elements are used in the modeling of the steel reinforcement, including longitudinal bars and ties. This method makes the modeling process easier for the intricate arrangement of reinforcement (see figure 6) [29].

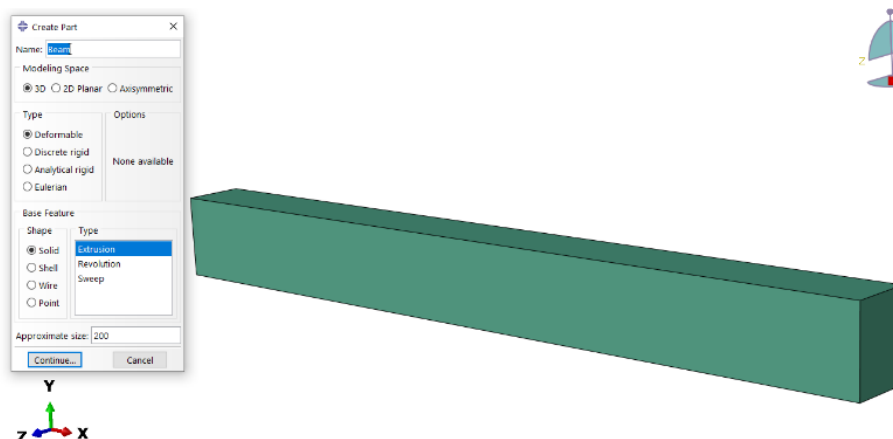


Figure 6 - Beam modelling in ABAQUS

Using the instances assembly module, the assembled parts were put into the simulation environment. After inserting the concrete beam, the long steel bars for the top and bottom layers together with the stirrups are positioned and duplicated, in accordance with the relevant simulation, which shows that this module builds, translates, rotates, or duplicates instances (see figure 7). It is noteworthy that, as a case study, ABAQUS provides an extruded view for wire elements exclusively.

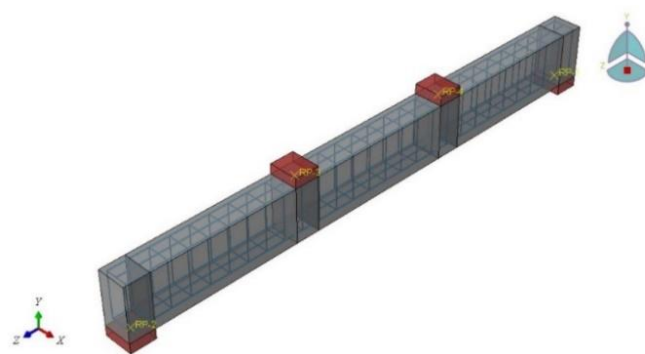


Figure 7 - Part assembling of beam

ABAQUS was used to conduct a heat transfer study to acquire the temperature fields of RC beams. The basis of the analysis is the determination of the thermal conductivity, materials' specific heat capacity, and density (see figures 8, 9, and 10) [17]. The parameters in equation (1) were chosen in accordance with Wang and He (2009). The thermal conductivity of concrete λ_{cT} (W/(m °C)) is where T is the temperature, °C.

$$\lambda_{cT} = 2 - 0.24\left(\frac{T}{120}\right) + 0.012\left(\frac{T}{120}\right)^2 (20^\circ\text{C} \leq T \leq 1200^\circ\text{C}) \quad (1)$$

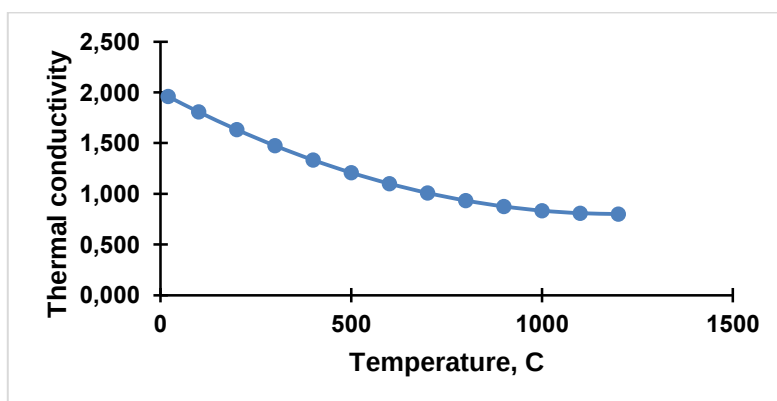


Figure 8 - Concrete thermal conductivity vs. temperature

The specific heat capacity of concrete C_{cT} (J/(Kg °C)) is as shown in equation (2).

$$C_{cT} = 900 + 80\left(\frac{T}{120}\right) - 4\left(\frac{T}{120}\right)^2 (20^\circ\text{C} \leq T \leq 1200^\circ\text{C}) \quad (2)$$

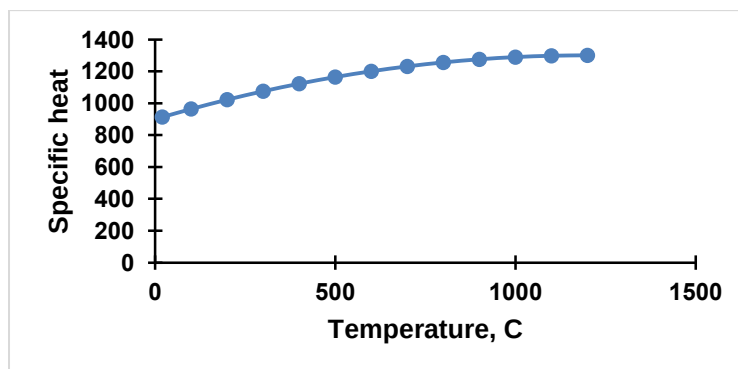


Figure 9 - Concrete specific heat vs. temperature

The density of concrete also changes as the temperature rises, so the equations (3), (4), (5) and (6) are used to define this characteristic in Kg/m³ at higher temperatures [18]:

$$\rho_{\theta} = \rho_{20^{\circ}\text{C}} = 2300 \text{ kg/m}^3 \quad 20^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 115^{\circ}\text{C} \quad (3)$$

$$\rho_{\theta} = \rho_{20^{\circ}\text{C}} \cdot [1 - 0.02(\theta - 115)/85] \quad 115^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 200^{\circ}\text{C} \quad (4)$$

$$\rho_{\theta} = \rho_{20^{\circ}\text{C}} \cdot \left[0.98 - \frac{0.03(\theta - 200)}{200} \right] \quad 200^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 400^{\circ}\text{C} \quad (5)$$

$$\rho_{\theta} = \rho_{20^{\circ}\text{C}} \cdot [0.95 - 0.07(\theta - 400)/800] \quad 400^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 1200^{\circ}\text{C} \quad (6)$$

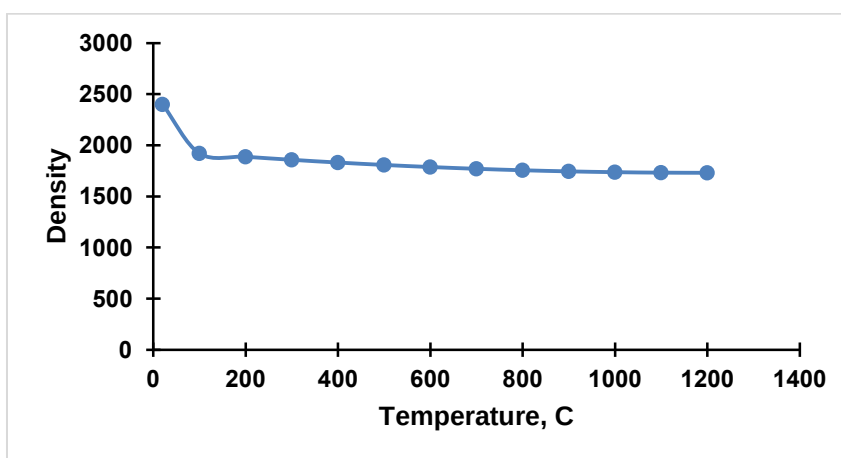


Figure 10 - Concrete density variations with high temperatures

The (step) analysis used the thermal analysis approach to simulate the distribution of heat on the fired beam. The transitory approach has been chosen for solving the problem. The goal of this type of analysis is to display the temperature distribution on the beam, and it took 7200 seconds, or two hours, in total.

To simulate heat convection between the ambient air temperature and a concrete beam. In order to simulate this heat transfer process, surface film conditions were assigned to the concrete sides and bottom edges of the beam.

To simulate the initial air temperature, a sink temperature of 20°C was set. This represents the temperature of the surrounding air before any heating or firing occurs. The heat amplitude of TC1 was used to represent the increase in temperature due to firing, indicating the rise in surrounding temperature.

For thermal analysis, conductivity was used to simulate how heat is transferred between different objects, such as steel and concrete. The conductivity value represents the ability of a material to conduct heat [19].

Furthermore, the surface film condition was used to simulate the interaction between the model and the surrounding media. The values recommended for surface film conditions depend on the surface being subject to fire or being unfired. As per the recommendations provided by the Fib modal code, a surface film condition value of 25 W/m² is suggested for surfaces subject to fire, while a value of 9 W/m² is recommended for unfired surfaces, as per ASTM E119.

Additionally, the temperature evolution of the Cellulosic Fire Curve (ISO-834) is described by the equation (7). The ISO curve describes the typical temperature profile observed during a cellulosic fire [20].

$$T = T_0 + 345 \lg(8t + 1) \quad (7)$$

It is shown in (figure 11) that the temperature reached 745°C after 30 minutes, and that it rises by around 100°C each time the duration is doubled. The equation shows two stages of a fire: the flashover, which is characterized by a rapid temperature rise to about 800°C, and the subsequent phase, which is characterized by the fire's full formation.

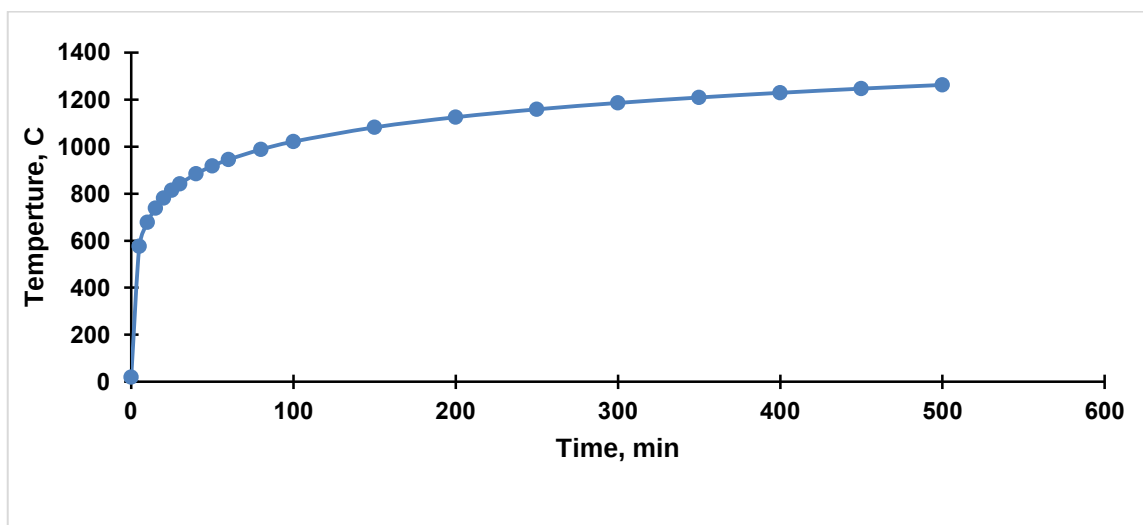


Figure 11 - Temperature versus Time curve due to fire effect (ISO-834)

Modeling of fired samples subjected to mechanical loading (the second phase)

The same methods and measurements from the prior stage are applied in this one.

Materials' characterization

There are differences in how high temperatures affect the compressive strength of concrete in the normal and high concrete classes. Equation (8) according to Yu et al. (2005a, b) [21] reflects this variation in behavior.

$$\Psi_{cT} = \frac{f_c(T)}{f_c} = \frac{1}{1 + 9 \times [(T - 20)/800]^{c_1}} \quad (8)$$

The axial compressive strength of concrete at room temperature is symbolized by $f_c(T)$, while the axial compressive strength of concrete during high temperature can be expressed by f_c . The parameter c_1 in this case is 3.55 for normal concrete, while it is 6.70 for high-performance concrete (HPC).

Figure 12 in the study illustrates the relationship between elevated temperatures and the reduction in compressive strength of concrete. The figure shows that up to a temperature of 200°C, there is no significant difference in the strength reduction between normal-strength concrete and high-strength concrete. However, beyond this temperature limit, the divergence between the two curves becomes more significant until reaching 800°C. After this point, the two curves start to match each other.

Based on these observations, it can be concluded that high-strength concrete has better resistance to fire damage compared to normal-strength concrete. This means that high-strength concrete can maintain its compressive strength at higher temperatures for a longer duration before experiencing significant strength reduction compared to normal-strength concrete.

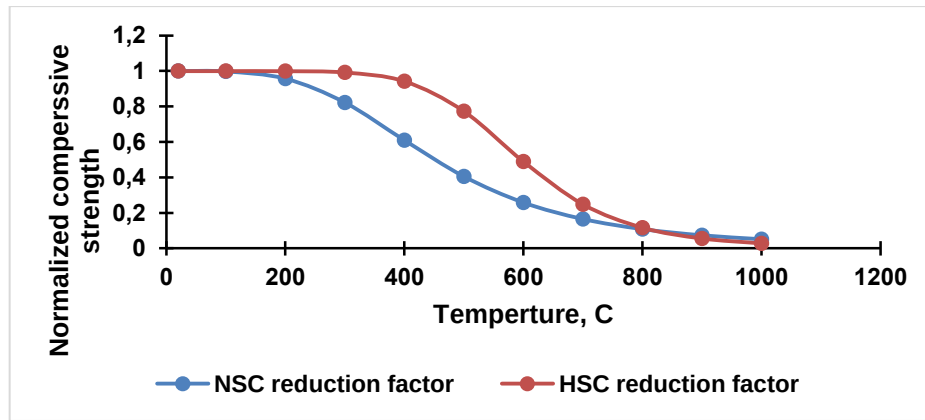


Figure 12 - Normalized residual strength of normal and high concrete class at high temperatures

Hu et al. (2014) suggested a bilinear model for calculating the tensile strength of post-fire concrete. Equation (9) was used to determine the post-fire concrete's tensile strength, expressed as $f_t(T)$ (N/mm²) at T °C. The normalized concrete tensile strength at different high temperatures is shown in figure 13.

$$\frac{f_t(T)}{f_t} = 0.976 + [1.56 \times (\frac{T}{100}) - 4.35 \times (\frac{T}{100})^2 + 0.345 \times (\frac{T}{100})^3] \times 10^{-2} \quad 20^\circ\text{C} \leq T \leq 800^\circ\text{C} \quad (9)$$

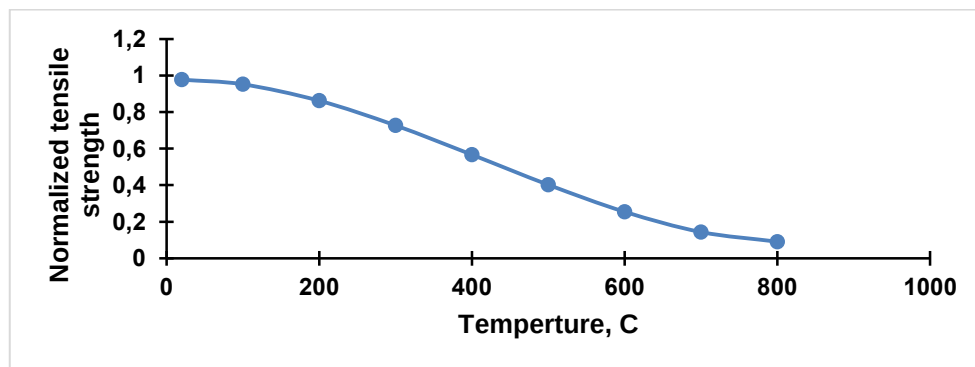


Figure 13 - Normalized residual tensile strength of concrete class under elevated temperatures

Equation (10) can be used to calculate the post-fire concrete's compression peak strain $\varepsilon_0(T)$ at T °C. The normalized peak strain for the concrete classes with normal and high strengths is shown in figure 14. It is evident that when temperatures rise, the peak strain rises for both concrete types.

$$\varepsilon_0(T) = \{1 + c_4[(T - 20)/100]^2\}\varepsilon_0 \quad (10)$$

where the parameter c_4 equals 0.037 for normal concrete and 0.017 for high-performance concrete, depending on the value of ε_0 , which represents the compressive strain of concrete at room temperature.

Equation (11) illustrates the relationship between strain and compression stress in post-fire concrete.

$$E_c(T) = \frac{E_c}{1 + 2.15 \times 10^{-3} [(T-20)/800]^{4.33} + 3.7 \times 10^{-2} [(T-20)/100]^2} \quad (11)$$

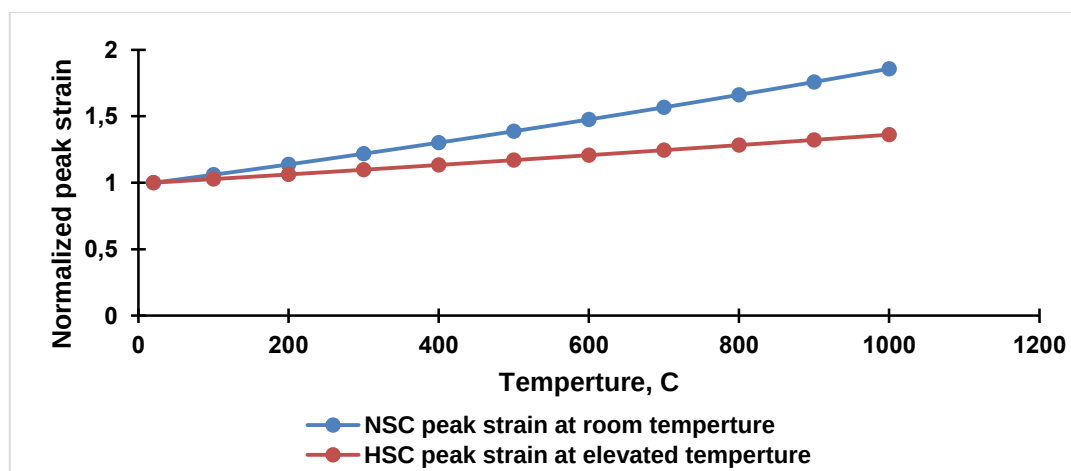


Figure 14 - Normalized strain corresponded to the maximum compressive strength of normal and high concrete class at high temperatures

Normal concrete is less resistant to high temperatures than high-class concrete. The elastic modulus of both classes can be calculated using equation (12).

At 1000°C, the elastic modulus of concrete drops to 50% of its initial value, as can be shown in figure 15.

$$y = \frac{9.1f_{cu}^{-4/9}x - x^2}{1 + (9.1f_{cu}^{-4/9} - 2)x} \quad x \leq 1 \quad (12)$$

$$\frac{x}{2.5 \times 10^{-5}f_{cu}^3(x - 1)^2 + x} \quad x > 1$$

In this case, $y = \sigma c / f_c(T)$, $x = \epsilon c / \epsilon_0(T)$ represents the post-fire concrete's compressive stress (N/mm^2), ϵc its compressive strain (N/mm^2), and f_{cu} its cube crushing strength (N/mm^2) at room temperature.

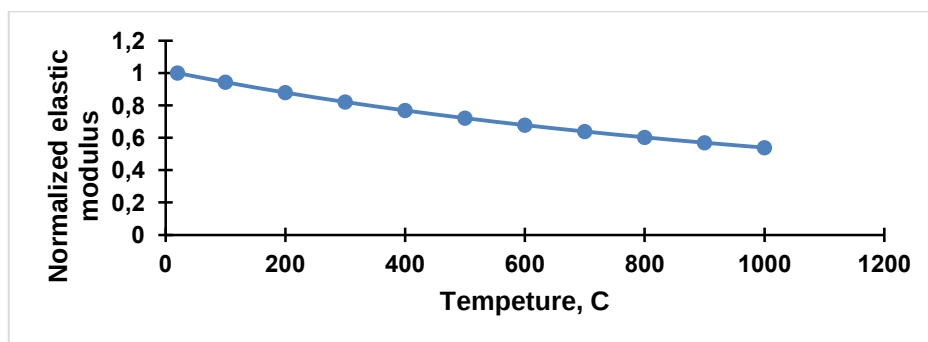


Figure 15 - Normalized concrete elastic modulus at high temperatures

The elastic modulus of post-fire concrete $E_c(T)$ (N/mm^2) at $T^\circ C$. As shown in figure 16, it is noticeable that high exposed temperatures to concrete have a substantial negative impact on strain corresponding to peak stress and secant modulus of elasticity in addition to the concrete's compressive strength [22, 23].

Furthermore, it is evident that the material behavior's deterioration phase steepens with increasing temperature [24]. This indicates that the material's brittleness began to progressively diminish and became more ductile at higher temperatures.

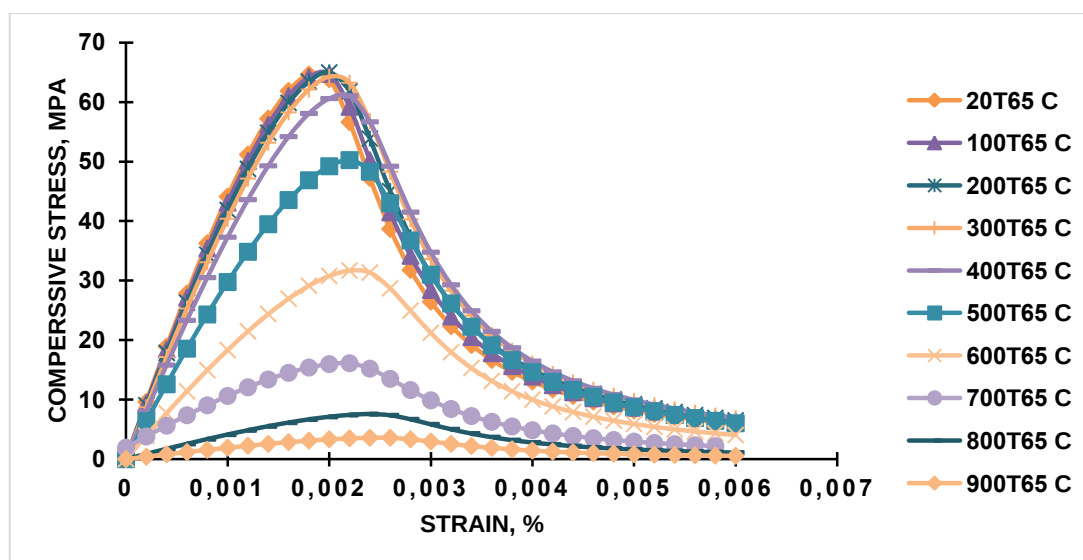


Figure 16- Compressive stress- strain behavior of normal strength concrete at various temperatures degrees

The researchers have adopted the suggested formula, described by equation (13), to assign the Poisson's ratio at elevated temperatures. Figure 17 in the study illustrates the relationship between the temperature and the corresponding Poisson's ratio values for the concrete specimens tested [25, 26].

Understanding the change in Poisson's ratio at high temperatures is essential for accurately predicting the material's behavior and deformation characteristics under fire conditions. It provides valuable insights into how the concrete responds to thermal loading and can aid in designing structures that account for these changes in mechanical properties [28].

$$\mu_{\theta} = a \cdot e^{-b \cdot \theta} = 0.204 \cdot e^{-0.002 \cdot \theta} \quad \text{with } 20^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 500^{\circ}\text{C} \quad (13)$$

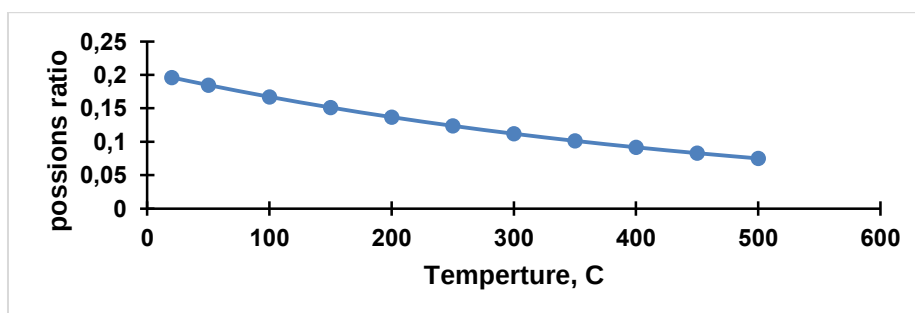


Figure 17 - Effect of high temperatures on concrete Poisson's ratio

Conclusions

The following findings can be drawn following an extensive and in-depth analysis of the behavior of RC concrete beams:

1. The values of residual strength of normal and high concrete differs according to the temperature. At temperature 200, they are equal to 85 Mpa. At temperature 400, their values are 50 Mpa and 80 Mpa respectively. While, at temperature 600, the values are 25 Mpa and 50 Mpa respectively. Finally, at temperature of 800 C, both types of concrete become damage without resistant to fire.

2. It is obvious that high temperatures have a negative impact on the general behavior of concrete beam, including strain and secant modulus of elasticity, in addition to the concrete's compressive strength.

3. It is clear that a material's behavior's degradation phase steepens with temperature, indicating that the material's brittleness gradually decreases and becomes more ductile at high temperatures.

REFERENCES

1. Miliozzi A., Chieruzzi M., Torre L. Experimental investigation of a cementitious heat storage medium incorporating a solar salt. *Applied Energy*. 2019. No. 250. Pp. 1023-1035.
2. Ni S., Gernay T. Predicting residual deformations in a reinforced concrete building structure after a fire event. *Engineering Structures*. 2020. Pp. 109853.
3. Khan E.U., Khushnood R.A., Baloch W.L. Spalling sensitivity and mechanical response of an ecofriendly sawdust high strength concrete at elevated temperature. *Construction and Building Materials*. 2020. No. 258. Pp. 119656.
4. Bolina F., Tutikian B., Rodrigues J.P.C. Thermal analysis of steel decking concrete slabs in case of fire. *Fire Safety Journal*. 2021. No. 121. Pp. 103295.
5. Saleheen Z., Krishnamoorthy R.R., Nadjai A. A review on behavior, material properties and finite element simulation of concrete tunnel linings under fire. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2022. No. 126. Pp. 104534.
6. Gao W.Y., Dai J.G., Teng J.G., Chen G.M. Finite element modeling of reinforced concrete beams exposed to fire. *Engineering structures*. 2013. No. 52. Pp. 488-501.
7. Cai B., Li B., Fu F. Finite element analysis and calculation method of residual flexural capacity of post-fire RC beams. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2020. No. 14. Pp. 1-17.
8. Roudari S.S., Abu-Lebdeh T.M. Evaluation of fire effects on reinforced concrete columns using finite element method. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2019.
9. Musmar M., Shatnaw A., Shatarat N. Finite element analysis of the behavior of RC beams during fires. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018. No. 12. Pp. 6869-6876.
10. Yong W., Yu-li D., Guang-chun Z. Nonlinear numerical modeling of two-way reinforced concrete slabs subjected to fire. *Computers & Structures*. 2012. No. 119. Pp. 23-36.
11. Santosh T., Nur Y., Eyosias B. Post-fire analysis and numerical modeling of a fire-damaged concrete bridge. *Engineering Structures*. 2021. No. 244. Pp. 112764.
12. Hoang-Le M., Samir K., Magd A. A concrete damage plasticity model for predicting the effects of compressive high-strength concrete under static and dynamic loads. *Journal of Building Engineering*. 2021. No. 44. Pp. 103239.
13. Bakhti R., Benahmed B., Laib A. New approach for computing damage parameters evolution in plastic damage model for concrete. *Case Studies in Construction Materials*. 2021. No. 16. Pp. e00834.
14. Natri E., Todisco P. Macro mechanical Failure Criteria: Elasticity, Plasticity and Numerical Applications for the Non-Linear Masonry Modelling. *Buildings*. 2022. No. 12(8). Pp. 1245.
15. Cui L., Zhang X., Hao H. Improved analysis method for structural members subjected to blast loads considering strain hardening and softening effects. *Advances in Structural Engineering*. 2021. No. 24(12). Pp. 2622-2636.
16. Kaish A.B.M.A., Alam M.R., Hassan Md.K., Ullah S.N. Numerical investigation of the behavior of retrofitted flexural cracked beam with external plate bonding. Conference: Conference on Engineering Research, Innovation and Education 2011 (CERIE 2011) At: SUST, Sylhet, Bangladesh.
17. Li W.S., Deng X.W. The temperature field finite element analysis of concrete beam after fire based on Abaqus. *Applied Mechanics and Materials*. 2011. No. 90. Pp. 3089-3092.
18. Krishna D.A., Priyadarsini R.S., Narayanan S. Effect of elevated temperatures on the mechanical properties of concrete. *Procedia Structural Integrity*. 2019. No. 14. Pp. 384-394.
19. Pokorný P., Kolísko J., Čítek D., Kostecká M. Effect of elevated temperature on the bond strength of prestressing reinforcement in UHPC. *Materials (Basel)*. 2020. No. 13(21). Pp. 4990.
20. Oliveira P.N., Fonseca E.M.M., Campilho R.D.S.G., Piloto P.A. Analytical equations applied to the study of steel profiles under fire according to different nominal temperature-time curves. *Mathematical and Computational Applications*. 2021. No. 26(2). Pp. 48.
21. Suntharalingam T., Upasiri I., Nagaratnam B., Poologanathan K., Gatheeshgar P., Tsavdaridis K.D., Nuwanthika D. Finite Element Modelling to Predict the Fire Performance of Bio-Inspired 3D-Printed Concrete Wall Panels Exposed to Realistic Fire. *Buildings*. 2022. No. 12(2). Pp. 111.
22. Bamonte P., Lo Monte F. Reinforced concrete columns exposed to standard fire: Comparison among different constitutive models for concrete at high temperature. *Fire Safety Journal*. 2015. No. 71. Pp. 310-323.
23. Weerasinghe P., Nguyen K., Mendis P., Guerrieri M. Large-scale experiment on the behaviour of concrete flat slabs subjected to standard fire. *Journal of Building Engineering*. 2020. No. 30. Pp. 101255.
24. Yang M., Pham D.T., Bleyer J., de Buhan P. Evaluating the failure load of high-rise reinforced concrete walls under fire loading using the yield design approach. *Structures*. 2023. No. 48. Pp. 934-946.
25. Dong H., Zhu J., Cao W., Rao Y., Liu Y. Structural behavior of mega steel-reinforced high-strength concrete rectangular columns under axial compression. *Journal of Building Engineering*. 2022. No. 61. Pp. 105272.

26. Roudari S.S., Abu-Lebdeh T. Evaluation of fire effects on reinforced concrete columns using finite element method. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2019. No. 12(2). Pp. 227-235.
27. Haido J.H., Tayeh B.A., Majeed S.S., Karpuzcu M. Effect of high temperature on the mechanical properties of basalt fibre self-compacting concrete as an overlay material. *Construction and Building Materials*. 2021. No. 268. Pp. 121725.
28. Alzamili H.H. Post-fire behavior of various reinforced concrete elements with various strengthening methods. Moscow. Russian Federation. 2023.
29. Elsheikh A., Alzamili H.H. Post Fire Behavior of Thesis. Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University). Structural Reinforced Concrete Member (Slab) Repairing with Various Materials. *Civil Engineering Journal*. 2023. No. 9(8). Pp. 2012-2031. doi:10.28991/CEJ-2023-09-08-013.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Miliozzi A., Chieruzzi M., Torre L. Experimental investigation of a cementitious heat storage medium incorporating a solar salt // *Applied Energy*. 2019. No. 250. Pp. 1023-1035.
2. Ni S., Gernay T. Predicting residual deformations in a reinforced concrete building structure after a fire event // *Engineering Structures*. 2020. Pp. 109853.
3. Khan E.U., Khushnood R.A., Baloch W.L. Spalling sensitivity and mechanical response of an ecofriendly sawdust high strength concrete at elevated temperatures // *Construction and Building Materials*. 2020. No. 258. Pp. 119656.
4. Bolina F., Tutikian B., Rodrigues J.P.C. Thermal analysis of steel decking concrete slabs in case of fire // *Fire Safety Journal*. 2021. No. 121. Pp. 103295.
5. Saleheen Z., Krishnamoorthy R.R., Nadjai A. A review on behavior, material properties and finite element simulation of concrete tunnel linings under fire // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2022. No. 126. Pp. 104534.
6. Gao W.Y., Dai J.G., Teng J.G., Chen G.M. Finite element modeling of reinforced concrete beams exposed to fire // *Engineering structures*. 2013. No. 52. Pp. 488-501.
7. Cai B., Li B., Fu F. Finite element analysis and calculation method of residual flexural capacity of post-fire RC beams // *International Journal of Concrete Structures and Materials*. 2020. 14. 1-17.
8. Roudari S.S., Abu-Lebdeh T.M. Evaluation of fire effects on reinforced concrete columns using finite element method // *American Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2019.
9. Musmar M., Shatnaw A., Shatarat N. Finite element analysis of the behavior of RC beams during fires // *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018. No. 12. Pp. 6869-6876.
10. Yong W., Yu-li D., Guang-chun Z. Nonlinear numerical modeling of two-way reinforced concrete slabs subjected to fire // *Computers & Structures*. 2012. No. 119. Pp. 23-36.
11. Santosh T., Nur Y., Eyosias B. Post-fire analysis and numerical modeling of a fire-damaged concrete bridge // *Engineering Structures*. 2021. No. 244. Pp. 112764.
12. Hoang-Le M., Samir K., Magd A. A concrete damage plasticity model for predicting the effects of compressive high-strength concrete under static and dynamic loads // *Journal of Building Engineering*. 2021. No. 44. Pp. 103239.
13. Bakhti R., Benahmed B., Laib A. New approach for computing damage parameters evolution in plastic damage model for concrete // *Case Studies in Construction Materials*. 2021. No. 16. Pp. e00834.
14. Nastri E., Todisco P. Macro mechanical Failure Criteria: Elasticity, Plasticity and Numerical Applications for the Non-Linear Masonry Modelling // *Buildings*. 2022. No. 12(8). Pp. 1245.
15. Cui L., Zhang X., Hao H. Improved analysis method for structural members subjected to blast loads considering strain hardening and softening effects // *Advances in Structural Engineering*. 2021. 24(12). 2622-2636.
16. Kaish A.B.M.A., Alam M.R., Hassan Md.K., Ullah S.N. Numerical investigation of the behavior of retrofitted flexural cracked beam with external plate bonding // *Conference: Conference on Engineering Research, Innovation and Education 2011 (CERIE 2011)* At: SUST, Sylhet, Bangladesh.
17. Li W.S., Deng X.W. The temperature field finite element analysis of concrete beam after fire based on Abaqus // *Applied Mechanics and Materials*. 2011. No. 90. Pp. 3089-3092.
18. Krishna D.A., Priyadarsini R.S., Narayanan S. Effect of elevated temperatures on the mechanical properties of concrete // *Procedia Structural Integrity*. 2019. No. 14. Pp. 384-394.
19. Pokorný P., Kolísko J., Čítek D., Kostecká M. Effect of elevated temperature on the bond strength of prestressing reinforcement in UHPC // *Materials (Basel)*. 2020. No. 13(21). Pp. 4990.
20. Oliveira P.N., Fonseca E.M.M., Campilho R.D.S.G., Piloto P.A. Analytical equations applied to the study of steel profiles under fire according to different nominal temperature-time curves // *Mathematical and Computational Applications*. 2021. No. 26(2). Pp. 48.

21. Suntharalingam T., Upasiri I., Nagaratnam B., Poologanathan K., Gatheeshgar P., Tsavdaridis K.D., Nuwanthika D. Finite Element Modelling to Predict the Fire Performance of Bio-Inspired 3D-Printed Concrete Wall Panels Exposed to Realistic Fire / Buildings. 2022. No. 12(2). Pp. 111.
22. Bamonte P., Lo Monte F. Reinforced concrete columns exposed to standard fire: Comparison among different constitutive models for concrete at high temperature // Fire Safety Journal. 2015. No. 71. Pp. 310-323.
23. Weerasinghe P., Nguyen K., Mendis P., Guerrieri M. Large-scale experiment on the behaviour of concrete flat slabs subjected to standard fire // Journal of Building Engineering. 2020. No. 30. Pp. 101255.
24. Yang M., Pham D.T., Bleyer J., de Buhan P. Evaluating the failure load of high-rise reinforced concrete walls under fire loading using the yield design approach // Structures. 2023. No. 48. Pp. 934-946.
25. Dong H., Zhu J., Cao W., Rao Y., Liu Y. Structural behavior of mega steel-reinforced high-strength concrete rectangular columns under axial compression // Journal of Building Engineering. 2022. No. 61. Pp. 105272.
26. Roudari S.S., Abu-Lebdeh T. Evaluation of fire effects on reinforced concrete columns using finite element method // American Journal of Engineering and Applied Sciences. 2019. No. 12(2). Pp. 227-235.
27. Haido J.H., Tayeh B.A., Majeed S.S., Karpuzcu M. Effect of high temperature on the mechanical properties of basalt fibre self-compacting concrete as an overlay material // Construction and Building Materials. 2021. No. 268. Pp. 121725.
28. Alzamili H.H. Post-fire behavior of various reinforced concrete elements with various strengthening methods // Thesis. Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russian Federation. 2023.
29. Elsheikh A., Alzamili H.H. Post Fire Behavior of Structural Reinforced Concrete Member (Slab) Repairing with Various Materials // Civil Engineering Journal. 2023. No. 9(8). Pp. 2012-2031. doi:10.28991/CEJ-2023-09-08-013.

Information about authors:

Alzamili Hadeal Hakim

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russia,
PhD student department of Civil Engineering, Academy of Engineering.
E-mail: HadealHakim8@gmail.com

Elsheikh Asser Mohamed

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russia,
candidate in technical sciences, assistant professor department of Civil Engineering, Academy of Engineering.
Mansoura University, Mansoura, Egypt,
candidate in technical sciences, associated professor.
E-mail: elsheykh_am@pfur.ru

Информация об авторах:

Альзамили Хадиль Хаким

Российский университет дружбы народов (РУДН), г. Москва, Россия,
аспирантка департамента строительства инженерной академии.
E-mail: HadealHakim8@gmail.com

Эльшейх Ассер Мохамед

Российский университет дружбы народов (РУДН), Москва, Россия,
кандидат технических наук, доцент департамент строительства инженерной академии.
Мансура университет, Мансура, Египет,
кандидат технических наук, доцент.
E-mail: elsheykh_am@pfur.ru

В.Н. КУПРИЯНОВ¹, А.Г. ХАБИБУЛИНА¹, А.М. СУЛЕЙМАНОВ¹

¹ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет», г. Казань, Россия

ЗАЩИТА ФАСАДОВ ОБЪЕКТОВ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ КОСОГО ДОЖДЯ: ОБЗОР ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена тем, что эрозия поверхности строительных материалов является распространенным явлением, наблюдаемым на фасадах исторических зданий. Климатические изменения могут привести к увеличению частоты и интенсивности экстремальных осадков, что может усилить эрозионные эффекты на фасадах зданий из-за воздействия косого дождя. Целью исследования является сравнение экспериментальных методов оценки степени эрозии поверхности исторических строительных материалов под воздействием косых дождей. Задачами исследования являются обзор современных методов измерения влияния дождя с ветром на поверхностную эрозию и снижение прочности кирпича и известняка; критический анализ наиболее известных методов оценки степени эрозии поверхности строительных материалов; предложение рекомендаций по защите и реставрации поврежденных фасадов объектов культурного наследия из-за воздействия косого дождя.

Значимость полученных результатов для архитекторов и проектировщиков состоит в том, что использование методов оценки степени повреждения фасадов памятников архитектуры из-за косого воздействия дождей позволяют осуществлять мониторинг и выработать меры по защите объектов культурного наследия.

Ключевые слова: косой дождь, эрозия каменной кладки, защита фасадов памятников архитектуры.

V.N. KUPRIYANOV¹, A.G. KHABIBULINA¹, A.M. SULEYMANOV¹

¹Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russia

PROTECTING FACADES OF CULTURAL HERITAGE OBJECTS FROM THE WIND-DRIVEN RAIN: A REVIEW OF EXPERIMENTAL STUDIES

Abstract. The relevance of the study is due to the fact that erosion of the surface of building materials is a common phenomenon observed on the facades of historic buildings. Climatic changes can lead to an increase in the frequency and intensity of extreme precipitation, which can increase the erosion effects on the facades of buildings due to the wind-driven rain. The purpose of the study is to compare experimental methods for assessing the degree of surface erosion of historic building materials under the influence of wind-driven rainfall. The objectives of the study are to review modern methods for measuring the effect of rain with wind on the surface erosion and reduction of the strength of brick and limestone; to critically analyze the best-known methods for assessing the degree of erosion of the surface of building materials; to offer recommendations for the protection and restoration of damaged facades of cultural heritage objects due to the wind-driven rain.

The significance of the obtained results for architects and designers is that the use of methods to assess the degree of damage to the facades of architectural monuments due to wind-driven rainfall makes it possible to monitor and develop measures to protect objects of cultural heritage.

Keywords: wind-driven rain, erosion of masonry, protection of facades of monuments.

Введение

Эрозия исторических строительных материалов, вызванная ветром и дождем, является глобальной проблемой. Эрозия разрушает материалы, повреждает поверхности объектов культурного наследия (ОКН), повышает риск проникновения воды в пористые материалы [1-3]. Большое количество осадков, особенно в более теплом климате, увеличивает коррозию металлов и стекловидных материалов и отслаивание поверхности карбонатных камней, например известняка и мрамора [4]. Коррозия вызывает постепенное ухудшение свойств материалов под действием воды, обычно вместе с отложением солей (обычно хлоридов), что более распространено в присутствии кислотных дождей, и более высоких атмосферных концентраций углекислого газа (CO_2) для карбонатных камней.

Кислотные дожди встречаются во многих странах мира, но наиболее подвержены им те регионы, где высокий уровень промышленного загрязнения воздуха. Среди таких стран можно назвать Соединенные Штаты и Канаду, Восточную Европу, включая Польшу, Германию, Чехию, Швецию, Норвегию и Финляндию, а также Китай и Индию. Кислотные дожди причиняют серьезный ущерб окружающей среде и культурному наследию этих стран. Для фасадов зданий в странах, где ожидается увеличение количества осадков (например, в северной Европе), существует риск того, что это вызовет еще большую коррозию каменных поверхностей зданий из портландского известняка и низкопористых карбонатных пород, таких как мрамор и плотный известняк. «Чистые» осадки имеют pH около 5,6 (слегка кислые из-за углекислого газа в атмосфере) и вызывают деградацию карбонатных камней – явление, известное как карстовый эффект. Поскольку атмосферная концентрация CO_2 увеличивается из-за деятельности человека, ученые предсказывают увеличение регрессии карста карбонатных камней из-за дальнейшего окисления осадков. Коррозию каменных поверхностей исторических зданий часто связывают с загрязнением окружающего воздуха. Загрязнение воздуха включает диоксид серы (SO_2) и оксиды азота (NO_x), которые реагируют с водой и образуют серную и азотную кислоты. Их присутствие может еще больше снизить pH дождевой воды, вызывая кислотные осадки [5, 6].

Изменения влажности влияют на рост микроорганизмов на каменных и деревянных материалах памятников архитектуры. Ряд исследований показывают, что увеличение относительной влажности в более теплом климате усугубляет биологическую деградацию ОКН. Длительные периоды влажности вместе с повышением температуры создают условия, благоприятные для увеличения биологической активности, способствующих разрушению деревянных исторических зданий из-за накопления и разложения биомассы грибами, водорослями, плесенью и лишайниками, а также насекомыми. Исследователи определяют температуру, влажность воздуха и содержание влаги в древесине в качестве трех основных переменных, ведущих к биологическому износу из-за грибов, плесени и насекомых, при этом на содержание влаги в древесине влияют увеличение количества осадков, ветро-дождевая нагрузка и наводнения [7-10].

Когда стены намокают под осадками или из-за подсоса влаги из грунта, вода проникает в поры кирпича и раствора. Растворимые соли могут растворяться и рекристаллизоваться при изменении температуры и влажности, создавая циклы кристаллизации соли. Соли будут выходить из пор на поверхность стены и образовывать белый или цветной налет – высолы. Некоторые соли могут изменять свою структуру во время цикла гидратации и дегидратации, например, сульфат натрия (тенардит) и декагидрат сульфата натрия (мирабилит). Фаза мирабилита может оказывать очень высокое кристаллизационное давление на поры в камне, такие повторяющиеся циклы могут вызвать стресс и, в конечном итоге, разрушение. Колебания осадков и температуры при наличии растворимых солей в каменных материалах приведут к увеличению числа циклов кристаллизации солей и, следовательно, к большему ущербу ОКН. Содержание солей в

строительном материале или конструкции также может увеличиваться за счет увеличения количества осадков, что приводит к насыщению почв в сочетании с капиллярным действием. Даже небольшие колебания относительной влажности могут оказать существенное влияние на количество циклов кристаллизации вредных солей. Когда относительная влажность падает ниже точки растворения некоторых растворимых солей, они переходят из раствора в кристаллическую фазу. Механизм повреждения заключается в том, что при кристаллизации солей изменение объема оказывает механическое воздействие на исторические строительные материалы (например, субфлоресценция) [11, 12].

Эрозия поверхности является обычным явлением, наблюдаемым на фасадах исторических зданий. В последнее время исследования изменения климата и его возможного влияния на увеличение количества экстремальных осадков возродили научный интерес к определению риска ускоренных эрозионных эффектов. В зарубежных исследованиях воздействие косого дождя (ВКД или WDR – Wind-driven rain), рассматривается как один из важных факторов при проектировании прочных и устойчивых к изменению климата зданий. Согласно классификации ГОСТ Р 53613-2009, косой дождь является сочетанием дождя и ветра. Негативные последствия проникновения влаги, вызванные ВКД, включают деградацию материала поверхности, повреждение от мороза, выцветание от солей, структурное растрескивание, внутренние повреждения и т.д. Нагрузки из-за ВКД на фасады зданий пропорциональны осадкам и представляют собой основной источник влаги и эрозионное физическое воздействие на фасады зданий. Исходя из этого, исследование методов оценки, которые количественно определяют серьезность эрозии, является важным шагом для разработки рекомендаций по защите и реставрации поврежденных фасадов ОКН [13-17].

На сегодняшний день для измерения и моделирования ВКД на фасады зданий исследователями предлагаются следующие методы: экспериментальные, полуэмпирические и численные с помощью вычислительной гидродинамики (ВГД или CFD – Computational Fluid Dynamics) [18, 19]. Основное преимущество экспериментальных методов в том, что они позволяют проводить исследования влияния ВКД на объект в реальных условиях (что повышает достоверность результатов) и проверять полуэмпирические и численные методы [13, 20]. Авторами в рамках данной работы, на основе анализа исследований последних лет, рассматриваются наиболее известные и общепризнанные за рубежом экспериментальные методы оценки ВКД на поверхности фасадов ОКН.

Актуальность исследования обусловлена тем, что эрозия поверхности строительных материалов является распространенным явлением, наблюдаемым на фасадах памятников архитектуры. Деструктивное воздействие внешней среды приводит к ухудшению внешнего вида, снижению прочности и долговечности материалов, а также к повышению риска развития плесени и повышения влажности внутри помещений. Климатические изменения могут привести к увеличению частоты и интенсивности экстремальных осадков, что может усилить эрозионные эффекты на фасадах зданий из-за ВКД.

Целью исследования является сравнение экспериментальных методов оценки степени эрозии поверхности строительных материалов из-за ВКД.

Задачами исследования являются:

- обзор современных методов измерения влияния ВКД на поверхностную эрозию и снижение прочности кирпича и известняка;
- критический анализ наиболее известных методов оценки степени эрозии поверхности строительных материалов из-за ВКД;
- предложение рекомендаций по защите и реставрации поврежденных фасадов объектов культурного наследия из-за ВКД.

Модели и методы

На основе анализа исследований последних лет, можно выделить следующие наиболее известные и признанные экспериментальные методы оценки степени эрозии поверхности исторических строительных материалов из-за ВКД:

1. Натурное измерение ВКД в определенных местах на фасаде здания позволяющее оценить воздействие ВКД на поверхность и риски эрозии. Для этого используются специальное оборудование для сбора метеорологических данных, датчики и коллекторы дождя [13]. На следующем этапе, для проверки данных полевых измерений и прогнозирования ВКД предлагается использование численного моделирования с помощью программного комплекса ВГД [14].

2. Использование в лабораторных условиях системы имитирующей ВКД для образцов строительных материалов на испытательном стенде, позволяющее проводить контролируемые эксперименты с разными типами покрытий фасадов. Для имитации ВКД применяются специальные насосы и форсунки. Фиксации данных производится с помощью высокоскоростной камеры, цифрового и компьютерного оборудования. После испытания образцы диагностируются на степень деградации поверхностной структуры и определяется остаточная прочность материалов [15].

Метод натурных измерений ВКД

Замеры ВКД производились на высотном здании, построенном в 1930-х годах облицованном натуральным камнем из известняка [13]. Целью данной работы являлось исследование влияния ВКД на образование эрозии на поверхности фасадов зданий и разработки эффективных методов защиты. Работа проводилась в 42-этажном здании на территории кампуса Университета Питтсбурга (Пенсильвания, США). Наблюдались процессы осаждения загрязняющих веществ и смыва дождем на поверхности фасада объекта. В исследовании использовались метеорологические записи, данные о концентрации SO_2 (диоксид серы) в воздухе за несколько десятилетий. Также фиксировались текущие данные по сульфатам, элементарному углероду и числовой концентрации частиц. Замеры дождя на поверхности стен фасада производились в 16 местах в течении 21 месяца. За период измерения было зафиксировано 94 дождевых осадков. Каждая измерительная установка состояла из вертикального листа ПВХ размером 620х620 мм с квадратным желобом 40 мм. Дождевая вода, попадая на лист ПВХ, стекала в желоб и стекала в коллектор. Двенадцать коллекторов находились на 5-м этаже, а четыре дополнительных – на 16-м этаже (см. рисунок 1).

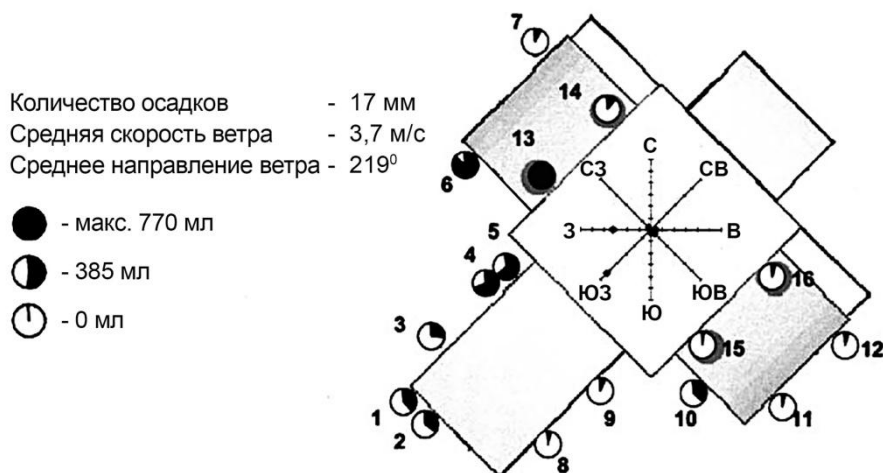


Рисунок 1 – План обследуемого здания. Пример сбора данных:
 1-16 – места установки коллекторов для сбора дождевой воды [13]

На рисунке 1 показан пример сбора данных, показывающий зависимость объема дождя (круговая диаграмма) от направления ветра и места измерения. Каждая пронумерованная круговая диаграмма показывает объем дождевой воды. Места были выбраны, чтобы определить количество падающих ветром дождевых стен, которые обращены в разные стороны на двух высотах. Некоторые коллекторы были расположены в загрязненных, черных местах на стенах фасада, а другие – в эродированных белых местах. Объем дождевой воды, собранной в каждом месте, измеряли вручную мерным цилиндром после каждого дождя. Эти измерения проводились в течение 24 часов после окончания дождя, чтобы свести к минимуму потери от испарения. Метеорологические данные собирались автоматической метеостанцией, состоящей из дождемера с опрокидывающимся ковшом, чашечного анемометра, флюгера и регистратора данных. Регистратор данных с интервалом в 15 минут фиксировал интенсивность осадков, среднюю скорость, частоту и направления ветра по восьми румбам.

Метод измерений ВКД на испытательном стенде

Для того, чтобы понять реакцию различных кладочных материалов на удары капель воды при ВКД, были выбраны исторические глиняные кирпичи ручной резки (19 век), обожженные глиняные кирпичи, необожженные глиняные кирпичи и известковый раствор [15]. Основная цель испытания заключалась в исследовании степени воздействия, под давлением направленного воздушного потока, капель воды определенного диаметра, скорости и угла удара на различные материалы каменной кладки. Диаметры капель 1,95 мм, 3,07 мм и 4,06 мм были сочтены подходящими и достаточно консервативными для испытаний, поскольку они в значительной степени способствовали эрозионной энергии и также использовались в других подобных исследованиях [21]. Капли различного диаметра выпускались через иглы для инъекций или бюретки на испытуемые образцы кладочных материалов с высоты 2,1 м, 3,2 м и 4,0 м. Для фиксации влияния угла удара капель, образцы кладки помещались на наклонные поверхности испытательного стенда 5° , 15° , 25° , 35° и 45° относительно вертикали. Углы регулировались цифровым угломером. Чтобы зафиксировать поведение и определить скорость удара капель использовалась высокоскоростная камера. Съемку производили с частотой 2000 кадров в секунду и разрешением 256-300 пикселей, что было достаточно для фиксации поведения падающих капель (см. рисунок 2).

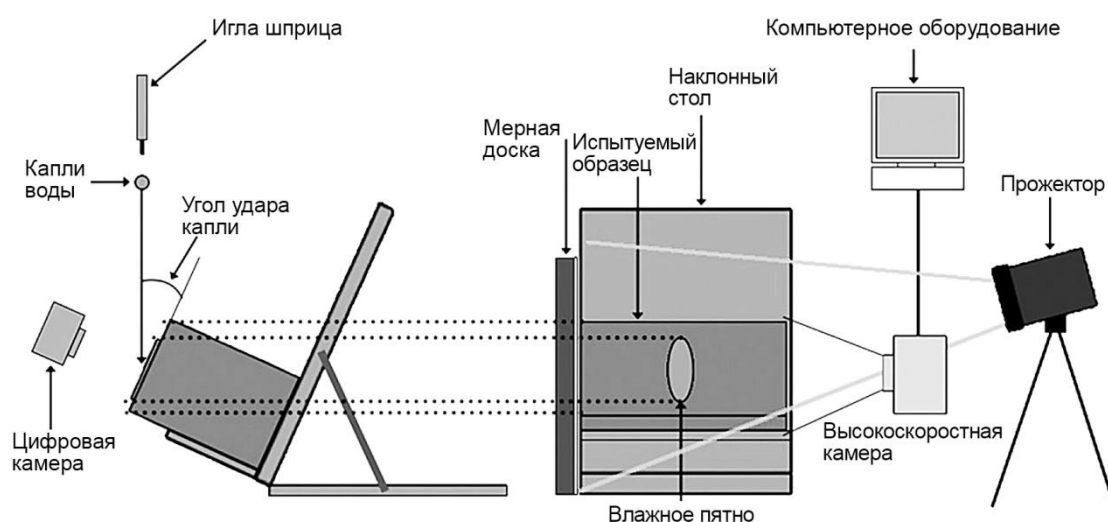


Рисунок 2 – Схема испытательной установки

Для уточнения результатов удара каждого размера капли, эксперимент проводился дважды на 2-х образцах одного и того же материала. Фиксировались доминирующие поведения капель при ударе, такие как прилипание, разбрызгивание, отскок или стекание, происходящие в течение нескольких миллисекунд. Данные показатели рассматривались как определяющие для получения результатов, позволяющие учитывать смачиваемость поверхности, шероховатость и пористость строительных материалов. На основе отпечатков от капель воды на испытанных образцах кладочных материалов после удара, рассчитывалось значение соотношения сторон пятна для каждой капли.

Результаты исследования и их анализ

На основании результатов, полученных с применением натуральных измерений ВКД можно сделать следующие выводы [13]:

- неравномерность эрозии, степень загрязнения поверхности фасадов здания связана с неоднородностью распределения, направлений ВКД из-за объёмно-планировочных особенностей строения;
- влияние ВКД зависит от локальных полей потока воздуха, связанных с геометрией здания, окружающей топографией и близости других препятствий;
- наибольшее количество дождя попадает на стену, обращенную против ветра, увеличивается с высотой здания и больше на угловых секциях, чем центральных;
- интенсивность ВКД, может быть лучшим индикатором эрозии поверхности здания, чем объем выпавших осадков.

В рамках исследования, дополнительно было проведено численное моделирование влияния ВКД с использованием ВГД, включающее следующие вычисления: расчет поля воздушного потока вокруг здания, определение траекторий капель дождя и оценку общего ВКД на основе метеорологических данных [14]. Данные численного моделирования согласуются с результатами полевых испытаний.

Измерения ВКД на различные материалы каменной кладки в лабораторных условиях демонстрируют следующее [15]:

- степень воздействия капель воды определенного диаметра, скорости и угла удара. Это помогает понять тенденцию высвобождения энергии капель воды на поверхности материалов;
- количество воды, удерживаемое поверхностью образца после удара капли. Во время дождя не все капли прилипают к поверхности и представляют собой источник влаги для стены. Часть капель после удара о поверхность отскакивают или разбрызгиваются;
- увеличение размера капли воды приводит к большему разбрызгиванию и стеканию после удара о поверхность;
- влияние шероховатости поверхности материала на поглощение влаги при ударе капель дождя. Чем шероховатее поверхность, тем больше происходит разбрызгивание капель;
- максимальный выброс кинетической энергии, инициирующий потенциальное истощение поверхности материала, происходит при угле воздействия капли 90° (перпендикулярно стене);
- интенсивность эрозии поверхности и снижения прочности материала в зависимости от параметров дождя и свойств материалов.

Сравнительная характеристика методов оценки ВКД на фасад здания представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнительная характеристика методов оценки ВКД на фасад здания

Наименование показателя	Метод натурных измерений ВКД	Метод измерений ВКД на испытательном стенде
Вид испытаний	Натурные, эксплуатационные	Лабораторные, стендовые
Предмет исследования	Влияние ВКД на сохранность фасадов зданий из известняка [13].	Влияние ВКД на фасады исторических зданий, включая поверхностную эрозию и снижение прочности образцов строительных материалов – обожженного и необожженные глиняных кирпичей, известкового раствора [15].
Сущность метода	Измерение ВКД, исходя из геометрии здания, на разных уровнях с учётом направления. Сравнение объема дождевой воды со степенью эрозии стен фасада.	Использование имитатора ВКД для воспроизведения условий, позволяющих проводить контролируемые эксперименты с каплями воды разного размера с разной скоростью удара на ряд кладочных материалов с разной шероховатостью поверхности и характеристикой влагопоглощения при разных углах падения.
Входные параметры	- Метеорологические данные; - скорость и направление ветра; - интенсивность дождя; - геометрические параметры здания (конфигурация, высота, форма кровли). - расположение и ориентация поверхности, на которую падают осадки.	- Количество осадков; - размер капель, скорость, сила и угол удара; - ориентация образца относительно направления воздушного потока.
Выходные параметры	- Количество дождевых осадков, попадающих на фасад здания и их распределение; - параметры, влияющие на обесцвечивание и эрозию материалов; - деструктивное влияние ВКД на фасад здания исходя из геометрии объекта и сторон света.	- Количественная оценка риска эрозии и снижения прочности каменных материалов фасадов исторических зданий от ВКД; - изменение влагопоглощения, поверхностной шероховатости, механических свойств материалов.
Достоверность результатов	Результаты исследования ограничены точностью и недостаточным учетом многих факторов, и требуют дополнительных исследований для подтверждения.	На достоверность результатов влияет ряд субъективных факторов: квалификация оператора, его техническая и практическая подготовка, точность средств измерений, а также выбранная методика проведения экспериментов.
Преимущество метода	- Возможность получения данных о ВКД на здание в реальных условиях; - наглядная оценка влияния ВКД на поверхность фасада здания.	Возможность экспериментировать с различными условиями ВКД и строительными материалами исходя из технических возможностей лаборатории.
Ограничения и недостатки метода	- Ограниченный объем собранных данных; - сложность определения влияния отдельных параметров; - проблема выбора оптимальной продолжительности временного интервала исследования; - отсутствие учета влияния других факторов (загрязнение воздуха и воздействие ультрафиолетового излучения и т.д.); - требует больших затрат времени и ресурсов.	- Ограниченные возможности для имитации ВКД; - имитационное ВКД, созданное в лабораторных условиях, может отличаться от фактического; - определенный набор тестов на изменение физико-технические свойств строительных материалов от ВКД; - индикатор соотношения сторон пятен падающих капель на образец не даёт информации о количестве налипшей, проникающей или стекающей воды. - периодическая проверка средств измерений.

Мониторинг метеорологических данных является важным инструментом для оценки ВКД на фасад здания, имеющего историческую ценность. Данный мониторинг позволяет определить частоту, интенсивность и продолжительность ВКД для данной местности. Это может помочь инженерам, архитекторам и реставраторам спрогнозировать возможные негативные ситуации и определить требуемые первоочередные меры защиты для сохранения ОКН от ВКД (см. рисунок 3).

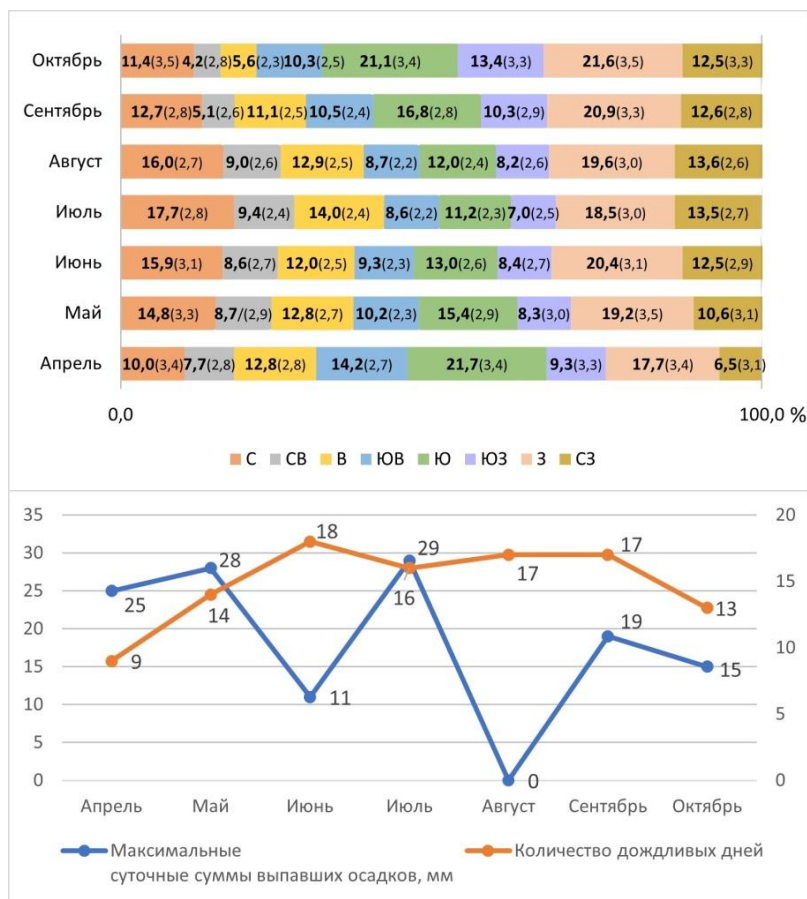


Рисунок 3 – Метеорологические данные для оценки ВКД на здание (г. Казань, Россия)¹

На рисунке 3 представлены метеорологические данные для оценки ВКД на здание на примере г. Казани. Расположение метеорологической станции: широта – 55.73, долгота – 49.20, высота над уровнем моря – 119 м. Для оценки ВКД приняты данные периода с положительными средними месячными температурами (апрель-октябрь). На линейчатой диаграмме отражены повторяемость (%) и скорость ветра (м/с, данные указаны в скобках) при различных направлениях ветра. Цветом наглядно обозначены преобладающие ветра в указанный период для данной местности. На комбинированном графике представлены максимальные суточные суммы выпавших осадков (мм) и количество дождливых дней.

Регулярный мониторинг, обслуживание и реставрация являются неотъемлемым основанием для сохранения ОКН. Разработка мер по защите фасадов памятников историко-архитектурного наследия от ВКД – это сложный и многогранный процесс, который требует тщательных исследований и учета множества факторов:

- историческое значение памятника и его уникальность, так как некоторые методы консервации могут негативно влиять на оригинальность и аутентичность ОКН;
- климатические условия региона, интенсивность атмосферных воздействий;

¹ Научно-прикладной справочник «Климат России». ВНИИГМИ-МЦД. URL: <http://aisori-m.meteo.ru/climsprn> (дата обращения: 01.01.2023).

- конструктивные особенности объекта, которые могут повлиять на выбор технических решений при реставрации;
- тип исторических строительных материалов, от которых зависит уровень сопротивления атмосферным воздействиям, долговечность и определение подходов к консервации;
- степень повреждения объекта – например для фасадов с небольшими повреждениями достаточно применять методы профилактики и регулярного ухода, в то время как при серьезных дефектах может потребоваться капитальный ремонт;
- финансовые затраты – технически сложные методы консервации могут быть слишком дорогостоящими.

Авторами предлагаются следующие основные способы по защите фасадов зданий ОКН от ВКД.

В последние десятилетия интерес к разработке защитных покрытий для ОКН значительно возрос. В основном это вызвано повышением требований к сохранению ОКН, что, соответственно, определило разработку новых защитных продуктов, с использованием научно-технических достижений. В настоящее время, результаты исследований в области защитных покрытий для фасадов памятников архитектуры сделали большой шаг вперед – от акриловых смол, использовавшихся в конце прошлого века, до применения биоматериалов и наночастиц.

Защитные покрытия для фасадов ОКН должны соответствовать следующим основным критериям:

- эффективно предохранять от воздействия окружающей среды;
- быть совместимыми с аутентичным материалом;
- сохранять первоначальный внешний вид, цвет, прочность и долговечность исторического материала; минимизировать риск повреждения и коррозии;
- предоставлять возможность легкой очистки и ухода за поверхностью здания;
- исключать токсичность состава; обладать длительным сроком службы.

На сегодняшний день можно выделить следующие инновационные защитные покрытия для фасадов зданий от деструктивных воздействий окружающей среды [22]:

- гибридные органо-неорганические золь-гели, обладающие прозрачностью, водоотталкивающими свойствами, оптимальной степенью эластичности и стабильностью при тестах на износ и коррозию;
- силиконовые соединения, демонстрирующие хорошие антикоррозионные свойства;
- биопленки и биополимеры, применяемые для защиты строительных материалов от загрязнений, которые при необходимости легко удаляются;
- наночастицы используемые для улучшения защитных свойств покрытий.

Перспективным направлением является применение защитных покрытий фасадов от ВКД, созданных с использованием нанотехнологий. Преимущество нанопокрывтий, в том, что их применение содействует приобретению строительным материалам ряда важных свойств: устойчивости к атмосферным воздействиям, ультрафиолетовому излучению, механическим повреждениям; воздействию экстремальных температур; водо- и грязеотталкиванию; воздухопроницаемости и экологичности; препятствию распространения плесени, грибка, микроорганизмов. Например, исследования подтверждают эффективность использования гидрофобных покрытий на основе полимеров и наночастиц оксидов TiO_2 (диоксид титана) или SiO_2 (диоксид кремния) для защиты фасадов памятников архитектуры из камня от воздействия негативных факторов внешней среды [23]. Применение нанопокрывтий, на сегодняшний день, ограничено их высокой стоимостью, сложностью производства и требованиями дополнительной экспертной оценки.

При принятии решения о том, какое защитное покрытие для защиты фасада исторического здания от ВКД использовать, реставратору необходимо учитывать следующие

основные факторы: климатические условия региона; возраст, состояние, строительный материал, характерные особенности фасада, декоративных деталей; ожидаемый срок службы покрытия и др. Сравнительный анализ различных покрытий может помочь выбрать оптимальный вариант исходя из конкретных требований проекта реставрации.

ВКД как значительный источник влаги способствует эрозии растворных швов и приводит к увеличению влагопереноса в толщу каменной кладки. Соответственно, в качестве меры по уменьшению проникновения влаги/воды, связанного с ВКД, эффективен способ, заключающийся в реставрации швов эродированного раствора [24]. При этом важно учитывать состав и историческую технологию изготовления заменяемых материалов. Включение в конструкцию новых составов, принципиально различающихся по физико-механическим и химическим свойствам, может привести к деструкции исторического строительного материала. При анализе состава оригинального раствора необходимо использовать химические или петрографические методы. Некоторые исторические растворы, особенно, в зданиях, построенных в 19 веке, были окрашены, чтобы соответствовать цвету кирпича, камня или контрастировать с ними. Наиболее используемые в прошлом пигменты молотый кирпич и уголь. При реставрации в составе пигментов, чтобы предотвратить выцветание и блеклость, возможно использовать синтетические минеральные оксиды, которые устойчивы к щелочам и солнечному свету. Реставрация швов кладки, является трудоемкой и дорогостоящей мерой, но оправданной для ОКН [25].

Одним из способов эффективной защиты фасадов исторических памятников от ВКД является поддержание в надлежащем состоянии карнизных свесов кровли здания. При этом необходимо учитывать климатические условия района строительства, такие как интенсивность осадков, преобладающая скорость, направление и угол воздействия ветра. Свес особенно эффективен и значительно снижает воздействие ВКД на верхнюю часть фасада строения. Большой свес обеспечивает лучшую защиту. Защитная зона может распространяться до 25 % высоты здания от линии крыши при вылете 0,6-1,2 м. Учитывая, что более 50 % общего количества осадков, падающих на фасад, приходится на верхние 15 % поверхности стены, свесы, которые могут укрыть до 30 % строения, являются лучшей защитой от ВКД. Эффективность возрастает при косых ветрах, но снижается с увеличением скорости ветра [26].

Деревья, как естественные барьеры, причем не затрагивающие аутентичность ОКН, могут иметь важное значение при защите фасадов зданий от ВКД. Однако, для эффективного использования деревьев в качестве барьера от ВКД необходимо учитывать следующие факторы:

- климатические условия региона – метеорологические данные и особенности местности. Например, если местность характеризуется частыми дождями или сильными ветрами, то необходимо подобрать наиболее подходящие деревья, которые могут выдерживать такие условия;
- скорость и направление ветра – растения, размещенные вблизи зданий, могут оказывать влияние на скорость и направление ветра вокруг зданий. Деревья должны быть размещены таким образом, чтобы создавать наиболее эффективный барьер от ВКД. Также, необходимо учитывать характеристики конкретных видов растений, такие как высота, ширина кроны, густота листвы и т.д.;
- интенсивность дождя – определенные виды растений могут лучше защищать здание от сильных ливней. Например, деревья с плотной листвой и кроной могут обеспечить более эффективную защиту, чем деревья с разреженной листвой;
- ориентация и геометрия здания – при посадке деревьев необходимо учитывать конфигурацию здания, ориентацию фасадов по сторонам света и повторяемость различных направлений ветра для данной местности.

Выводы

По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

1. На основе анализа современных исследований, были выделены наиболее известные методы оценки степени эрозии поверхности строительных материалов из-за ВКД.
2. Проведён критический анализ рассмотренных методов с учётом репрезентативности получаемых результатов.
3. Предложены рекомендации по защите и реставрации поврежденных фасадов объектов культурного наследия из-за ВКД.
4. Данная работа может послужить основой для дальнейшей апробации методов учета ВКД при реконструкции и реставрации ОКН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Haugen A., Mattsson J. Preparations for climate change's influences on cultural heritage // *International Journal of Climate Change Strategies and Management*. 2011. Vol. 3. No. 4. Pp. 386–401. doi:10.1108/17568691111175678
2. Brimblecombe P., Grossi C. M., Harris I. Climate change critical to cultural heritage // *Survival and sustainability: environmental concerns in the 21st century*. 2011. Pp. 195–205. Springer.
3. Sesana E., Gagnon A., Ciantelli C., Cassar J., Hughes J. Climate change impacts on cultural heritage: A literature review // *WIREs Climate Change*. 2021. No. 12 (1). 29 p. doi:10.1002/wcc.710
4. Camuffo D. Climate change, human factor, and risk assessment // *Microclimate for cultural heritage*. 2019. Pp. 303–340. Elsevier.
5. Spezzano P. Mapping the susceptibility of UNESCO World Cultural Heritage sites in Europe to ambient (outdoor) air pollution // *Science of The Total Environment*. 2021. Vol. 754. 142345. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.142345
6. Vidović K., Hočevar S., Menart E., Drventić I., Grgić I., Kroflič A. Impact of air pollution on outdoor cultural heritage objects and decoding the role of particulate matter: a critical review // *Environmental Science and Pollution Research*. 2022. Vol. 29. Pp. 46405–46437. doi:10.1007/s11356-022-20309-8
7. Cutler N.A., Viles H.A., Ahmad S., McCabe S., Smith B. J. Algal «greening» and the conservation of stone heritage structures // *Science of the Total Environment*. 2013. Vol. 442. Pp. 152–164. doi:10.1016/j.scitotenv.2012.10.050
8. Строганов В.Ф., Бойчук В.А., Сагадеев Е.В. Биоповреждение древесных материалов и конструкций // *Известия КГАСУ*. 2014. № 2 (28). С. 185–193.
9. Строганов В.Ф., Сагадеев Е.В., Вахитов Б.Р. Применение модельных сред для оценки биостойкости минеральных строительных материалов // *Известия КГАСУ*. 2017. № 3 (41). С. 196–202.
10. Prieto B., Vázquez-Niño D., Fuentes E., Durán-Román A.G. Response of subaerial biofilms growing on stone-built cultural heritage to changing water regime and CO₂ conditions // *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2020. Vol. 148. 104882. doi:10.1016/j.ibiod.2019.104882
11. Бессонов И.В., Баранов В.С., Баранов В.В., Князева В.П., Ельчищева Т.Ф. Причины появления и способы устранения высолов на кирпичных стенах зданий // *Жилищное строительство*. 2014. № 7. С. 39–43.
12. Menéndez B. Estimators of the impact of climate change in salt weathering of cultural heritage // *Geosciences*. 2018. No. 8 (11). Pp. 401. doi:10.3390/geosciences8110401
13. Tang W., Davidson C.I., Finger S., Vance K. Erosion of limestone building surfaces caused by wind-driven rain: 1. Field measurements // *Atmospheric Environment*. 2004. Vol. 38. Issue 33. Pp. 5589–5599. doi:10.1016/j.atmosenv.2004.06.030
14. Tang W., Davidson C.I. Erosion of limestone building surfaces caused by wind-driven rain: 2. Numerical modeling // *Atmospheric Environment*. 2004. Vol. 38. Issue 33. Pp. 5601–5609. doi:10.1016/j.atmosenv.2004.06.014
15. Erkal A., D'Ayala D., Sequeira L. Assessment of wind-driven rain impact, related surface erosion and surface strength reduction of historic building materials // *Building and Environment*. 2012. Vol. 57. Pp. 336–348. doi:10.1016/j.buildenv.2012.05.004
16. Никитин В.И., Кофанов В.А. Об учете косого дождя и капиллярных свойств материалов при оценке влагосодержания ограждающих конструкций // *Вестник БрГТУ. Строительство и архитектура*. 2013. № 1 (79). С. 91–95.
17. Куприянов В.Н., Петров А.С., Чебышева Д.Г. Влияние дождей на процесс старения и разрушения материалов наружных стен. Расчет количества дождей // *Эксперт: теория и практика*. 2020. № 1 (4). С. 28–32.
18. Blocken B., Dezsö G., Beeck J. van, Carmeliet J. Comparison of calculation models for wind-driven rain deposition on building facades // *Atmospheric Environment*. 2010. Vol. 44. Issue 14. Pp. 1714–1725. doi:10.1016/j.atmosenv.2010.02.011
19. Gholamalipour P., Ge H., Stathopoulos T. Wind-driven rain (WDR) loading on building facades: A state-of-the-art review // *Building and Environment*. 2022. Vol. 221. 109314. doi:10.1016/j.buildenv.2022.109314

20. Baheru T., Chowdhury A.G., Pinelli J.-P., Bitsuamlak G. Distribution of wind-driven rain deposition on low-rise buildings: Direct impinging raindrops versus surface runoff // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2014. Vol. 133. Pp. 27–38. doi:10.1016/j.jweia.2014.06.023
21. Abuku M., Janssen H., Poesen J., Roels S. Impact, absorption and evaporation of raindrops on building facades // *Building and Environment*. 2009. Vol. 44. Issue 1. Pp. 113–124. doi:10.1016/j.buildenv.2008.02.001
22. Artesani A., Di Turo F., Zucchelli M., Traviglia A. Recent Advances in Protective Coatings for Cultural Heritage – An Overview // *Coatings*. 2020. No. 10 (3). 217. doi:10.3390/coatings10030217
23. Pino F., Fermo P., Russa M.L., Ruffolo S., Comite V., Baghdachi J., Pecchioni E., Fratini F., Cappelletti G. Advanced mortar coatings for cultural heritage protection. Durability towards prolonged UV and outdoor exposure // *Environmental Science and Pollution Research*. 2016. No. 24 (14). Pp. 12608–12617. doi:10.1007/S11356-016-7611-3
24. Kahangi Shahreza S., Niklewski J., Molnár M. Experimental investigation of water absorption and penetration in clay brick masonry under simulated uniform water spray exposure // *Journal of Building Engineering*. 2021. Vol. 43. doi:10.1016/j.jobe.2021.102583
25. Apostolopoulou M., Aggelakopoulou E., Bakolas A., Moropoulou A. Compatible mortars for the sustainable conservation of stone in masonry // *Advanced Materials for the Conservation of Stone*. 2018. Pp. 97–123. Springer. doi:10.1007/978-3-319-72260-3_5
26. Ge H., Chiu V., Stathopoulos T. Effect of overhang on wind-driven rain wetting of facades on a mid-rise building: Field measurements // *Building and Environment*. 2017. Vol. 118. Pp. 234–250. doi:10.1016/j.buildenv.2017.03.034

REFERENCES

1. Haugen A., Mattsson J. Preparations for climate change's influences on cultural heritage. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*. 2011. Vol. 3. No. 4. Pp. 386–401. doi:10.1108/17568691111175678.
2. Brimblecombe P., Grossi C. M., Harris I. Climate change critical to cultural heritage. *Survival and sustainability: environmental concerns in the 21st century*. 2011. Pp. 195–205. Springer.
3. Sesana E., Gagnon A., Ciantelli C., Cassar J., Hughes J. Climate change impacts on cultural heritage: A literature review. *WIREs Climate Change*. 2021. No. 12 (1). 29 p. doi:10.1002/wcc.710.
4. Camuffo D. Climate change, human factor, and risk assessment. *Microclimate for cultural heritage*. 2019. Pp. 303–340. Elsevier.
5. Spezzano P. Mapping the susceptibility of UNESCO World Cultural Heritage sites in Europe to ambient (outdoor) air pollution. *Science of The Total Environment*. 2021. Vol. 754. 142345. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.142345
6. Vidović K., Hočevar S., Menart E., Drventić I., Grgić I., Kroflič A. Impact of air pollution on outdoor cultural heritage objects and decoding the role of particulate matter: a critical review. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022. Vol. 29. Pp. 46405–46437. doi:10.1007/s11356-022-20309-8
7. Cutler N.A., Viles H.A., Ahmad S., McCabe S., Smith B. J. Algal «greening» and the conservation of stone heritage structures. *Science of the Total Environment*. 2013. Vol. 442. Pp. 152–164. doi:10.1016/j.scitotenv.2012.10.050
8. Stroganov V.F., Boichuk V.A., Sagadeev E.V. Biodeterioration of wooden materials and structures. *Izvestiya KGASU*. 2014. No. 2 (28). Pp. 185–193.
9. Stroganov V.F., Sagadeev E.V., Vahitov B.R. Application of model mediums for the biostability assessment of mineral construction materials. *Izvestiya KGASU*. 2017. No. 3 (41). Pp. 196–202.
10. Prieto B., Vázquez-Nion D., Fuentes E., Durán-Román A.G. Response of subaerial biofilms growing on stone-built cultural heritage to changing water regime and CO2 conditions. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2020. Vol. 148. 104882. doi:10.1016/j.ibiod.2019.104882
11. Bessonov I.V., Baranov V.S., Baranov V.V., Knyazeva V.P., Elchischeva T.F. Reasons and eliminate efflorescence on the brick walls of buildings. *Housing Construction*. 2014. No. 7. Pp. 39–43.
12. Menéndez B. Estimators of the impact of climate change in salt weathering of cultural heritage. *Geosciences*. 2018. No. 8 (11). 401. doi:10.3390/geosciences8110401
13. Tang W., Davidson C.I., Finger S., Vance K. Erosion of limestone building surfaces caused by wind-driven rain: 1. Field measurements. *Atmospheric Environment*. 2004. Vol. 38. Issue 33. Pp. 5589–5599. doi:10.1016/j.atmosenv.2004.06.030
14. Tang W., Davidson C.I. Erosion of limestone building surfaces caused by wind-driven rain: 2. Numerical modeling. *Atmospheric Environment*. 2004. Vol. 38. Issue 33. Pp. 5601–5609. doi:10.1016/j.atmosenv.2004.06.014
15. Erkal A., D'Ayala D., Sequeira L. Assessment of wind-driven rain impact, related surface erosion and surface strength reduction of historic building materials. *Building and Environment*. 2012. Vol. 57. Pp. 336–348. doi:10.1016/j.buildenv.2012.05.004
16. Nikitin V.I., Kofanov V.A. On consider of driving rain and capillary properties of materials when assessing moisture enclosing structures. *Vestnik BrSTU. Construction and Architecture*. 2013. No. 1 (79). Pp. 91–95.

17. Kupriyanov V.N., Petrov A.S., Chebysheva D.G. Rain impact on aging and destruction of external walls materials. The amount of rain calculation. *Expert: Theory and Practice*. 2020. No. 1 (4). Pp. 28–32. doi:10.24411/2686-7818-2020-10004
18. Blocken B., Dezsö G., Beeck J. van, Carmeliet J. Comparison of calculation models for wind-driven rain deposition on building facades. *Atmospheric Environment*. 2010. Vol. 44. Issue 14. Pp. 1714–1725. doi:10.1016/j.atmosenv.2010.02.011
19. Gholamalipour P., Ge H., Stathopoulos T. Wind-driven rain (WDR) loading on building facades: A state-of-the-art review. *Building and Environment*. 2022. Vol. 221. 109314. doi:10.1016/j.buildenv.2022.109314
20. Baheru T., Chowdhury A.G., Pinelli J.-P., Bitsuamlak G. Distribution of wind-driven rain deposition on low-rise buildings: Direct impinging raindrops versus surface runoff. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2014. Vol. 133. Pp. 27–38. doi:10.1016/j.jweia.2014.06.023
21. Abuku M., Janssen H., Poesen J., Roels S. Impact, absorption and evaporation of raindrops on building facades. *Building and Environment*. 2009. Vol. 44. Issue 1. Pp. 113–124. doi:10.1016/j.buildenv.2008.02.001.
22. Artesani A., Di Turo F., Zucchelli M., Traviglia A. Recent Advances in Protective Coatings for Cultural Heritage – An Overview. *Coatings*. 2020. No. 10 (3). 217. doi:10.3390/coatings10030217
23. Pino F., Fermo P., Russa M.L., Ruffolo S., Comite V., Baghdachi J., Pecchioni E., Fratini F., Cappelletti G. Advanced mortar coatings for cultural heritage protection. Durability towards prolonged UV and outdoor exposure. *Environmental Science and Pollution Research*. 2016. No. 24 (14). Pp. 12608–12617. doi:10.1007/S11356-016-7611-3
24. Kahangi Shahreza S., Niklewski J., Molnár M. Experimental investigation of water absorption and penetration in clay brick masonry under simulated uniform water spray exposure. *Journal of Building Engineering*. 2021. Vol. 43. doi:10.1016/j.jobbe.2021.102583
25. Apostolopoulou M., Aggelakopoulou E., Bakolas A., Moropoulou A. Compatible mortars for the sustainable conservation of stone in masonries. *Advanced Materials for the Conservation of Stone*. 2018. Pp. 97–123. Springer. doi:10.1007/978-3-319-72260-3_5
26. Ge H., Chiu V., Stathopoulos T. Effect of overhang on wind-driven rain wetting of facades on a mid-rise building: Field measurements. *Building and Environment*. 2017. Vol. 118. Pp. 234–250. doi:10.1016/j.buildenv.2017.03.034

Информация об авторах:

Куприянов Валерий Николаевич

ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет», г. Казань, Россия, доктор технических наук, профессор кафедры архитектуры, член-корреспондент РААСН.
E-mail: kupriyanov@kgasu.ru

Хабибулина Альбина Гомеровна

ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет», г. Казань, Россия, кандидат экономических наук, доцент кафедры архитектуры.
E-mail: albgomer@mail.ru

Сулейманов Альфред Мидхатович

ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет», г. Казань, Россия, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительных материалов.
E-mail: sulejmanov@kgasu.ru

Information about authors:

Kupriyanov Valery N.

Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russia, doctor of technical sciences, professor of the department of architecture, corresponding member of the RAACS.
E-mail: kupriyanov@kgasu.ru

Khabibulina Albina G.

Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russia, candidate of economical science, associated professor of the department of architecture.
E-mail: albgomer@mail.ru

Suleymanov Alfred M.

Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russia, doctor of technical sciences, professor, head of building materials department.
E-mail: sulejmanov@kgasu.ru

О.В. ВОЛИЧЕНКО^{1,2}, Е.В. ГОЛОВИНА³

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

²ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж, Россия

³ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Россия

МОДЕЛЬ АНАЛИЗА ИСТОРИКО-АРХИТЕКТУРНЫХ ОБЪЕКТОВ

Аннотация. Рассматривается классическая модель анализа архитектурного объекта, представляющей собой триединство традиционных (универсальных), профессиональных (современных) и общенаучных методов исследования (методы смежных наук). Традиционные методы исследования включают в себя анализ и интерпретацию исторических исследований, архивных документов, рукописей и других источников. Профессиональные методы исследуют композиционные, художественные, градостроительные, архитектурно-тектонические и морфологические аспекты архитектурного объекта с применением современных технологий. Общенаучные методы используют междисциплинарные методы исследования из других областей знаний, таких как история, археология, архитектурная теория и практика, социология, психология, экономика и другие. Процесс формирования классических аналитических методов изучения объектов архитектуры протекал в рамках античной философии и эстетики – время становления и развития методологии анализа. Применение такого подхода при изучении научного метода обосновывается сложностью его организации. Уделяется внимание анализу аспектов восприятия памятников архитектуры. Наибольшая сложность историко-архитектурного анализа состоит в отражении принципа единства исторических явлений и событий и появлении архитектурных памятников, отражающих изменения в области экономики, социальном строе и культуре, показывающих стилевые особенности исторического периода в архитектуре. Анализ тенденций развития архитектурного объекта возможно на основе выявления элементов и структур, оказывающих влияние и не оказывающих, т.е. выявление мертвых и живых тканей архитектурно-градостроительных объектов. В заключении статьи подчеркивается важность проведения анализа историко-архитектурных объектов для сохранения исторического наследия и культурной ценности сооружений.

Ключевые слова: методика анализа, модель, объективный анализ, количественный анализ, качественный анализ, система восприятия.

O.V. VOLICHENKO^{1,2}, E.V. GOLOVINA³

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

²Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

³South-West State University, Kursk, Russia

MODEL OF ANALYSIS OF HISTORICAL AND ARCHITECTURAL OBJECTS

Abstract. The purpose of the study is to consider the classical model of the analysis of an architectural object, which is a trinity of traditional (universal), professional (modern) and general scientific research methods (methods of related sciences). Traditional research methods include the analysis and interpretation of historical research, archival documents, manuscripts and other sources. Professional methods include examination, engineering analyses and research using modern technologies. General scientific research methods include the use of knowledge from various scientific disciplines, such as history, archaeology, architectural theory and practice, sociology, psychology, and others. The process of formation of classical analytical methods for studying architectural objects took

place within the framework of ancient philosophy and aesthetics. formation and development of the analysis methodology. Structural analysis involves the consideration of the scientific method as a system of its constituent elements and the principles of interaction of these elements, the study of their interrelationships. The application of this approach in the study of the scientific method is justified by the complexity of its organization. Attention is paid to the analysis of aspects of the perception of architectural monuments. The structure of the method of historical and architectural research allows us to show the theoretical foundations of a special research method that establishes a link between the categories of general and particular in the methodology of architectural monuments, analyze historical and architectural data in the context of their general significance and specific features. In conclusion, the article emphasizes the importance of analyzing historical and architectural objects for the preservation of historical heritage and cultural value of buildings.

Keywords: *analysis technique, model, objective analysis, quantitative analysis, qualitative analysis, perception system.*

Введение

Архитектура, выступая как пространственное выражение форм человеческой жизнедеятельности, точно запечатлевает характерный для каждого времени «дух эпохи». «Архитектурные и градостроительные памятники обладают значительным информационным потенциалом, что является сильным побудительным туристским мотивом. Воздействие художественной стороны историко-архитектурных памятников реализуется через восприятие, способствует повышению культурного уровня людей, формированию всесторонне развитой личности» [1, с. 6]. С другой стороны, развитый в культурном отношении человек обладает большими возможностями эстетического восприятия, в том числе восприятия историко-архитектурных памятников. Детализированный уровень восприятия чаще всего встречается в профессиональной практике архитектора и представляет собой один из путей изучения историко-архитектурных памятников с целью конкретизации их содержания или развития профессионализма. Проблемы разбора архитектурной формы и пространства, функции и конструкции памятников архитектуры рассматриваются в рамках методики архитектурного анализа. Разработанная системная модель анализа историко-архитектурных памятников (рисунок 1) включает в себя:

- 1) традиционные методы (исторический обзор);
- 2) современные методы (XX век);
- 3) смежные методы.

Методы и модели исследования

Самым первым и простым способом аналитического видения вещей, который изобрел древний человек, является *дихотомный анализ*, т.е. разделение вещей на две взаимно противоположные части и сравнение их между собой. Это служило основой традиционной организации и восприятия древним человеком своего окружения за счет расчленения его на ряд оппозиций: свое – чужое, безопасное – опасное, сакральное – обыденное и т.д. Исследования памятников архаической культуры показали, что в объемно-пространственном построении первобытных жилищ, погребальных сооружений и поселений легко «прочитываются» чаще всего симметричные формы-модели, образованные из прямоугольника, квадрата и круга. Можно сказать, что архаическое мышление в «моделировании» пространственно-пластических форм вещей породило своеобразный способ воспроизведения живых органических форм на основе геометрических схем, которые воспринимались в качестве символов реальных предметов и явлений.

Архаические схемы были полностью изжиты в архитектуре Древней Греции. В философско-эстетических трактатах Древней Греции впервые нашли отражение почти все направления художественного анализа и синтеза. Методы архитектурного анализа впервые были изложены в работах Витрувия. Он считал, что критерием анализа архитектуры зданий является соответствие спроектированного или построенного объекта выбранной модели,

образцу или каноническим требованиям по пропорционированию. При этом он установил многоуровневый критерий анализа качества архитектурного произведения:

- а) общественные строения – функция;
- б) технические достоинства – прочность и долговечность;
- в) оптические достоинства – обозреваемость;
- г) математические достоинства – геометрическая закономерность.

Сократ природу прекрасного в искусстве связывал с целесообразностью, т.е. произведение искусства должно приносить, с одной стороны, духовную пользу, с другой, составные части произведения должны выполнять определенную целевую функцию. Отсюда, в процессе анализа необходимо выявлять данные аспекты. По мнению Платона, основу деятельности архитектора составляет «искусство счисления, измерения и взвешивания» [2, с. 45]. Такое искусство пользуется точными измерениями, пропорциями, поэтому оно представляет собой прямое применение арифметики и геометрии. Платон считал, что адекватный анализ художественного произведения невозможен для воспринимающего, красоту можно постичь, лишь находясь в состоянии творческого экстаза или при помощи мистического духа. Научно-эстетические основы анализа сумел заложить Аристотель. По его мнению, к существенным признакам прекрасного относятся: порядок в пространстве, соразмерность, определенность, ограниченность и единство в многообразии. Произведение искусства является целостностью, из которой нельзя отнять ни одной части, не нарушая данную гармонию. Он считал, что искусством владеет лишь тот, кто, создавая произведения, знает цель и средство созидательной деятельности. Аристотель, в противоположность Платону, полагал, что искусство нужно и должно изучать.



Рисунок 1 - Модель методики анализа

В период средневековья оценка художественно-композиционного качества произведений архитектуры принадлежала целиком богословам и аристократической знати. Главным направлением в осмыслении и анализе архитектурных сооружений было изучение и объяснение символического смысла художественной формы.

В эпоху Возрождения, классицизма и особенно в Новое время начали впервые рассматривать архитектуру не только как пластическое искусство, но и как своеобразную науку. В архитектурном творчестве важно не только ремесленно-строительное, художественное мастерство, но и специальное знание (из области геометрии, химии, механики и т.п.). Значит, архитектор должен владеть методами научного анализа и использовать его в своем творчестве.

Современные методы. В XX веке сложились различные методики архитектурного анализа. Разработкой *«объективного анализа»* в архитектуре занимались Н. Ладовский, А. Ефимов, В. Кринский и др. В основу метода положен экспериментальный анализ свойств и качеств архитектурной формы, формальных архитектурных принципов и законов. Объективные психофизиологические закономерности восприятия человеком архитектурных форм, пространства и цвета легли в теоретические и проектные предложения Н.А. Ладовского о рациональных основах восприятия архитектурной формы.

Архитектурно-формальный анализ, предусматривающий создание новых рациональных методов проектирования, предложили братья Веснины и М.Я. Гинзбург. Для изучения внутренних закономерностей архитектурной формы нужно использовать метод сопоставительного анализа (Веснины). М.Я. Гинзбург считал, что конструктивизм как метод предполагает всесторонний «художественно-научный анализ» архитектурной формы и обуславливающих ее компонентов [3, с. 96].

Существенный вклад в становление художественно-композиционного анализа внесли архитектурные школы Европы и СССР, такие как Баухауз, ВХУТЕМАС, ВХУТЕИН и др. В конце 60-х годов прошлого века профессор Игнасио Араухо изложил версии «структурного анализа» архитектурной композиции [4]. Концепция художественно-композиционного анализа состоит из 4-х этапов.

1-й этап: композиционно-геометрический анализ. Разложение целого на части и рассмотрение каждого элемента. Элементы анализируются, и выявляется роль и место каждого в общей форме объекта.

2-й этап: структурный анализ формы с точки зрения композиционных свойств объекта. Последовательно анализируются масса, членение и фактура поверхности, равновесие, динамика и статика, ритм, цвет, светотень, масштабность, пропорции и другие стороны объекта.

3-й этап: сравнительный анализ, направленный на выявление вида специфических особенностей для построения данного объекта по сравнению с аналогичными или схожими объектами.

4-й этап определяет принципы построения пространства и «телесной» формы анализируемого объекта.

Архитектурную форму в процессе анализа представляют как систему, состоящую из трех ипостасей: поверхностей, объемов и пространства. Объем и пространство являются в архитектурном сооружении основными составляющими архитектурной формы. Под «объемом» подразумевают замкнутое, ограниченное пространство, принимаемое во внешних границах, или материальную часть сооружения, принимаемую извне как трехмерное образование. Анализ строения объема, т.е. морфологический (структурный) аспект анализа, занимает важное место в методике художественно-композиционного исследования и требует применения специфических приемов и операций (рисунок 2).

Ценность методов историко-архитектурного анализа признавали такие мастера советской архитектуры как братья Веснины, И.В. Жолтовский, А.В., Щусев, Г.П. Гольц, М.А. Усейнов и других. Целью историко-архитектурного анализа может служить желание изучить неизвестные закономерности и способы композиционного построения памятников архитектуры, их эстетические качества, функциональные, планировочные, инженерно-технические характеристики. Восстановление и правильная реконструкция утраченных частей памятников возможна при научно обоснованной оценке специфичных исторических направлений зодчества. При выборе объекта анализа следует исходить из наличия графического, текстового материала, позволяющего как можно более полно охарактеризовать данный памятник архитектуры.

Историко-архитектурные объекты делятся на материальные и «идеальные». Материальные объекты имеют физическую (морфологическую) и концептуальную (смысловую) стороны, тогда как «идеальные» объекты не имеют материальной основы, они

представлены только в литературе, в чертежах и схемах. Памятники можно подразделить также на динамичные и статичные. Статичные объекты представляют стабильные системы с фиксированным набором подсистем элементов и отношений между ними и с окружающей средой. К динамичным объектам относятся такие памятники, которые либо находятся в состоянии пространственного изменения, либо были подвергнуты в своем существовании различным преобразованиям в качественном и количественном отношении.

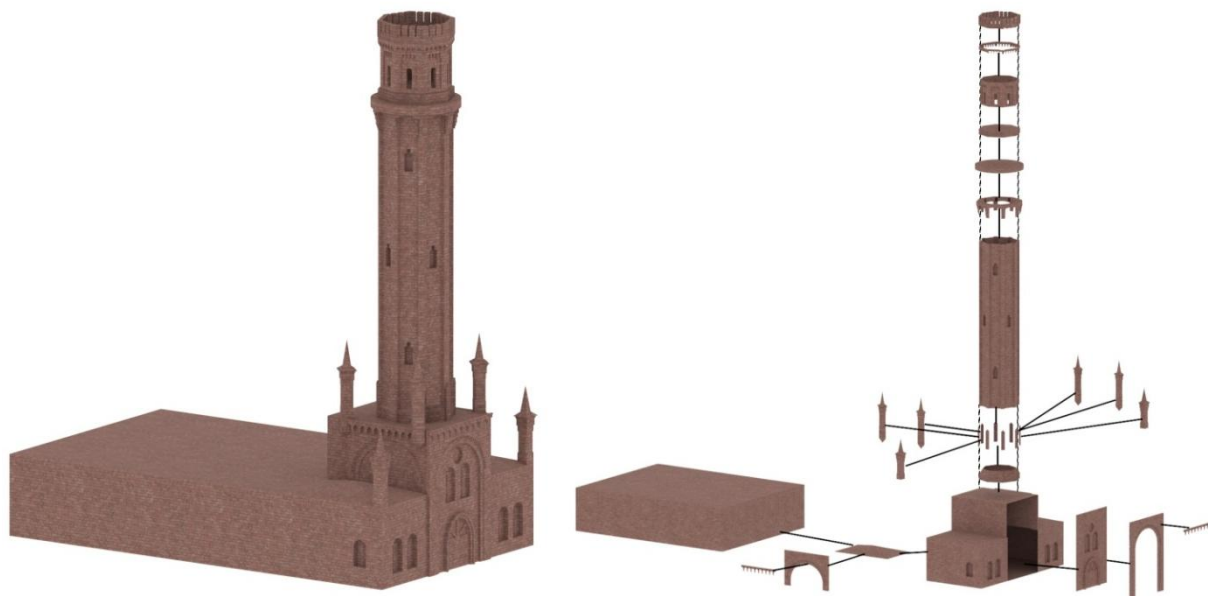


Рисунок 2 - Морфологический анализ Водонапорной башни в г. Курске на ул. Павлова

Статичные объекты наиболее эффективно могут быть проанализированы синхронными методами, динамичные объекты целесообразно анализировать диахронными методами анализа. Диахронный анализ приводит к определению тенденций развития архитектурного объекта. Его структура включает в себя анализ возникновения архитектурного объекта; анализ изменения, функционирования объекта на протяжении определенного времени; анализ тенденций развития архитектурного объекта; выявление «структурной дифференциации архитектурных объектов» [5, с. 92]. Сложность историко-архитектурного анализа состоит в отражении принципа единства исторических явлений и событий и появлении архитектурных памятников, отражающих изменения в области экономики, социальном строе и культуре, показывающих стилевые особенности исторического периода в архитектуре.

- 1) датировка и периодизация (построение эволюционных рядов);
- 2) построение типологических рядов;
- 3) картографирование;
- 4) графическая реконструкция;
- 5) визуально-пространственное моделирование.

Методы геометрического анализа и пропорционирования получили системное освещение в исследованиях по истории архитектуры. Среди них можно отметить работы К.Н. Афанасьева [6], Н.И. Брунова [7], Г.Г. Гримма [8], М.С. Булатова [9], И.Ш. Шевелева и др. В основе художественно-интуитивного метода Антонио Гауди лежит полное отрицание последовательной архитектурной логики, рациональности, стандарта и т.д. Ю. Сомов предложил внедрить в архитектурный анализ метод количественной оценки эстетических сторон архитектуры, т.е. квалиметрию.

Градостроительный анализ включил в свою структуру аналитические методы смежных наук. В работах Л.Н. Авдотьина, Н.Д. Кострикина, А.П. Вергунова, И.Г. Бархина, З.Н. Яргиной, А.Э. Гутнова [10] и других раскрыты количественные и качественные методы анализа градостроительных образований. Градостроительный анализ внедрялся в состав

планировочных территориально-расселенческих работ, порою выступая как предпроектный относительно самостоятельный этап проектирования.

Комплексный типологический анализ зданий и сооружений отвечает потребностям, прежде всего, типового проектирования и массового строительства. Он является универсальным методом для разработки различных типов зданий и сооружений. Принципы «комплексного (пофакторного) анализа» составляют ядро методологии типологической архитектурной науки.

Методы семантического анализа развивали в своем творчестве М. Грейвз, П. Эйзман. И. Фридман предложил математические методы в архитектурном анализе, сознательно рассматривая архитектурный объект как техническую систему [11, с. 120]. Теоретические основы методологии и методов архитектурного анализа разрабатывали Д.Д. Омуралиев, О.В. Воличенко [12-14], О.А. Шипицына, Т.А. Кислых [13].

Результаты и обсуждение

«Отражение памятников архитектуры как объектов воспроизведения мира невозможно без связи или обмена информацией. Теория информации занимается изучением законов и способов измерения, преобразования, передачи, использования и хранения информации. Для изучения информационного потенциала историко-архитектурных памятников целесообразно выделить четыре подхода: количественный, качественный, архитектура как форма сообщения и синтез как условие целостного восприятия» [14, с. 161].

Количественный подход. Формула количества информации (формула негэнтропии), впервые предложенная Шенноном, характеризует степень неопределенности [15, с. 36]. Она выражает количество негэнтропии, содержащейся в одном объекте по отношению к другому. На данной функции отношений двух систем основывалась вся статистическая теория информации. В настоящее время намечается иная, более широкая точка зрения на соотношение теории информации и теории вероятностей и на природу информации вообще. Динамический и топологический подходы к определению количества информации основаны на невероятностных предпосылках. Они отличаются от статистической теории более широким, диалектически обоснованным взглядом на информацию вообще. Такой информативный подход по своей сущности близок самому широкому пониманию архитектурно-исторического наследия как сферы созидательной деятельности общества (рисунок 3).

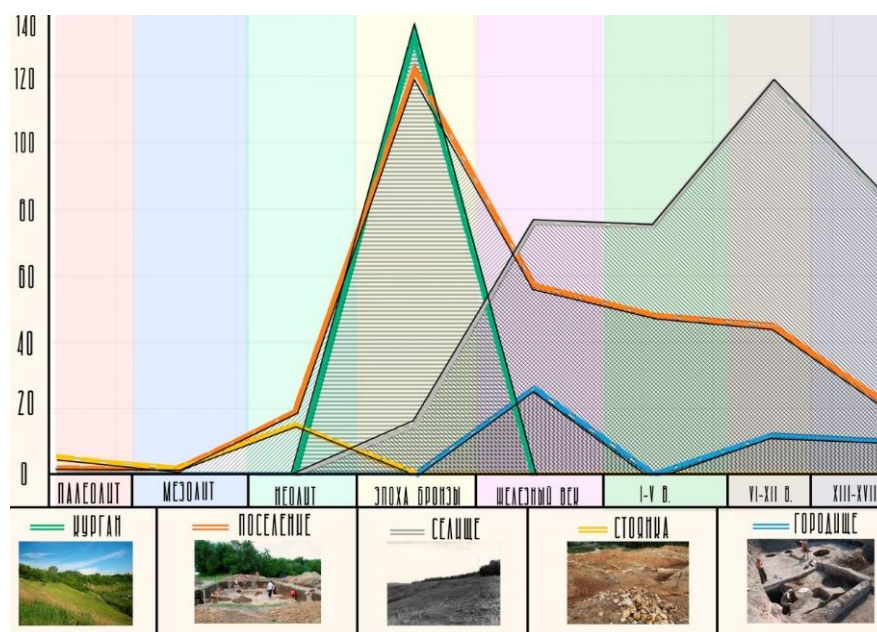


Рисунок 3 - Количественная диаграмма объектов археологического наследия Курской области

На основании данных Комитета по охране объектов культурного наследия Курской области был проведен количественный анализ объектов археологических памятников [16]. В результате выделены следующие типы археологических памятников:

- а) курган – погребальный памятник, представляющий собой насыпь камней и земли;
- б) поселение – место жизни древних людей на определенном месте;
- в) селище – неукрепленное поселение;
- г) стоянка – место обитания первобытных людей;
- д) городище – укрепленное поселение, которое было окружено рвами и валами.

Качественный подход. Качественный аспект информации связан с изучением качественного многообразия материи. Качественным аспектом информации занимается теория кодирования и декодирования информации. С этой точки зрения «все материальные системы (в том числе и архитектурно-исторические памятники) можно рассматривать как некоторые множества, закодированные на своем языке. Отсюда следует, что такие свойства организованной материи, как строение, структура, тесно связаны с кодом передаваемой и воспринимаемой информации» [17, с. 343]. В основу общего понятия информации могут быть положены два признака:

- 1) разнообразие как наиболее глубокая сущность понятия информации;
- 2) отражение, без которого всякая информация теряет смысл.

Итак, в самом общем случае, как утверждает Урсул А., «**информация** – это отраженное разнообразие» [18, с. 19]. Многообразная информация о проектируемом объекте стала основой современных методов разработки – параметрического, алгоритмического, кинетического и т.п. Взаимосвязь различных аспектов информации на всем жизненном цикле архитектурного объекта, начиная от проектирования и строительства, включая его дальнейшую эксплуатацию, согласование и быстрое изменение информации, заложена в информационной модели проектирования – ВМ. Например, «авторы разрабатывают параметрические и ассоциативные системы моделирования здания, которая предусматривает прямое манипулирование структурой в режиме реального времени, включая изменения внешней формы и внутренней организации, реагирующие на колебания микроклимата и требования различных функциональных программ» [19, с. 3].

Развитие концепции разнообразия все расширяется, охватывая различные сферы познания. В области эстетического воспитания наметилась тенденция связывать информацию с оригинальностью, рассматривая ее как функцию невероятности сообщений. Исходя из представления об информации как об определенной оригинальности, А. Моль вводит понятие «эстетической информации». Концепция разнообразия постепенно проникает в философские работы. На основе определения информации как отраженного разнообразия можно сделать вывод, что информация выражает всеобщие свойства материи (разнообразие и отражение – всеобщие свойства материи). Отсюда логически вытекают предпосылки превращения понятия информации в философскую категорию.

Итак, общее понятие информации как отраженного разнообразия проявляется в виде неразрывного единства объективного и логико-гносеологического аспектов. Информация в концепции И.А. Страутманиса «отражает тенденцию к синтезу различных идей методов, теорий информации. С одной стороны, она выделяет наиболее существенные признаки, присущие любому виду информации, с другой – отражает идею о неисчерпаемости, многосторонности информации» [19, с. 20]. Качественный подход – наиболее предпочтительный для исследования памятников архитектуры. На основе вышесказанного предлагается схема модели методики анализа историко-архитектурных памятников, в ней учитывается сложившийся опыт изучения науки и пространства.

Специфика анализа памятников архитектуры как объектов туризма заключается в учете следующих важных факторов:

- а) анализ восприятия;
- б) кадрирование (пространственно-визуальный анализ);

- в) анализ семантического кода;
- г) восприятие при движении в пространстве.

а) **Анализ восприятия.** Восприятие историко-архитектурных памятников складывается из эмоционального восприятия их художественных качеств и из рационального овладения их утилитарно-практическими свойствами как объектов материальной среды. Особенность восприятия архитектуры связана с такими факторами как преднамеренность и непреднамеренность восприятия. Обязательным элементом преднамеренного восприятия является внутренняя заинтересованность индивидуума и мобилизация, или сознательная концентрация внимания в данном направлении. Любое сообщение, независимо от его содержания, может представлять интерес только в том случае, если: 1) есть уверенность, что данное сообщение должно быть интересным, т.е. если мы его в какой-то степени уже знаем; 2) мы в состоянии обнаружить в нем организацию или внутреннюю структуру. Наличие в окружающей пространственной среде какой-либо формы или структуры, по мнению И.А. Страутманиса, отражается в способности туриста «угадывать то, что последует, другими словами – экстраполировать временную или пространственную последовательность элементов сообщения или представить будущее какого-либо явления, исходя из его прошлого» [20, с. 74].

б) **Кадрирование** (пространственно-визуальный анализ). Наиболее наглядное представление о композиционном построении архитектурно-исторических памятников туристы получают при обозрении их с различных точек (рисунок 4). Суть зрительных впечатлений, полученных таким образом, позволяет составить динамическое представление о пространственно-визуальной модели архитектурного памятника [21, с. 121]. Приемы пространственно-визуального анализа включают три основные части:

- 1) определение трассы движения;
- 2) кадрирование визуального восприятия и монтаж кадров;
- 3) анализ полученной графической информации.

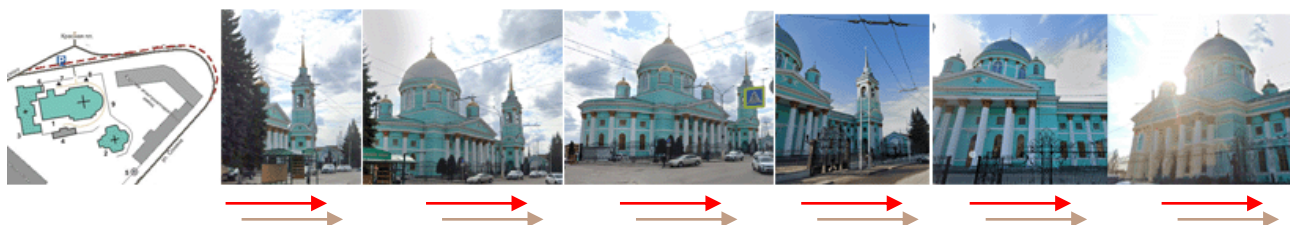


Рисунок 4 - Кадрирование визуального восприятия кафедрального собора Иконы Божией Матери «Знамение»

в) **Анализ семантического кода.** Приемы семантического анализа основываются на поиске аналогий между архитектурой и объектами, процессами и явлениями действительности. Семантическая информация подготавливает внешнюю реакцию туристов при осмотре историко-архитектурных памятников. Она дает ответы на вопросы о состоянии окружения памятника, о его материальном строении и развитии во времени. Семантическая информация архитектурной формы раскрывает:

- 1) логическое, материальное и смысловое содержание;
- 2) функцию и основу материально-структурного построения;
- 3) сюжетность (для пространственных историко-архитектурных комплексов).

В архитектурном анализе семантической информации выделяется:

- 1) локальный уровень восприятия и понимания архитектурной информации;
- 2) структурный уровень восприятия архитектурной семантики (на первый план выступают тектонические качества сооружения);
- 3) общий (глобальный) уровень восприятия архитектурной семантики (оценка пространственных историко-архитектурных памятников).

г) **Восприятие при движении в пространстве.** Реальное восприятие (преднамеренное или непреднамеренное) сложной пространственной формы происходит в движении (с движущихся транспортных средств или при передвижении самого воспринимающего субъекта), при наличии определенного лимита времени, обычно не зависящего от индивидуума [21]. Присутствие структуры, или внутренней организации в осматриваемом историко-архитектурном объекте позволяет за тот же отрезок времени резко увеличить количество воспринимаемой от среды информации. Анализ восприятия историко-архитектурных памятников происходит на основе двух концепций: теории развертки и теории формы. Для исчерпывающей характеристики процесса восприятия должен осуществляться синтез обоих способов восприятия [22].

Заключение

Анализ методов историко-архитектурных объектов может включать в себя изучение и анализ следующих аспектов:

1. Исторический контекст: анализ и изучение исторических фактов и событий, которые сопровождали создание и развитие объекта - изучение архивных материалов, литературы и иных источников.

2. Архитектурные особенности и стиль: исследование и анализ архитектурных форм, конструкций, композиций, материалов, декоративных элементов и стиля, с которыми связан объект. Такой анализ может включать сравнение с другими архитектурными объектами, которые имеют аналогичные особенности и стиль.

3. Технологии строительства: изучение и анализ методов и технологий, которые использовались при строительстве объекта. Могут включать изучение возможных материалов, инструментов, техник и мастерства, а также изучение возможных изменений и реконструкций объекта.

4. Функциональное назначение: описание и анализ назначения и роли объекта в истории и регионе - изучение архитектурных планов и назначения помещений, использование объекта в определенные исторические периоды, а также его значение для общества и идеологии.

5. Социокультурный контекст: анализ воздействия объекта на социокультурное окружение и обратно - изучение местных традиций, обычаев, религиозных и политических контекстов, которые отразились на архитектурном стиле и особенностях объекта.

6. Состояние и сохранность: оценка текущего состояния объекта, исследование проблем сохранности и возможных способов реставрации и реконструкции - изучение архитектурного наследия и специального законодательства о сохранении исторических объектов.

Анализ методов историко-архитектурных объектов требует мультидисциплинарного подхода, включающего знания и методы истории, архитектуры, археологии, искусствоведения для более глубокого понимания и изучения истории и культуры прошлых эпох, а также помогает в разработке стратегий сохранения и восстановления этих объектов для будущих поколений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воличенко О.В. Памятники архитектуры в системе туристической инфраструктуры Кыргызстана. Бишкек: Кыргызский государственный университет строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова, 2006. 153 с. ISBN 9967-432-04-7.
2. Степанов А.В., Иванова Г.И., Нечаев Н.Н. Архитектура и психология. М.: Стройиздат, 1993. 157 с.
3. Гинзбург М.Я. Ритм в архитектуре. М.: ММХИХ, 2019. 120 с.
4. Араухо И. Архитектурная композиция. М.: Высш. школа, 1982. 208 с.
5. Воличенко О.В. Архитектурно-художественные достижения караханидской эпохи // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. 2018. Т. 18. № 4. С. 89-94.
6. Афанасьев К.Н. Построение архитектурной формы древнерусскими зодчими. М.: Ладомир, 2002. 269 с.

7. Брунов Н.И. Пропорции в античной и средневековой архитектуре. М.: Издательство Всесоюзной Академии Архитектуры, 1936. 140 с.
8. Гримм Г.Д. Пропорциональность в архитектуре. М.-Л.: ОНТИ, Главная редакция строительной литературы, 1935. 148 с.
9. Булатов М.С. Геометрическая гармонизация в архитектуре Средней Азии IX-XV вв. М.: Наука, 1988. 364 с.
10. Гутнов А.Э., Глазычев В.Л. Мир архитектуры. М.: Молодая гвардия, 1990. 350 с.
11. Фридман И. Научные методы в архитектуре. Стройиздат, 1983. 161 с.
12. Воличенко О.В. Методика предпроектного и проектного анализа в архитектуре и градостроительстве: учебное пособие / Саратов: Вузовское образование, 2020. 144 с.
13. Шипицына О.А., Кислых Т.А. Методы критического исследования архитектурного объекта: учеб. пособие по дисциплине «Архитектурно-исследовательские виды деятельности». Екатеринбург: Изд-во УрГАХУ, 2019. 90 с.
14. Литвинский Б.А. Архитектура и строительное дело // Восточный Туркестан в древности и раннем средневековье. М.: Восточная литература, 2000. С. 13-218.
15. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетики. М.: Иностранная литература, 1963. 108 с.
16. Перечень объектов культурного наследия. [Электронный ресурс]. <https://nasledie.kursk.ru/deyatelnost/perechni-obektov-kulturnogo-naslediya/> (дата обращения 15.03.2023)
17. Столяров Н.Н. Динамика архитектурных стилей Санкт-Петербурга в сопоставлении с развитием российского общества за период XIX-XX веков // Региональные архитектурно-художественные школы. 2015. № 1. С. 342-348.
18. Урсул А.Д. Природа информации. Философский очерк. Челябинск: Челябинская государственная академия культуры и искусств, 2010. 232 с.
19. Воличенко О.В. Влияние мейнстримов Западного авангарда в архитектуре Центральной Азии // Архитектон: известия вузов. 2013. № 1(41). С. 3.
20. Страутманис И.А. Информативно-эмоциональный потенциал архитектуры. М.: Стройиздат, 1978. 119 с.
21. Воличенко О.В., Байчубекова Б.Т. Принципы создания среды «умного города» // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. 2019. Т. 19. № 12. С. 119-126.
22. Воличенко О.В., Байчубекова Б.Т. Модель развития общественных пространств // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. 2020. Т. 20. № 8. С. 59-64.

REFERENCES

1. Volichenko O.V. Pamyatniki arhitektury v sisteme turisticheckoj infrastruktury Kyrgyzstana. Bishkek: Kyrgyzskij gosudarstvennyj universitet stroitel'stva, transporta i arhi-tektury im. N. Isanova, 2006. 153 p. ISBN 9967-432-04-7.
2. Stepanov A.V., Ivanova G.I., Nechaev N.N. Arhitektura i psihologiya. M.: Strojizdat, 1993. 157 p.
3. Ginzburg M.YA. Ritm v arhitekture. M.: MMXIX, 2019. 120 p.
4. Araujo I. Arhitekturnaya kompoziciya. M.: Vyssh. shkola, 1982. 208 p.
5. Volichenko O.V. Arhitekturno-hudozhestvennye dostizheniya karahanidskoj epohi. *Vestnik Kyrgyzsko-Rossijskogo Slavyanskogo universiteta*. 2018. T. 18. No. 4. Pp. 89-94.
6. Afanas'ev K.N. Postroenie arhitekturnoj formy drevnerusskimi zodchimi. M.: Lodomir, 2002. 269 p.
7. Brunov N.I. Proporcii v antichnoj i srednevekovoj arhitekture. M.: Izdatel'stvo Bsesoyuznoj Akademii Arhitektury, 1936. 140 p.
8. Grimm G. D. Proporcional'nost' v arhitekture. M.-L.: ONTI, Glavnaya redakciya stroi-tel'noj literatury, 1935. 148 p.
9. Bulatov M.S. Geometricheskaya garmonizaciya v arhitekture Srednej Azii IX-XV vv. M.: Nauka, 1988. 364 p.
10. Gutnov A.E., Glazychev V.L. Mir arhitektury. M.: Molodaya gvardiya, 1990. 350 p.
11. Fridman I. Nauchnye metody v arhitekture. Strojizdat, 1983. 161 p.
12. Volichenko O.V. Metodika predproektnogo i proektnogo analiza v arhitekture i grado-stroitel'stve: uchebnoe posobie / Saratov: Vuzovskoe obrazovanie, 2020. 144 p.
13. SHipicyna O.A., Kislyh T.A. Metody kriticheskogo issledovaniya arhitekturnogo ob"ekta: ucheb. posobie po discipline «Arhitekturno-issledovatel'skie vidy deyatel'nosti». Ekaterinburg: Izd-vo UrGAHU, 2019. 90 p.
14. Litvinskij B.A. Arhitektura i stroitel'noe delo. *Vostochnyj Turkestan v drevnosti i rannem srednevekov'e*. M.: Vostochnaya literatura, 2000. Pp. 13-218.
15. Shennon K. Raboty po teorii informacii i kibernetiki. M.: Inostrannaya literatura, 1963. 108 p.
16. Perechen' ob"ektov kul'turnogo naslediya. [Elektronnyj resurs]. <https://nasledie.kursk.ru/deyatelnost/perechni-obektov-kulturnogo-naslediya/> (data obrashcheniya 15.03.2023)

17. Stolyarov N.N. Dinamika arhitekturnyh stilej Sankt-Peterburga v sopostavlenii s razvitiem rossijskogo obshchestva za period XIX-XX vekov. *Regional'nye arhitekturno-hudozhestvennye shkoly*. 2015. № 1. Pp. 342-348.
18. Ursul A.D. Priroda informacii. Filosofskij ocherk. CHelyabinsk: CHelyabinskaya gosudarstvennaya akademiya kul'tury i iskusstv, 2010. 232 p.
19. Volichenko O.V. Vliyanie mejnstrimov Zapadnogo avangarda v arhitekture Central'noj Azii. *Arhitekton: izvestiya vuzov*. 2013. No. 1(41). Pp. 3.
20. Strautmanis I.A. Informativno-emocional'nyj potencial arhitektury. M.: Strojizdat, 1978. 119 p.
21. Volichenko O.V., Bajchubekova B.T. Principy sozdaniya sredy «umnogo goroda». *Vestnik Kyrgyzsko-Rossijskogo Slavyanskogo universiteta*. 2019. T. 19. No. 12. Pp. 119-126.
22. Volichenko O.V., Bajchubekova B.T. Model' razvitiya obshchestvennyh prostranstv. *Vestnik Kyrgyzsko-Rossijskogo Slavyanskogo universiteta*. 2020. T. 20. No. 8. Pp. 59-64.

Информация об авторах:

Воличенко Ольга Владимировна

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

Советник РААСН, доктор архитектуры, профессор кафедры основ архитектуры и художественных коммуникаций.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж, Россия,

Советник РААСН, доктор архитектуры, профессор кафедры теории и практики архитектурного проектирования.

E-mail: wolitschenko@mail.ru

Головина Екатерина Викторовна

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Россия, аспирант.

E-mail: blohinaekaterina22@yandex.ru

Information about authors:

Volichenko Olga V.

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

Advisor to the RAACS, doctor of architecture, professor of the department of Fundamentals of Architecture and Artistic Communications.

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia,

Advisor to the RAACS, doctor of architecture, professor of the department of Theory and Practice of Architectural Design.

E-mail: wolitschenko@mail.ru

Golovina Ekaterina V.

South-West State University, Kursk, Russia, postgraduate student.

E-mail: blohinaekaterina22@yandex.ru

А.Е. ЕНИН¹, М.М.Х. АБУАСАД¹¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж, Россия

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ОРГАНИЗАЦИИ ЖИЛОЙ ЗАСТРОЙКИ НА ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИЯХ В ОСОБЫХ ПРИРОДНЫХ УСЛОВИЯХ ПАЛЕСТИНЫ

Аннотация. В статье рассматриваются проблемы повышения качества жилой среды в особых условиях Палестины, а также теоретические основы программ (векторов) трансформации жилых территорий в формировании архитектурно - ландшафтного комплекса, на основе модели комплексных схем средорегулирующей системы. Природные характеристики и человеческая деятельность являются основными элементами этой системы, так как их взаимодействие является условием преобразований в соответствии с принципами архитектурно-градостроительной организации жилой застройки при сохранении сходства, целостности и эффективности взаимодействий, опирающихся на принципы взаимовлияния и взаимозависимости старого и нового. Случаи противоречия и различия выявляются на основе комплексной оценки места застройки в планировочном, функциональном и композиционном аспектах, по принципам взаимодействия старого и нового. При этом определяется, каким образом сформированные элементы среды в результате человеческой деятельности функционируют под воздействием природных характеристик. В результате выявляются зоны внутреннего дискомфорта. Разработка программы целенаправленных преобразований характеристик жилой городской среды на основе поэтапного анализа взаимодействия основных элементов системы, конечной целью которых является повышение качества городского пространства. Выявление средообразующего потенциала территории определяет систему мероприятий в соответствии с климатическими, эстетическими и экологическими изменениями городской территории. Исходя из принципов архитектурно-градостроительного проектирования комфортных жилых территорий, по принципу ценности и принципу аналогии, определяется Средообразующий потенциал территории. Это делается путем анализа взаимовлияния природных характеристик и деятельности человека. В заключение, на основании исследования, определяются тенденции для улучшения развития и повышения комфорта застройки, располагающейся в соответствии с принятыми приоритетами и конкретными требованиями. Все предложенные методы и приёмы архитектурно-ландшафтного преобразования городской среды повысят эффективность формирования микроклимата в сочетании с благоустройством окружающей среды и ее структурной гармонизацией.

Ключевые слова: системный подход, средорегулирующая система, организация жилой застройки, оптимизация жилой среды.

А.Е. ENIN¹, M.M.H. ABUASAD¹¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

A SYSTEMIC APPROACH TO THE ORGANIZATION OF RESIDENTIAL DEVELOPMENT IN URBAN AREAS IN THE SPECIAL NATURAL CONDITIONS OF PALESTINE

Abstract. The article discusses the problems of improving the quality of the living environment in the special conditions of Palestine, as well as the theoretical foundations of programs (vectors) for the transformation of residential areas in the formation of an architectural and landscape complex based on a model of complex schemes of the environment-regulating system. Natural characteristics and human activity are the main elements of this system since their interaction is a condition for

transformation in accordance with the principles of architectural and urban planning organization of residential development while maintaining the similarity, integrity, and effectiveness of interactions based on the principles of mutual influence and interdependence of old and new. Cases of contradictions and differences are identified on the basis of a comprehensive assessment of the development site in planning, functional, and compositional aspects, according to the principles of interaction between old and new. At the same time, it is determined how the formed elements of the environment as a result of human activity function under the influence of natural characteristics. As a result, areas of internal discomfort are identified. Development of a program of targeted transformations of the characteristics of the residential urban environment based on a step-by-step analysis of the interaction of the main elements of the system, the ultimate goal of which is to improve the quality of urban space. Identification of the environment-forming potential of the territory determines a method of measures in accordance with climatic, aesthetic, and environmental changes in the metropolitan area. Based on the principles of architectural and urban planning of comfortable residential areas, according to the principle of value and the direction of analogy, the environment-forming potential of the territory is determined. This is done by analyzing the mutual influence of natural characteristics and human activities. In conclusion, based on the study, trends are identified to improve the development and comfort of products located in accordance with accepted priorities and specific requirements.

Keywords: systemic approach, urban planning, organization of residential development, optimization of the living environment, landscape.

Введение

Дефицит пригодных для строительства земель в особых ландшафтно-климатических условиях Палестины обуславливает застройку в районах со сложным рельефом.

Непродуманное развитие городских территорий приводит ко многим проблемам в городской среде [14]. А это, в свою очередь, заставляет прибегать к организации компактной жилой застройки по принципу продуктивности использования территорий. Социальные, культурные и психологические аспекты, объединяющие все факторы в системе (природа, традиции и общество), где городская территория рассматривается как взаимозависимая единица во всех ее компонентах и элементах вместе взятых, при условии рассмотрения любой части, составляющей существенный элемент городской системы. Жилая среда состоит из двух основных элементов: А - природных характеристик, представленных элементами рельефа, почвы, воды и климата; Б - человеческой деятельности, включающей административные, экономические, социальные и культурные учреждения, транспорт и другие аспекты деятельности человека. Взаимодействие этих двух элементов приводит к системе землепользования для различных видов деятельности и услуг [15].

Для установления решений взаимодействия между поставленной целью и задачами по её достижению, предлагается системная модель функционирования элементов средорегулирующей системы. Природные характеристики и деятельность человека являются важнейшими элементами этой системы. При их взаимодействии в структуре архитектурно - ландшафтного комплекса, сохраняя при этом сходство, целостность и эффективность, формируется пространство отвечающее принципам эффективной архитектурно - градостроительной организации застройки. Под эффективностью решений поставленных задач является повышение качества городского пространства за счет разработки программы целенаправленных преобразований параметров жилой городской среды на основе поэтапного анализа взаимодействия основных элементов системы [1].

Модели и блок-схемы. Выявленный средообразующий потенциал территории определяет систему мероприятий в соответствии с климатическими, эстетическими и экологическими изменениями городской территории. Он, в свою очередь, отражает взаимодействие предлагаемых блок-схем (сходство, целостность и эффективность) разработанной модели, состоящей из блоков функционирования и развития средорегулирующей системы (рисунок 1).

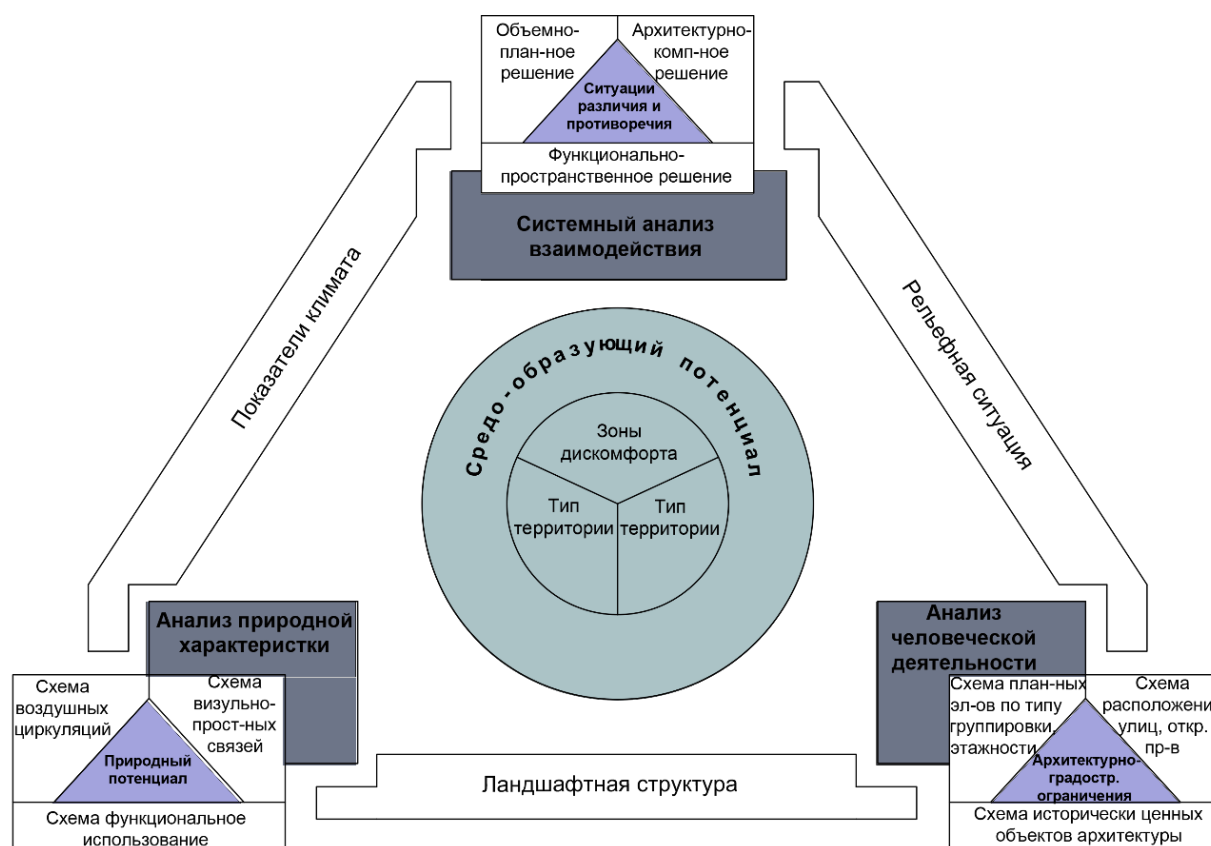


Рисунок 1 - Анализ состояния проблемы улучшения городской среды (предложение авторов)

Блок А - «Сходство» представляет собой систему средообразующего потенциала, которая определяет типы селитебных территорий и проблемы различия и противоречия на территории застройки через природные характеристики и деятельность человека (рисунок 2).

Ранее, одним из исследователей (Салингарос Н.), была выдвинута идея о существовании двух разных пересекающихся языков, управляющих городским архитектурным проектированием. Первый язык является стереотипным, а второй — формальным. Стереотипный язык включает в себя правила интерпретации взаимодействия человека с городской средой и предлагает практические решения, которые формировались и развивались с годами для удовлетворения локальных требований общества, а формальный язык несет в себе инженерную закономерность во всех формах и их структурах, а также отражает различные культурные ценности и архитектурные традиции. Формальный язык определяет стиль зданий в каждой городской структуре [12].

В данной блок-схеме представляет собой анализ состояния проблемы улучшения городской среды путем анализа средообразующего потенциала городского ландшафта, включающий в себя структурный анализ природных характеристик и деятельности человека.

Структурный анализ природных характеристик выявляет закономерности взаимодействия между структурными элементами ландшафтного комплекса на разных иерархических уровнях среды, поэтому можно оценивать природный потенциал исходя из

степени предпочтительности их использования в тех или иных архитектурно-градостроительных целях [4].

В заключение дается несколько оценок природного потенциала: - влияние пространственных зрительно-эстетических отношений ландшафтной структуры; - изучение динамики циркуляции воздуха с целью достижения теплового комфорта; - влияние состояния рельефа на общее использование территории. На основе показателей природных характеристик даются оценки природного потенциала, где территории классифицируются как благоприятные, нейтральные и неблагоприятные.

При проведении структурного анализа деятельности человека оцениваются следующие схемы: схема расположения улиц, открытых пространств и площадей; схема архитектурных объектов, представляющих историческую ценность; схема элементов планировки по типу группировки, плотности и этажности. Это основано на определении характеристик расположения, деятельности человека, формы и типа поверхности [17].

Проведя общую оценку взаимодействия элементов деятельности человека с природной средой, получим несколько градостроительных ограничений природного потенциала региона. Минимальное, когда количество человеческого фактора не влияет на природные характеристики; частичное, когда увеличение доли человеческого фактора может привести к улучшению или ухудшению характеристик природных потенциалов; максимальное, когда влияние человеческого фактора на качество природной среды превышает естественное воздействие.

Средообразующий потенциал территории определяется исходя из принципов архитектурно-градостроительного проектирования комфортных жилых территорий, по принципу ценности и принципу аналогии. Это делается путем анализа взаимовлияния природных характеристик и деятельности человека.

Случаи противоречия и различия выявляются на основе комплексной оценки места застройки в планировочном, функциональном и композиционном аспектах, по принципам взаимодействия старого и нового. При этом определяется, каким образом сформированные элементы среды в результате человеческой деятельности функционируют под воздействием природных характеристик. В результате выявляются зоны внутреннего дискомфорта [2]:

1. Макроклиматические условия - в результате планировочного решения застройки, которое привело к обострению тепло - ветрового режима;
2. Условия окружающей среды (экологические условия) - в результате пространственного функционального решения и развития, не принимая во внимание влияние ландшафтной структуры на потоки воздуха;
3. Эстетические условия (композиционные) - в результате архитектурно - композиционного решения развития, не наблюдая визуальных и пространственных характеристик природного ландшафта.

В заключение, на основании исследования, определяются тенденции для улучшения развития и повышения комфорта застройки, располагающейся в соответствии с принятыми приоритетами и конкретными требованиями.



Рисунок 2 - Блок-схема «Сходство»

а) источник: автор;

б) источник: https://www.palestineremembered.com/GeoPoints/Ya_bad_1693/ar/Picture_16937.html;

в) источник: <https://madanews.ps/24827/>; г) источник: автор;

д) источник: <https://rusimm.com/country/palestine/ramalla.html>;

е) источник: <https://isroe.co.il/izrail-popal-v-top-20-stran-s-chistymi-plyazhami/>

ж) источник: <https://ptc.najah.edu/en/about/why-practical-training/>

и) источник: <https://pan-sapunov.livejournal.com/category/%D0%B4%D0%B5%D1%82%D0%B8>

к) источник: <https://www.orangesmile.com/destinations/palestine/culture.htm>

Блок Б - «Целостность». В основе этой блок-схемы лежит понятие преемственности в определении целей и условий регулирования качества городской среды. Учитывается преемственность в установлении различных отношений, внутренних и внешних, в различных пространствах города. Предлагается общий прогноз взаимовлияния различных зон и определяется система регулирования и взаимовлияния подобных зон (рисунок 3).

Реальность развития городской ткани зависит главным образом от способности этой ткани впитывать изменения, необходимые для её развития, и приспосабливаться к постоянно меняющимся внутренним и внешним потребностям таким образом, чтобы удовлетворять потребности всего общества [3].

Городская ткань формируется группой элементов, наиболее важными из которых являются соотношения масс и пространств, в дополнение к пространственным количественным показателям, включая природные характеристики, представленные местоположением, климатом и рельефом. Важными показателями являются результаты деятельности человека, представленные в культуре, наследии, истории, обычаях и традициях жителей [19].

Для привязки разработанных архитектурно-планировочных решений дискомфортных зон к городской структуре формируется пространственно-поляризованное зонирование путем его наложения на пространственное зонирование. Это делается путем установления внутренних и внешних связей на основе разделения пространственно - поляризованных областей [8].

На микроклимат территории в городской ткани влияет его расположение по отношению к природному ландшафту, в зависимости от пространственного зонирования. Поэтому пространственное зонирование заключается в выделении зон в структуре (квартал — район — город — пригород).

Определение расположения территории в структуре (квартал — район — город — пригород) способствует улучшению его микроклимата при условии, что его планировочная структура увязана со всей городской структурой.

Поляризованное зонирование помогает выявить зоны влияния окружающей среды в локальных структурах внешней и внутренней среды, чтобы уменьшить ее воздействие на соседние территории. Зоны влияния делятся на: зону положительного влияния, зону отрицательного влияния и зону нейтрального влияния. Можно улучшить регулирование, определив зоны влияния, в соответствии с выбранной режимом: режим активизации положительных влияний; режим устранения отрицательных влияний; и режим усиления необходимых влияний для достижения целей улучшения среды.

Разделение пространственно - поляризованных зон способствует устранению условий различия и противоречия между архитектурно-планировочными решениями, необходимых для регулирования влияния зон. Это делается путем установления внутренних и внешних связей в структуре городских территорий, так как это деление помогает оценить преобладающее влияние, которое должно быть ограничено или распространено на соседние территории.

Предлагаются следующие сводные схемы: объемно-планировочной организации; функционально-пространственной организации; архитектурно-пространственной организации. Что, в свою очередь, определяет условия реализации задач по обеспечению связи архитектурно-планировочного решения со всей градостроительной структурой в соответствии с принципами взаимодействия старого и нового [9].

Создания средообразующего потенциала в структуре городского ландшафта достигаются в результате разработки общего прогноза взаимовлияния различных зон, а делается это на основе выделения соответствующих типов территорий систем и определения их реакции на внутренние и внешние условия. При составлении прогноза мы обеспечиваем преемственность внешних и внутренних связей, вырабатываем характеристики, которые сформировались в природно-климатических условиях и деятельности человека с учётом местной культуры, наследия и традиций [3].

Оценивается качество преобладающего влияния конкретной городской территории в системе пространственных зон, путем определения системы регулирования региональных влияний. Поэтому разрабатываются меры по регулированию климатической и экологической обстановки как в отдельных районах, так и в городе в целом. В соответствии с режимами,

установленными для оптимизации системы структурных зон. В качестве основных режимов оптимизации предлагается рассматривать режимы *активации, комбинации и подавления*.

Для устранения случаев различия и противоречия при взаимодействии с внешним и внутренним уровнями предлагаются подсистемы: а - нейтрализации и компенсации для контроля внутреннего влияния; б - фильтрации и локализации для контроля внешнего воздействия.

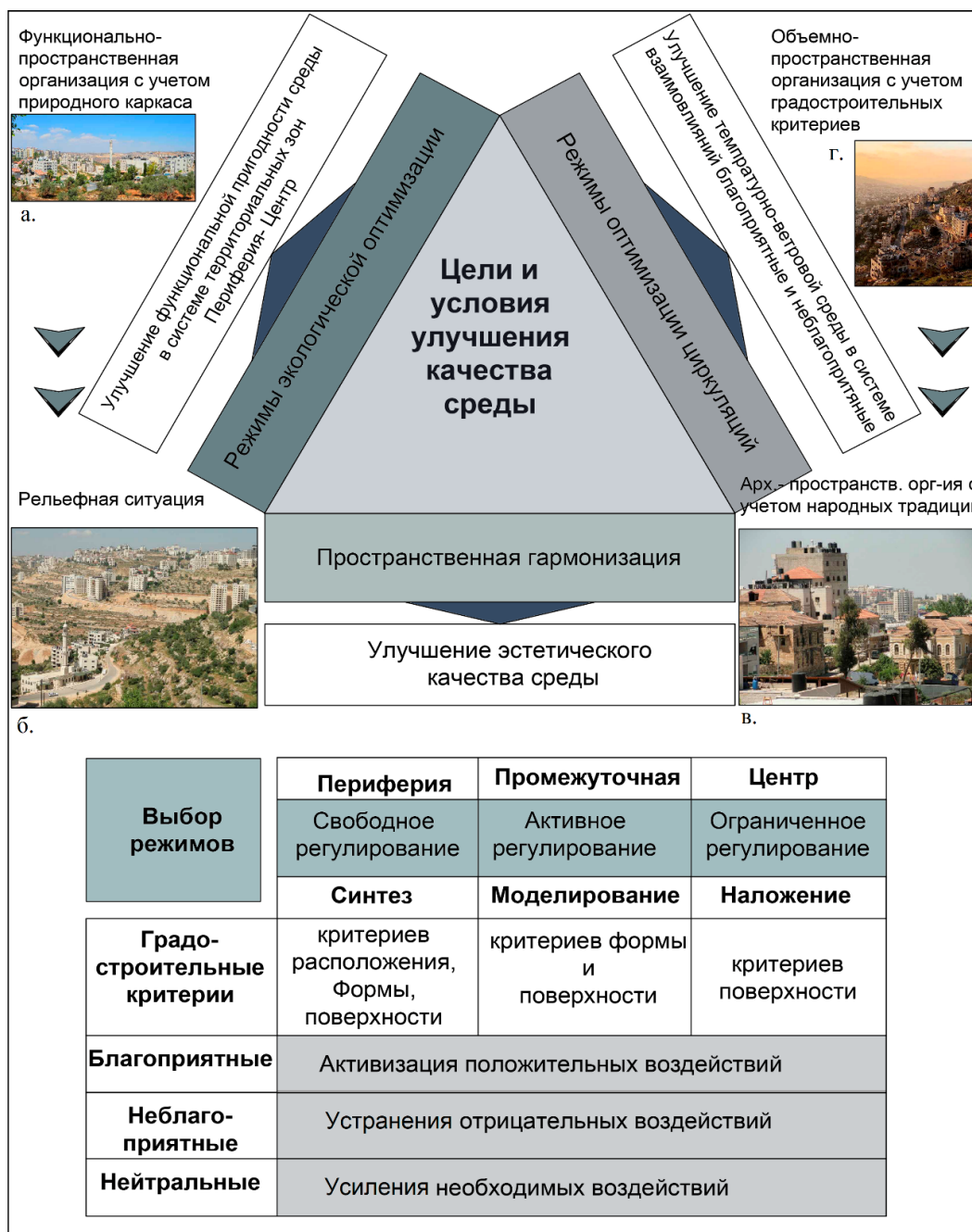


Рисунок 3 - Блок-схема «Целостность»

а) источник: <https://rusimm.com/country/palestine/ramalla.html>

б) источник: <https://pan-sapunov.livejournal.com/category/%D0%B4%D0%B5%D1%82%D0%B8>

в) источник: <https://pan-sapunov.livejournal.com/282737.html>

г) источник: <https://www.dooz.ps/>

Блок В - «Эффективность». В данной блок-схеме осуществляется выбор архитектурно-ландшафтных оптимизаций жилой среды, основанный на выборе приемов объемно-планировочной, функционально-пространственной и архитектурно-

композиционной задач. Что в свою очередь предусматривает улучшение климатических, экологических и эстетических условий среды проживания, рисунок 4 [5, 18].

Выбор приемов зависит от комплекса архитектурно-градостроительных критериев по полученным качественным оценкам средообразующего потенциала и соблюдению целостности связей внешнего и внутреннего воздействия [6].



Рисунок 4 - Блок-схема «Эффективность»

а) источник: <https://yura-falyosa.livejournal.com/1586530.html>

б) источник: https://ru.freepik.com/premium-photo/panoramic-view-of-jerusalem-and-the-dormition-abbey-on-mount-zion-from-the-mount-of-olives_21490710.htm

в) источник: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:%D8%A8%D9%8A%D8%AA_%D9%82%D8%AF%D9%8A%D9%85_%D9%81%D9%8A_%D9%85%D8%AF%D9%8A%D9%86%D8%A9_%D8%A7%D9%84%D8%AE%D9%84%D9%8A%D9%84.jpg

з) источник: <https://kazanicons.ru/blog/voskresenie-hristovo-blagoslovenie-iz-ierusalima/>

д) источник: <https://pan-sapunov.livejournal.com/282737.html>

Устанавливается режим функционирования данной территории с целью улучшения климатического, экологического и эстетического дискомфорта. Осуществляется выбор комплекса архитектурно-градостроительных критериев исходя из принципов взаимодействия нового и старого. Таким образом, можно выделить следующие приемы архитектурно-ландшафтного улучшения: 1) микроклиматическая адекватность, 2) экологическая упорядоченность, 3) композиционная согласованность (рисунок 5).

Методы и приемы микроклиматической адекватности

В результате разработки приемов микроклиматической адекватности сформируется система управления климатом на основе синтеза открытых пространств с архитектурно-планировочной структурой, снижения теплового режима и усиления системы вентиляции в зданиях, используя несколько проектных действий, таких как благоустройство, обводнение и озеленение. Предложены методы, способствующие реализации комплекса задач: - *метод максимального использования природной аэрации, метод ограничения природного эффекта;*

- *метод максимального использования природной аэрации:* обеспечивает улучшение микроклимата в районе строительства и регулирование естественной вентиляции, обеспечивая проникновение свободных и соответствующих воздушных потоков в преобладающем направлении.

Этот метод основан на системе равномерного распределения зеленых насаждений, что, в свою очередь, должно соответствовать схемам регулирования циркуляции воздуха, чтобы улучшить тепло-ветровой и радиационный режимы в районе застройки. Там, где в зоне застройки предлагается использовать регулярные насаждения с высоким стволом, направляя их навстречу ветру и вдоль магистралей, улиц и затеняющие, создавая, таким образом, каналы холодного воздуха.

- метод ограничения природного эффекта;

Обеспечивает защиту от суховея, пыли и песка, выбрасываемых на городские территории, путем проведения мероприятий, направленных на внедрение таких систем, как: подавление, локализация и нейтрализация. Защиту также может обеспечить система узких и извилистых улиц, которые, в свою очередь, замедляют скорость ветра [7].

В данном методе, предлагается использовать узкие извилистые проходы, аналогичные традиционным проходам, при сохранении пропорций между зданиями и открытыми пространствами. Они, в свою очередь, являются фактором переплетения системы внутренних и внешних пространств, и в основе этого лежит принцип ландшафтно-градостроительной адекватности, при использовании традиционных компактных зданий (Аль-Хош), которые перемежаются очень узкими улицами с изолированными открытыми пространствами, которые в свою очередь помогают образовать сеть затененных проходов, освещенных отраженными лучами, стимулирующими движение воздуха. Также предлагается группировать здания с масштабными конструкциями вместе таким образом, чтобы они затеняли друг друга, в результате чего открытые для солнца пространства вокруг зданий уменьшаются [11, 16].

Golany G. (1983) указал на три критерия традиционной архитектуры, которые ведут к разумному и климатически эффективному планированию: - городское планирование, основанное на связи с ежедневным и сезонным движением солнца; - проходы и переулки затенены и прохладны в течение всего дня, что достигается правильной ориентацией и компактностью городской ткани; - узкие переулки сохраняют прохладу днем и тепло ночью, а связь между частями структуры осуществляется только узкими и извилистыми проходами, раскинувшимися между группами жилищ, так как эффективность этих переулков в поддержании низких температур и обеспечении комфортных условий движения воздуха полезно для создания умеренного микроклимата для всей ткани [10].

Методы и приемы экологической упорядоченности

Методы и приемы экологической упорядоченности зависят от включения искусственных природных компонентов в качестве элементов, работающих на стабилизацию экологической обстановки и улучшение микроклиматической обстановки в каждой части городской среды с учетом требований улучшения микроклиматических условий в едином архитектурно-ландшафтном пространстве. Для улучшения жилой городской среды

предлагаются следующие методы: метод организации «буферного» пространства и метод компенсации влияния технологического трансферта.

- **метод организации «буферного» пространства:** суть метода организации «буферного» пространства сосредоточена в создании во внешнем периметре здания пространства, вызывающего нарушения аэродинамики, способствующие деформации и перераспределению ветровых потоков, что в свою очередь создает локальные ветры в городе, который очищает воздушную среду и одновременно улучшает микроклимат в районе застройки и прилегающих территориях. Этот метод также позволяет формировать единую основу из синтетических и натуральных компонентов, работающих на возможность улучшения состояния окружающей среды.

При формировании пространства по внешнему периметру здания на основе взаимодействия элементов здания с естественным рельефом и растительностью с учетом градостроительных норм для этих территорий и обеспечения взаимозависимости естественного и искусственного компонентов буферного пространства и компонентов прилегающих территорий, что позволяет добиться фильтрации или обезвреживания загрязнения атмосферного воздуха на этих территориях.

- **метод компенсации влияния технологического трансферта:** этот метод наполняет транспортные пространства и промышленные объекты искусственными природными компонентами в результате их структурной перестройки. Предлагается использовать мероприятия, связанные с наложением искусственного естественного слоя, которым может быть растительный покров и другие. Поэтому в зоне застройки следует определить оптимальное соотношение теплых и холодных площадей, создающих нормальный воздухообмен в типичных городских поверхностях.

Для достижения эффективного регулирующего воздействия на экологические нормативы, а также в целях обеспечения безопасной среды обитания человека предлагается предусматривать специальные зоны для пешеходов со всеми необходимыми им средствами развлечения, такими как заинтересованность в обеспечении зеленых зон, озеленение, и места для отдыха. А также соединение пешеходных зон друг с другом, чтобы уменьшить механическое движение в центрах городов и жилых районах и, таким образом, помочь уменьшить выбросы вредных газов, таких как углекислый газ, в результате выхлопных газов автомобилей, и стимулировать общественный транспорт. Интерес к этим местам стал классифицироваться в рамках архитектуры окружающей среды, которая связана с дизайном открытых пространств в застроенной или природной среде в рамках принципов устойчивого городского дизайна [13].

Данный метод эффективен не только при решении задач улучшения состояния окружающей среды с точки зрения таких важных факторов, как снижение концентрации вредных выбросов и шума от автотранспорта, но и функциональных задач транспорта за счет улучшения планировочной и транспортной структуры территории строительства, то есть за счет вывода транспортных средств из жилой зоны. Использование местных улиц и зеленых насаждений для организации пешеходных дорожек и проходов вдали от автомагистралей.

Методы и приемы композиционной согласованности способствуют гармоничному решению случаев различия и противоречия в городской жилой среде при учете требований создания архитектурно-ландшафтного комплекса на основе единого структурного решения. Эта гармония учитывает сложное взаимодействие признаков в системе «природа-общество-традиция», что в свою очередь определяет необходимость реализации системного принципа компактности объемно-планировочной структуры при застройке. Для обеспечения согласованности были предложены два метода: - **островной застройки при структурной связи с ландшафтом;** - **непрерывное развитие застройки за исключением связи с природной средой** [20].

- **метод островной застройки при структурной связи с ландшафтом:** этот метод полезен для достижения архитектурной и пространственной интеграции систем развития жилой среды. Используются пространственные особенности ландшафтной структуры и ее элементов для гармонизации взаимодействия объемно-планировочной структуры застройки и визуально-пространственной структуры природных характеристик [11].

Достижение конструктивных целей, таких как: - использование смешанной этажности здания; блокировка отдельных зданий на группы; - использование домов особых типов, форма которых близка по композиции к элементам рельефа; - чередование застроенных и открытых участков территории будет способствовать достижению связности за счет выстраивания отдельных рельефов в локальные группы, соответствующие особенностям конкретного участка. Например, использование зданий с переменной этажностью поможет решить проблему создания единой строительной конструкции для склонов.

- **метод непрерывное развитие застройки за исключением связи с природной средой:** этот метод полезен при использовании в пустынных районах, при этом эстетическое значение построения архитектурно-пространственной композиции городов не является основным. В этом случае существенна необходимость выполнения такой функции, как защита от вредных природных факторов, где здание находится на закрытом типе застройки, архитектурное решение и планировка для него максимально компактны с полной изоляцией от окружающей среды.

Таким образом, разделение пешеходных и автомобильных дорог сетью узких переулков между жилыми домами и использование внутреннего двора в соответствии с архитектурно-планировочными традициями способствует улучшению местного климата, поддержанию циркуляции воздуха и температуры, так как внутренние дворы играют главную роль в защите от шума, уменьшению на улицах пыли и песка. Это должно обеспечить достижение пространственной согласованности на основе непрерывного развития.

композиционной согласованность		Типы территорий по комплексному влиянию природных и антропогенных факторов				
		Благоприятное	Нейтральное	Неблагоприятное		
Зоны в структуре городской застройки	Периферия	Улавливание внешних ветровых потоков посредством организации ветрозахватывающей объемно-планировочной структуры	Стимуляция местных циркуляций посредством конструирования природного каркаса	Локализация ветропылевых потоков путем организации ветрозащитной объемно-планировочной структуры	Свободное регулирование	Режимы экологической оптимизации
	Промежуточная	Усиление воздействий циркуляций посредством обтекаемых форм арх. объектов и рядовых посадок вдоль ветра	Организация (буферного) пространства	Ветрозащитные здания, многорядные полосы насаждений, водные устройства	Активное регулирование	
	Центр	Сохранение воздействий циркуляций посредством многоярусных композиций форм растительности		Равномерное распределение инсолируемых открытых озелененных и поверхностей	Затенение посредством рядовой посадки, устройство фонтанов, бассейнов, газонов, цветников	
Ландшафтно-градостр. адекватность		Активизация	Устранения	Усиления	Функционально-экологической упорядоченности	
		Режимы оптимизации циркуляций				

Рисунок 5 - Выбор проемов архитектурно - ландшафтной оптимизации (предложение авторов)

Результатами исследования является разработка программы целенаправленных преобразований характеристик жилой городской среды на основе поэтапного анализа взаимодействия основных элементов системы, конечной целью которых является повышение качества городского пространства. Выявление средообразующего потенциала территории определяет систему мероприятий в соответствии с климатическими, эстетическими и экологическими изменениями городской территории.

Выводы

Все предложенные методы и приёмы архитектурно-ландшафтного благоустройства городской среды повысят эффективность формирования микроклимата в сочетании с благоустройством окружающей среды и структурной гармонизацией жилой среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абубакр Н.А. Организация застройки на территориях со сложными ландшафтно-природными условиями в городах Йемена: диссертация ... кандидата архитектуры: 18.00.04 / Абубакр Набиль Абдулалим; [Место защиты: Моск. архитектур. ин-т]. Москва, 2009. 167 с.: ил. РГБ ОД, 61 09-18/13.
2. Амер Ахмед Саид Абдалла. Принципы формирования устойчивой архитектуры сельского жилища для жаркого сухого климата (на примере Египта): диссертация ... кандидата архитектуры: 05.23.20 / Амер Ахмед Саид Абдалла [Место защиты: ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»], 2019. 291 с.
3. Белкин А.Н., Аль Дарф Аднан Б., Хирбик М.М., Исмайл М. Концепция формирования систем открытых озелененных пространств городов Сирии на основе беллигеративных ландшафтов // Лесной вестник / Forestry Bulletin. 2018. Т. 22. № 3. С. 90-96. doi:10.18698/2542-1468-2018-3-90-96
4. Лаврова О.П. Ландшафтная архитектура и формирование комфортной городской среды. Материалы XVIII Всероссийской научно-практической конференции [Текст]: сборник трудов / Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т. Н. Новгород: ННГАСУ, 2022. 218 с. ISBN 978-5-528-00493-8
5. Нефедов В.А. Архитектурно-ландшафтная реконструкция как средство оптимизации городской среды: Дисс. д-ра архитектуры. – СПб., 2005.
6. Пестрякова Э.Р. Принципы формирования архитектурно-планировочной организации социальных жилых зданий с учетом трансформации // Градостроительство и архитектура. 2022. Т. 12. № 2. С. 113-119. doi:10.17673/10.17673/Vestnik.2022.02.15
7. Полторак Г.И. Проблемы архитектурной экологии. М.: Знание, строительство и архитектура, 5/1985.
8. Трухачев С.Ю. Архитектурно-планировочные принципы градостроительного зонирования (на примере городов Юга России) : диссертация ... кандидата архитектуры : 18.00.04 / Трухачев Сергей Юрьевич; [Место защиты: Московский архитектурный институт (государственная академия)]. Москва, 2008. 191 с.: ил.
9. Ayad, may, Ali ElSayyad, Nanees Abdel Hamid Mohamed; and El Gizawi, Lamis. The Flexibility Effect of Using Heritage Formation Vocabulary in Contemporary Architecture // Mansoura Engineering Journal. 2022. Vol. 47. Iss. 2. Article 13. Electronic resource available. <https://doi.org/10.21608/bfemu.2022.248285>
10. Golany G. Design for Arid Regions Urban form Design for Arid Regions. Van Nostrand Reinhold Company: New York, 1983.
11. Hani Kh. S.A., Visual and Aesthetic Aspects and Elements of the city "Analytical Study of the Centre of Nablus", An-Najah National University, Nablus, Palestine. 2004.
12. Nikos A. Salingaros, Umbau-Verlag, Solingen, A THEORY OF ARCHITECTURE, Germany, 280 p. ISBN 3-937954-07-4
13. Wafaa Naji Al-Astal. The Impact of Pedestrians Streets on sustainability of Urban Areas Case Study (city Center of Khan younis), 2015. 245 p.
14. Бассем Исса Абдель Рахмана Дахера. Формирование и управление сельским развитием в сельской местности Палестины. Практический пример – деревня Бейт-Иба. 2009. 149 с.
15. Халаф Хусейн Али ад-Дулайми. Городское планирование // Основы и концепции. 2002. 208 с.
16. Рим Абдель Мохсен Ханджи. Завершение городских пространств в исторической городской ткани. 2018. 180 с.
17. Саад Абдель Рахман. Поведение человека, анализ и измерение переменных, 1-е издание, Каир: Каирская современная библиотека, 1971. 135 с.
18. Аль-Обаиди, Майсаа Мовафак, Шариф, Анвар Мишал, Архитектурное наследие города Мосул — отправная точка для восстановления черт старого города, аналитическое исследование старого города на уровнях планирования и проектирования // Международный журнал Архитектура, техника и технологии. 2019. Том 2. Выпуск 2. С. 21-36.

19. Мухаммад Абдулла Мабхут Аль-Авдари. Современные события и их влияние на городскую структуру города, 2009.
20. Хани Аль-Фарран. Определяющие факторы визуального дизайна общественных городских пространств арабского города // Журнал урбанизма и городских технологий — рецензируемый научный журнал, издаваемый Лабораторией городских и океанических технологий Университета Мсилы, Алжир. 2010. № 2 (декабрь). С. 68–88. ISSN: 1112-9581.

REFERENCES

1. Abubakr N. A. Organization of development in territories with complex landscape and natural conditions in the cities of Yemen: dissertation ... Candidate of Architecture: 18.00.04 / Abubakr Nabil Abdulalim; [Place of protection: Moscow Architectural Institute]. Moscow, 2009.167 p.: ill. RSL OD, 61 09-18/13.
2. Amer Ahmed Saeed Abdallah. Principles of Formation of a Sustainable Architecture of a Rural Dwelling for a Hot, Dry Climate (on the Example of Egypt): Dissertation ... PhD in Architecture: 05.23.20 / Amer Ahmed Saeed Abdallah; [Place of defense: Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering], 2019. 291 p.
3. Belkin A.N., Al Darf Adnan B., Khirbik M.M., Ismail M. Concept of formation of systems of open green spaces of Syrian cities based on belligerive landscapes. *Forest Bulletin / Forestry Bulletin*. 2018. T. 22. No. 3. Pp. 90-96. doi:10.18698/2542-1468-2018-3-90-96
4. Lavrova O.P. Landscape architecture and the formation of a comfortable urban environment. Proceedings of the XVIII All-Russian Scientific and Practical Conference [Text]: collection of works / Nizhegor. State architects.-builds. un-t; (responsible. Ed.) N. Novgorod: NNGASU, 2022. 218 p. ISBN 978-5-528-00493-8
5. Nefedov V.A. Architectural and landscape reconstruction as a means of optimizing the urban environment: Diss. Doctor of Architecture. – SPb., 2005.
6. Pestryakova E.R. Principles of formation of architectural and planning organization of social residential buildings taking into account transformation // *Urban planning and architecture*. 2022. T. 12. No. 2. Pp. 113-119. doi:10.17673/10.17673/Vestnik.2022.02.15
7. Poltorak G.I. Problems of architectural ecology. M.: Knowledge, Construction and Architecture, 5/1985.
8. Trukhachev S. Y. Architectural and planning principles of urban zoning (on the example of the cities of the South of Russia): dissertation ... Candidate of Architecture: 18.00.04 / Trukhachev Sergey Yuryevich; [Place of defense: Moscow Architectural Institute (State Academy)]. Moscow, 2008. 191 p.: ill.
9. Ayad, may, Ali ElSaiyyad, Nanees Abdel Hamid Mohamed; and El Gizawi, Lamis. The Flexibility Effect of Using Heritage Formation Vocabulary in Contemporary Architecture. *Mansoura Engineering Journal*. 2022. Vol. 47. Iss. 2. Article 13. Electronic resource available. <https://doi.org/10.21608/bfemu.2022.248285>
10. Golany G. Design for Arid Regions Urban form Design for Arid Regions. Van Nostrand Reinhold Company: New York, 1983.
11. Hani Kh. S.A., Visual and Aesthetic Aspects and Elements of the city "Analytical Study of the Centre of Nablus", An-Najah National University, Nablus, Palestine. 2004.
12. Nikos A. Salingaros, Umbau-Verlag, Solingen, A THEORY OF ARCHITECTURE, Germany, 280 pages, ISBN 3-937954-07-4
13. Wafaa Naji Al-Astal. The Impact of Pedestrians Streets on sustainability of Urban Areas Case Study (city Center of Khan younis), 2015. 245 p.
14. Bassem Issa Abdel Rahmana Dahera. Formirovanie i upravlenie selskim razvitiem v selskoj mestnosti Palestin, [Shaping and directing rural development in the Palestinian countryside]. Case study - Beit Iba village. 2009. 149 p.
15. Khalaf Hussein Ali Al-Dulaimi. Gorodskoe planirovanie. *Osnovy i koncepcii* [Urban Planning / Foundations and Concepts]. 2002. 208 p.
16. Reem Abdel Mohsen Khanji. Zapolnenie gorodskih pustot v istoricheskoy gorodskoj tkani [Completing the Urban Voids in the Historical Urban Fabric]. 2018. 180 p.
17. Saad Abdel Rahman. Povedenie cheloveka, analiz i izmerenie peremennyh [Human behavior, analysis and measurement of variables], 1st edition, Cairo: Cairo Modern Library, 1971. 135 p.
18. Al-Obaidi, Maysaa Mowafaq, Sharif, Anwar Mishal, arhitekturnoe nasledie goroda Mosula kak otpravnaya tochka dlya vosstanovleniya chert starogo goroda, analiticheskoe issledovanie starogo goroda na urovnyah planirovaniya i proektirovaniya[the architectural legacy of the city of Mosul as a starting point for rebuilding the features of the old city, an analytical study of the old city at the planning and design levels]. *International Journal of Architecture, Engineering and Technology*. 2019. Vol. 2. Iss. 2. Pp. 21-36.
19. Muhammad Abdullah Mabkhout Al-Awdari. Sovremennyye sobytiya i ih vliyanie na gorodskuyu strukturu goroda [Modern Developments and Their Impact on the Urban Fabric of the City]. 2009.
20. Hani Al-Farran. Opredelyayushie faktory vizualnogo dizajna obshchestvennyh gorodskih prostranstv arabskogo goroda [Determinants of visual design of public urban spaces in the Arab city]. *Journal of Urbanism and Urban Technologies* is a peer-reviewed scientific journal issued by the Urban and Ocean Technologies Laboratory, University of M'sila – Algeria. 2010. No. 2 (dec.). Pp. 68-88. ISSN: 1112-9581.

Информация об авторах:

Енин Александр Егорович

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж, Россия,
кандидат архитектуры, профессор, декан факультета архитектуры и градостроительства.

E-mail: a_yenin@mail.ru

Абуасад Мунтер Мухаммед Хасан

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж, Россия,
аспирант факультета архитектуры и градостроительства.

E-mail: munther.ps@mail.ru

Information about authors:

Enin Alexander Eg.

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia,
candidate of architecture, professor, dean of the faculty of Architecture and Urban Planning.

E-mail: a_yenin@mail.ru

Abuasad Munther Mohammed Hasan

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia,
postgraduate student of the Faculty of Architecture and Urban Planning.

E-mail: munther.ps@mail.ru

С.Н. КРИВОШАПКО¹¹Российский университет дружбы народов, г. Москва, Россия

ПРИМЕРЫ АРХИТЕКТУРНЫХ СТИЛЕЙ, НАПРАВЛЕНИЙ И СТИЛЕВЫХ ТЕЧЕНИЙ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ КРИВОЛИНЕЙНОЙ ФОРМЫ

Аннотация. Даны определения понятий «Архитектурный стиль», «Архитектурное направление» и «Стилевое течение». Установлены пять архитектурных групп, а именно, «Авангард», «Ар-деко», «Модернизм», «Экоархитектура» и «Новейшие стили», содержащих сооружения криволинейной формы, оболочечные структуры и тонкие оболочки строительного назначения. В работе впервые собраны и проиллюстрированы на конкретных примерах все известные архитектурные стили и их подвиды применительно только к сооружениям криволинейной формы, в том числе, к оболочечным структурам и тонкостенным оболочкам. Представлены известные определения для архитектурных стилей, направлений и стилиевых течений, которые наиболее точно отражают содержание этих понятий. Приведена соответствующая хронология возникновения архитектурных стилей и их подвидов. Отмечен, заметный рост интереса к проектированию и строительству большепролетных оболочек и оболочечных структур в XXI-ом веке. После изучения опубликованных материалов было установлено, что в XXI-ом веке архитекторами были использованы 16 архитектурных стилей. Представленные материалы могут помочь появлению новых исследований по классификации архитектурных стилей, их систематизации, уточнению определений и хронологии их появления.

Ключевые слова: архитектурная группа, архитектурный стиль, оболочка, оболочечные структуры, здания криволинейной формы.

S.N. KRIVOSHAPKO¹¹Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia

THE EXAMPLES OF ARCHITECTURAL STYLES, DIRECTIONS, AND STYLE FLOWS FOR BUILDING ERECTIONS OF CURVILINEAR FORM

Abstract. The definitions of concepts "Architectural style", "Architectural direction", and "Style flow" are given. Five architectural groups that are "Vanguard", "Ar-deco", "Modernism", "Eco-tech", and "the Newest Styles" containing erections of curvilinear form, shell structures, and thin shells of building purposes were determined. In the work, all known architectural styles and their sub-semblances as applied only to erections of curvilinear form including shell structures and thin-walled shells were firstly gathered and illustrated for concrete examples. The known definitions for architectural styles, directions, and style flows that reflect exactly the content of these concepts are presented. The proper chronology of origin of architectural styles and their sub-semblances are adduced. Marked rise of interest to designing and building of large-span shells and shell structures in the 21st century is mentioned. In the 21st century, architects used 16 architectural styles. The materials presented can help to the researchers in the carrying of new investigations devoted to classification of architectural styles, their systematization, more accurate definition and chronology of their appearance.

Keywords: architectural group, architectural style, shell, shell structure, erection of curvilinear form.

Введение

До сих пор нет четких однозначных определений архитектурного стиля, архитектурного направления и стилиевого течения.

© Кривошапко С.Н., 2023

В статье будут использоваться нижеприведенные определения.

Архитектурный стиль – целостная совокупность характерных черт и признаков произведения архитектуры определённого времени и места. Характерные черты стиля, проявляющиеся в особенностях творческого метода архитектора, способах формообразования, приёмах композиции, функциональной, конструктивной и художественной сторон. Разнообразие архитектурных стилей столь велико, что порой их сложно чётко классифицировать даже специалистам. Тем более, что в среде искусствоведов Запада и России нет единого взгляда на многие вещи.

Архитектурное направление сохраняет основные положения базового архитектурного стиля, но убирает или добавляет некоторые новые критерии в связи с появлением дополнительных требований архитекторов и инженеров.

Стилевое течение сохраняет большинство основных положений базового архитектурного направления, но по желанию архитекторов вводятся небольшие изменения в геометрию сооружений, заменяется часть конструкционных материалов на более современные, учитывается увеличивающееся использование ЭВМ и корректируется требования к облику сооружения в связи с изменением вкусов населения.

Авторы работы [1] предлагают разделить все архитектурные стили на 19 групп. В 5 групп: «Авангард», «Ар-деко», «Модернизм», «Экоархитектура» и «Новейшие стили» можно включить все известные на сегодняшний день архитектурные стили, направления и стилевые течения, использовавшиеся при проектировании тонких оболочек и оболочечных структур.

Цель исследования

Данная статья является продолжением ранее опубликованных работ автора [2, 3, 4]. До настоящего времени нет обзорных и обобщающих работ, по-видимому, кроме [5, 6], где были бы охарактеризованы в одном источнике большинство архитектурных стилей, направлений и стилевых течений для строительных сооружений криволинейной формы, даны известные определения этих стилей и приведена хронология их появления. Данная статья, по возможности, ликвидирует этот пробел в исследовании указанных проблем применительно к сооружениям криволинейной формы. Особенное внимание будет уделено оболочечным структурам и тонким оболочкам строительного назначения.

Архитектурные стили, направления и стилевые течения в архитектурной группе «Авангард» с 1890 года

Архитектурная группа «Авангард» начала формироваться в конце XIX – начале XX века, когда стали возводиться большепролетные оболочки их металлических стержней, дерева и железобетона. В качестве примера можно указать на сооружение «Гётеанум-1» с полностью деревянным каркасом, г. Дорнах, Швейцария, 1915 г. (сгорело в конце 1922 года). Считается первым сооружением бионической архитектуры (сферический купол). Считается, что первая железобетонная оболочка была построена на железнодорожной станции Le Bergu в Париже в 1910 г. («Функционализм») [7]. Металлические ребристо-кольцевые и сетчато-стержневые оболочки появились в конце XIX-го – первой половины XX-го веков, что дало толчок к организации архитектурных стилей «Функционализм» и «Промышленная архитектура» [8].

Органическая архитектура (рисунок 1 а) охватывает более широкий круг сооружений, чем бионическая. Органическая архитектура — не только течение архитектурной мысли, но и настоящая философия, в основе которой лежит идея о гармонии человека с окружающим миром (рисунок 1 б). Органическая архитектура зародилась в 1890-е гг. Создателем концепции органической архитектуры считается американский архитектор Луис Салливан (Louis Sullivan). Понятие «органическая архитектура» было придумано Фрэнком Райтом (F.L. Wright) в 1908 году. Отличительной чертой органической архитектуры стала приверженность к природным материалам. Используется камень, дерево и стекло (рисунок 1 б). Выражение «форма и функция едины» является стержнем органической архитектуры.

Бионическая архитектура возникла в 18-ом веке, но стала особенно популярна с начала 21 века. Термин «бионическая» впервые появился в 1958 году. Бионическая архитектура старается максимально вписать архитектурные объекты в природную среду. Бионическая архитектура в своем дальнейшем развитии стремится к созданию экодому (рисунок 1 в).

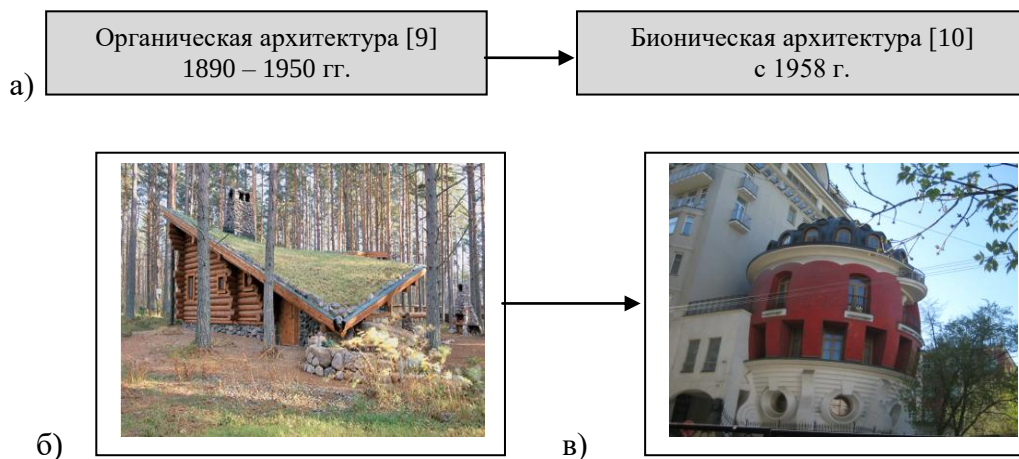


Рисунок 1 - Хронологическая последовательность возникновения архитектурных стилей «Органическая архитектура» и «Бионическая архитектура»:

- а) Хронология возникновения архитектурных стилей;
б) Дом архитектора И. Фирсова в г. Приморск, Финский залив. «Органическая архитектура»;
в) Жилой дом «Яйцо», г. Москва. «Бионическая архитектура».

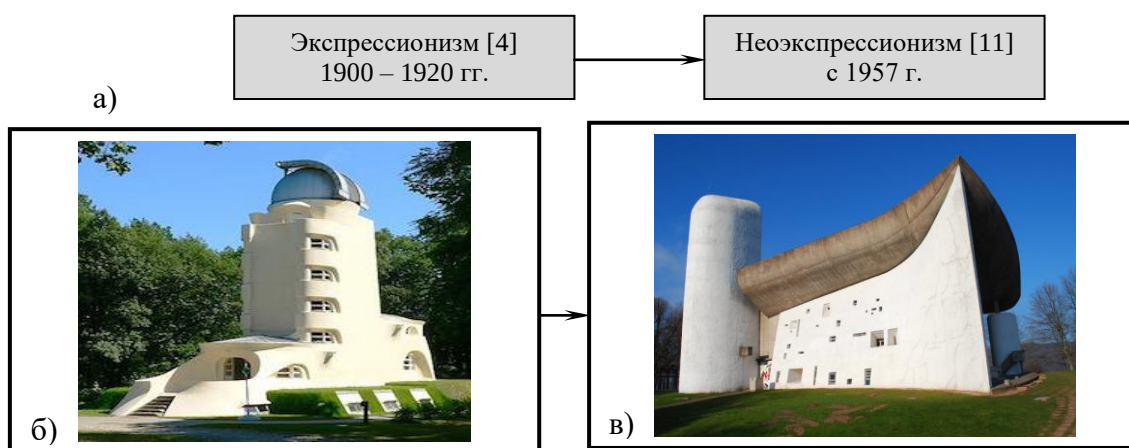


Рисунок 2 - Хронологическая последовательность возникновения архитектурных стилей «Экспрессионизм» и «Неоэкспрессионизм»:

- а) Хронология возникновения архитектурных стилей;
б) The Einstein Tower in Potsdam, Germany «Экспрессионизм»;
в) Капелла Нотр-Дам-дю-О в Роншане, Франция, 1956 г., арх. Ле Корбюзье: «Неоэкспрессионизм».

Экспрессионизм (рисунок 2 а) – это отказ от традиций и условностей с целью достичь максимальной эмоциональности, силы воздействия на человека. Формообразование заключалась в намеренном искажении традиционных форм с целью вызвать сильный эмоциональный отклик. Используются силуэты, вызывающие в воображении очертания утесов, сталактитов, гротов, заостренность, гротескность. Применяется деформация привычных геометрических форм, правильные геометрические формы отвергались (рисунок 2 б). Материалы – бетон и железобетон, стекло.

Неоэкспрессионизм представляет собой направление в архитектуре, которое возникло в 50-х годах в противовес функционализму и органической архитектуре. По сравнению с экспрессионизмом начала XX века новое направление 1950-х и последующих годов опирается на достижения науки и техники, позволяющие создавать большепролетные конструкции. Со второй половины 1950-х годов многие архитекторы стали отказываться от принципов и догм функционализма. Это были попытки развить принципы экспрессионизма на новом этапе. Неожиданным был переход Ле Корбюзье, лидера функционализма, на позиции неоэкспрессионизма. Замыслы Ле Корбюзье изменили экспрессионизм и придали ему новое дыхание (рисунок 2 в).

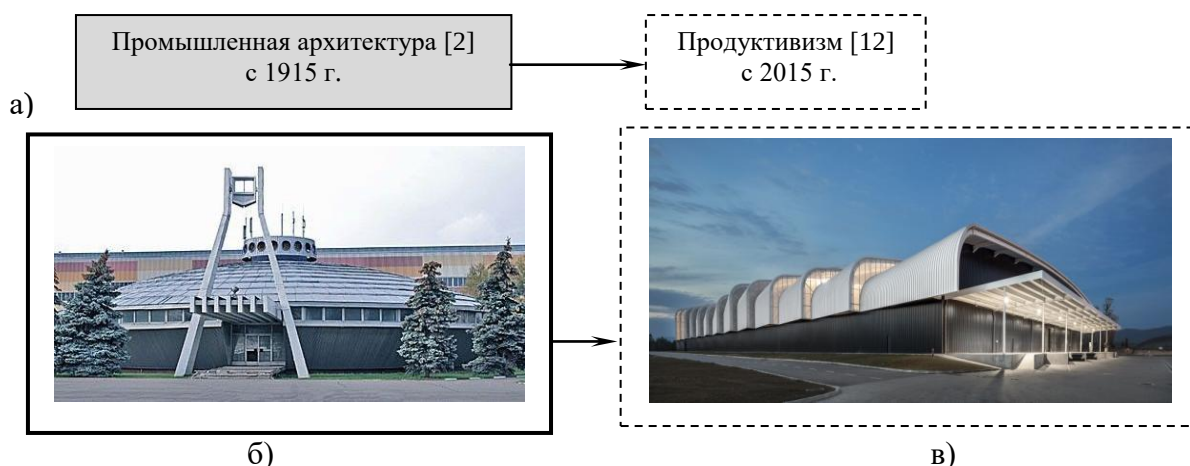


Рисунок 3 - Хронологическая последовательность возникновения архитектурного стиля «Промышленная архитектура» и стилевого течения «Продуктивизм»:

- а) Хронология возникновения архитектурного стиля и его стилевого течения;
 б) Музей автомобильного завода имени Ленинского комсомола, г. Москва, 1972, «Промышленная архитектура»;
 в) Промышленное здание, Vorrhalha, Португалия, 2017, «Продуктивизм».

Промышленная архитектура упростила проектирование зданий, используя материалы, пригодные для промышленного производства и расширила использование стекла (рисунок 3 а, б). С 1970-х годов термин «промышленная архитектура» стал трактоваться намного шире, чем при появлении этого архитектурного стиля.

Продуктивизм полагает, что только продукт промышленного дизайна может быть архитектурным произведением. К. Фремington считает, что этот архитектурный стиль представлен архитекторами Н. Фостером (N. Foster), Р. Роджерсом (R. Rogers) и С. Пелли (César Pelli). Он полагает, что сооружение должно состоять из большеразмерных индустриальных блоков (рисунок 3 в).

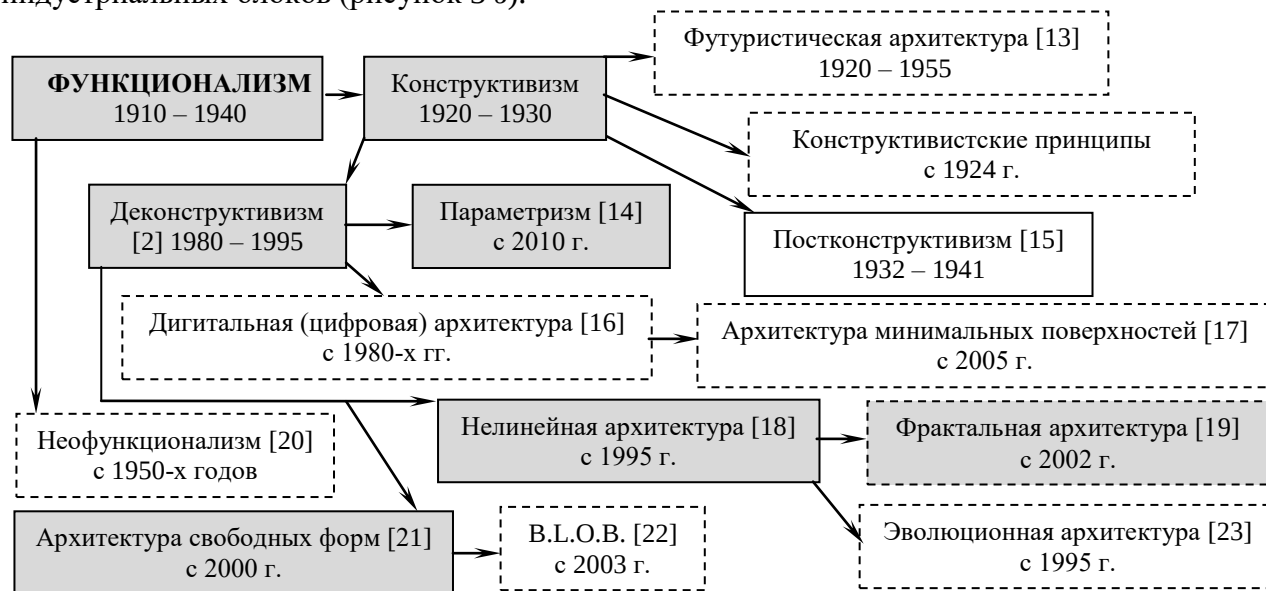


Рисунок 4 - Возникновение архитектурных стилей, их подвидов и архитектурных течений на основе архитектурного стиля «Функционализм», входящего в архитектурную группу «Авангард»

Идеология функционализма в архитектуре заключается в создании форм при помощи самых современных способов и конструкций, которые бы обеспечивали наилучшее функционирование объекта, все излишнее отбрасывается (рисунок 4).

Функционализм провозгласил функцию единственным несомненным источником формообразования и отказались от декора из-за его утилитарной нецелесообразности.



Рисунок 5 - Криволинейные сооружения в архитектурных стилях и стилевых течениях на основе архитектурного стиля «Функционализм», входящего в архитектурную группу «Авангард»

Функционализм проповедует предельный практицизм и простоту. На его основе возникло несколько архитектурных стилей, направлений и стилевых течений (рисунок 4)

Ведущим направлением 1950-х годов становится *новый функционализм*, или *неофункционализм*. По сравнению с функционализмом 1910–1940-х годов неофункционализм опирается на передовую строительную технику, новые конструкции и материалы. По сути это тот же «Функционализм», но с признаками романтизма и роскоши без ущерба для функции.

Сооружения, построенные в стиле конструктивизма не всегда удобны для использования, но несут в своем облике подчеркнuto индустриальные черты, уподобляясь техническому изделию. Архитектурный конструктивизм начался с павильона для первой Всемирной выставки, состоявшейся в 1851 году в Лондоне, и Эйфелевой башни. Но вот сам термин – конструктивизм – предложили миру советские художники и зодчие. Главные типы сооружений – это промышленные здания, рабочие клубы, фабрики-кухни. У архитектурного стиля «Конструктивизм» есть несколько разновидностей (рисунки 5, 6).

Футуристическая архитектура появилась в Италии в 20-х годах как авангардистский вариант архитектуры. Хотя интерес в мире к этому направлению архитектуры стал угасать в 50-е годы, в СССР он был популярен до 1990-х годов. К особенностям этого направления относят длинные или ломаные линии, необычные формы и техногенные мотивы.

Конструктивистская архитектура (конструктивистские принципы) – это стиль архитектуры, процветавший в Советском Союзе в 1920-х и в начале 1930-х годов. Движение стремилось отразить современное индустриальное общество, отказываясь при этом от декоративной стилизации в пользу промышленной сборки материалов. Сооружения похожи на индустриальные здания.



Рисунок 6 - Архитектурный стиль «Конструктивизм» и его стилевые течения «Неоконструктивизм» и «Постконструктивизм»

Неоконструктивисты продолжили те поиски, которые начали конструктивисты. Они так же активно используют тяжеловесные, крупные объемы, как правило, лаконичной формы. Неоконструктивизм использует красный, синий, черный цвета. Примером могут служить работы таких архитекторов, как Жана Нувеля, Рэма Коолхаса, Бернарда Чуми [24].

Постконструктивизм – переходный архитектурный стиль, существовавший в Советском Союзе в 1930-х годах. Характеризовался как "неоклассические формы без неоклассической детализации". Некоторые исследователи предпочитают говорить не о постконструктивизме, а о советском варианте стиля *ар деко*.

Деконструктивизм – стиль с ломаными формами и конструкциями, сложными для визуального восприятия. Теоретик деконструктивизма – Ж. Деррида (J. Derrida). Для стиля характерно отсутствие гармонии и симметрии. Активным поборником идеологии архитектурного деконструктивизма является Фрэнк Гери.

Параметризм (англ. *Parametricism*), или *алгоритмическая архитектура* – архитектурный стиль постиндустриального общества, стиль цифровой эпохи. Особенности

этого архитектурного направления – это необычные формы, противостоящие геометрическим фигурам, плавные, перетекающие друг в друга поверхности. Основатель стиля – П. Шумахер (P. Schumacher), который представил его как новый глобальный стиль архитектуры [25]. Архитектурная форма моделируется на основе ее математического представления с привлечением ЭВМ.

Дигитальная (цифровая) архитектура – совокупность архитектурных объектов, созданных с использованием компьютерных технологий так, что без этих технологий сами объекты существовать не могут. Дигитальная архитектура использует технические возможности компьютера и мультимедийные технологии в качестве основного формообразующего принципа.

Архитектурное направление «*Архитектура минимальных поверхностей*» (Minimal Surface Architecture) возникло около 2005 года. Это направление является составной частью дигитальной (цифровой) архитектуры.

Нелинейная архитектура состоит из трех относительно самостоятельных творческих течений: гиперсупрематизм, неосупрематизм, сюрреалистическая архитектура-скульптура. Нелинейная архитектура обращается к сложно-упорядоченным системам, аналоги которых можно видеть в природе. Данные системы отличаются уникальностью, богатством и разнообразием форм. Привычным геометрическим объемом и принципом классической архитектуры противопоставляются новые динамические и гибкие объекты нелинейной архитектуры: волны, складки, сплайновые поверхности. Гибкость и согласованность в проектировании достигается посредством применения стремительно развивающихся BIM технологий.

Фрактальная архитектура – это повторение самоподобных форм, т.е. фрактальных правил построения. В современной архитектуре жилых и общественных зданий и сооружений применяются фрактальные правила построения такие как: самоподобие, динамичность, нерегулярность, рекурсивность и дробность.

Эволюционная архитектура является стилевым течением нелинейной архитектуры [12]. В качестве инструментов создания архитектурного дизайна используются законы эволюции и морфогенеза. В целом, эволюционная архитектура является мощным инструментом для решения сложных задач оптимизации и проектирования, особенно в ситуациях, где традиционные методы неэффективны или недостаточны.

Архитектура свободных форм проявила бурное развитие около 2005 года, что способствовало появлению архитектурной геометрии для оптимизации некоторых проблем, возникающих при проектировании в этом стиле. Основателем архитектуры свободных форм считается Ф. Генри (Frank Gehry). В наши дни число архитекторов, работающих в этом направлении, всё увеличивается, как и число объектов, построенных в разных странах.

Термин «*архитектура blob*» был придуман архитектором Греггом Линном в 1995 году в его экспериментах по цифровому дизайну. Название стиля переводится как binary large object или капля. Конструкции зданий в стиле *блоб* имеют особые текущие, плывущие формы. Иногда это стилевое течение называют «*Пузырьковая архитектура*».

Архитектурный стиль «*Архитектура многогранников*» (рисунок 5), по-видимому, ближе всего к архитектурному стилю «*Кубизм*».

Концепции и основные положения, лежащие в основе архитектурной группы «Авангард», продолжают использоваться и в XXI веке. Особенно большой популярностью пользуются сооружения, выполненные в рамках архитектурных направлений «Архитектура многогранников» [26], «Архитектура свободных форм» [27], стилевое течение «Продуктивизм» (рисунок 3).

Архитектурные стили, направления и стилевые течения в архитектурной группе «Модернизм» в 1925 -1980-х годах

В рамках архитектурной группы «Модернизм», которую можно назвать также архитектурным стилем «Модернизм» (рисунок 7), возникли четыре архитектурных стиля и несколько стилевых течений. До настоящего времени архитекторы продолжают

проектировать пространственные металлические стержневые структуры, тентовые и вантовые сооружения, оболочки из композитных и деревянных материалов в архитектурных стилях «Хай-тек», «Постмодернизм» и «Параметризм», а также использовать архитектурное течение «Структурализм» (рисунок 7).

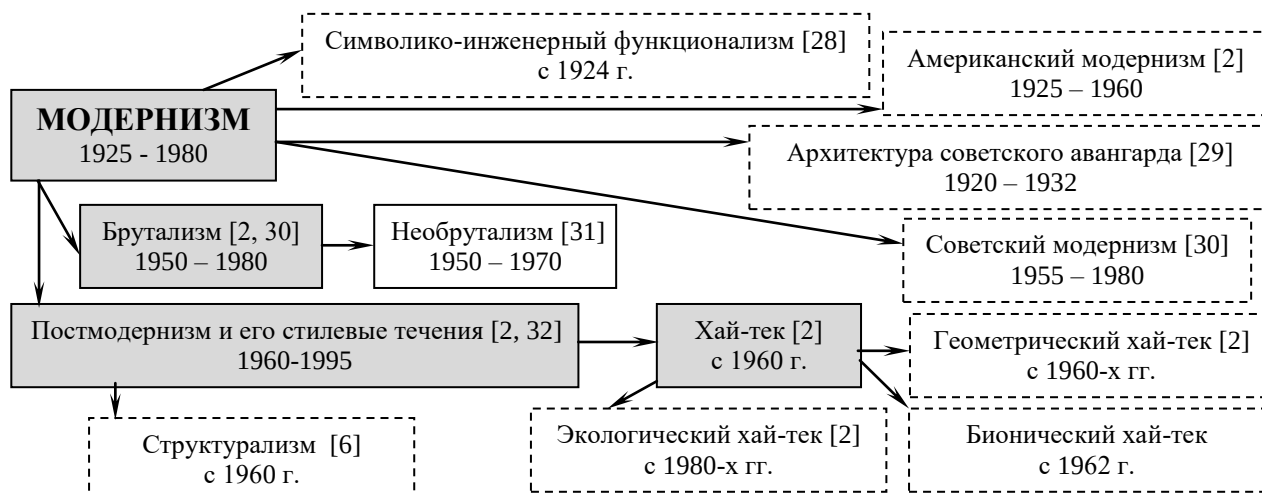


Рисунок 7 - Возникновение архитектурных стилей и стилевых течений на основе архитектурного стиля «Модернизм», входящего в архитектурную группу «Модернизм»

Модернизм (рисунок 8) – архитектурный стиль, основанный на инновационных для XX-го века технологиях строительства с использованием стекла, стали и железобетона. Критериями в архитектуре стали функциональность, минимализм, отказ от орнамента. Модернизм в архитектуре представлен разными течениями, которые появились в начале 20 века в противовес романтическому Модерну [32]. Специалисты отмечают, что существует много путаницы в определениях этих двух стилей.

Символично-инженерный функционализм: символические монументальные формы, следование архитектуры за предназначением сооружения, использование новых инженерных решений, обязательное применение в сооружении простых криволинейных поверхностей.

Американский модернизм - обновление форм и конструкций, отказ от художественных стилей прошлого. Архитектура модернизма основана на принципе, который впервые сформулировал Л. Салливан: «Форма следует за функцией». Культовая постройка американского модернизма – это терминал аэропорта им. Дж. Кеннеди (компания TWA).

Архитектурное направление «*Архитектура советского авангарда*» как модернистское направление архитектуры Советской России просуществовало всего около десяти лет с 1920 по 1932-ой год. Эта архитектура дала начало многим архитектурным стилям и стилевым течениям: архитектурному конструктивизму, романтизму, символично-инженерному функционализму, советскому модернизму и постмодернизму.

Советский модернизм в оболочечных структурах – продолжение авангарда 1920-х годов. Он вернулся в Россию в 1960-1980-х.

«Скульптурные» возможности бетона - главный элемент художественного языка у архитектурного стиля «*Брутализм*» (рисунок 9). Сооружения имели массивные формы и конструкции. Одна из главных особенностей брутализма в СССР - использование в отделке не бетонной смеси, а других отделочных материалов, в основном, каменных плит.

Необрутализм (новый брутализм, англ. New Brutalism), так же как «Функционализм» и «Структурализм», признают функциональную и конструктивную логику при создании архитектурного произведения, но в отличие от Структурализма, который обращается в основном к железобетону, необрутализм часто стремится показать выразительность естественного камня, кирпича и дерева. Необрутализм – это попытки возродить брутализм в современных условиях (рисунок 9).



Рисунок 8 - Криволинейные сооружения в архитектурных стилях и стилевых течениях на основе архитектурного стиля «Модернизм», входящего в архитектурную группу «Модернизм»

У архитектурного стиля «Модернизм» есть несколько разновидностей (рисунок 8, 10), которые были популярны у архитекторов в разное время.

Архитектурный стиль «Постмодернизм» зародился в 1970 – 1980-х годах. Это был возврат к орнаменту и более утонченному дизайну. Постмодерн в архитектуре определяется следующими особенностями: использование элементов старых стилей, от которых изначально отказались модернисты; гармоничное единение с ландшафтом местности; искусственное подражание архитектурным памятникам прошлых эпох, создание новых символов современности; основа стиля – классицизм, применение традиционных форм в необычном формате; возвращение образности, утерянной за годы господства модернизма [https://artyhomes.ru/postmodernizm-v-arhitecture/]. Чарлз Дженкс (Ch. Al. Jencks) – отец англо-американской ветви постмодернизма. Постмодернизм возник как реакция на рациональную стереотипность модернистской архитектуры. Постмодернизм в Москве не так распространён, как модернизм или конструктивизм. Постмодернизм не получил однозначного определения. Он определен как явление, объединяющее различные направления для которых общим является противопоставление «современному движению» (модернизму).

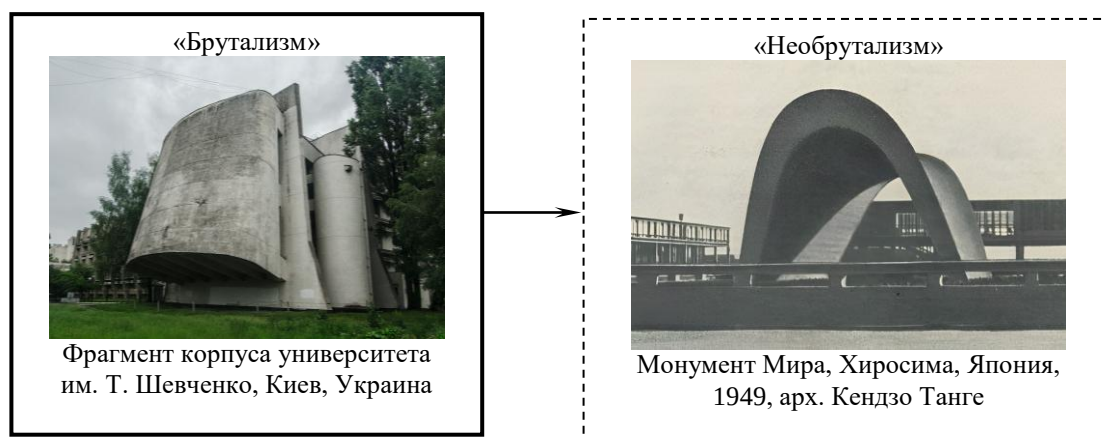


Рисунок 9 - Архитектурный стиль «Брутализм» и стилевое течение «Необрутализм»



Рисунок 10 - Архитектурный стиль «Модернизм» и его разновидности

Неомодернизм – творческое направление в архитектуре, которое обращается к идеям модернизма 1920-х годов и развивает их, а иногда цитирует модернизм. Существует мнение, что неомодернизм выделился из постмодернизма.

Структурализм – это возврат к романтизму, экспрессии и национальной специфике; чистота линий; отсылка к формам, свойственным живой природе; высокая функциональность. Структурализм творчески использует выразительные возможности хорошо изученных разнообразных конструкций и базируется при проектировании на выборе вариантов конструкций не только по техническим показателям, но и по их

формообразующему потенциалу. Материалы – бетонные панели, металлические секции, стальные тросы.

«Хай-тек» (*высокая технология*) – высшее проявление *технизма*. Архитектурный стиль «Хай-тек» («Структурный экспрессионизм») – это в первую очередь абсолютная функциональность зданий, подчеркнутая ясность пространственных решений и легкость конструкций. В качестве основных материалов выступает стекло, металл и пластик. Имеются разновидности стиля: геометрический хай-тек, бионический, экологический хай-тек, иногда говорят об индустриальном хай-теке. Стиль в архитектуре и дизайне, зародившийся в недрах позднего модернизма в 1970-х и нашедший широкое применение в 1980-х. Главные теоретики и практики хай-тека – Норман Фостер, Ричард Роджерс и Николас Гримшоу.

Геометрический хай-тек характеризуется поисками новых форм здания, выявлением удачной несущей системы сооружения на основе современных материалов, созданием новых покрытий без промежуточных опор и появлением ранее неиспользовавшихся геометрических структур здания.

Строительство зданий с использованием исключительно натуральных материалов, сохранение окружающего ландшафта, использование природной энергии в виде солнца, ветра и переработанной дождевой воды, уникальный внешний вид и неординарный дизайн – отличительные черты разновидности архитектурного стиля «хай-тек» – «экологический хай-тек». Этот стиль многое взял из органической архитектуры (рисунок 1).



Художественный музей Милуоки (крылья могут складываться и разворачиваться), 2001 г., арх. С. Калатрава
«Кинетическая архитектура»



Стадион Sky-dome, Торонто, Канада (защита от дождя и ветра), 1989 г., арх. Rod Robbie, инж. Michael Allen
«Кинетическая архитектура»

Рисунок 11 - Архитектурный стиль «Кинетическая архитектура»

Бионический хай-тек – это внедрение форм живой природы в архитектуре, например, храм Лотоса в Индии, 1986 г., проект плавучего города «Кувшинка» (арх. бюро Vincent Callebaut).

На фасадах зданий, построенных в стиле «Индустриального хай-тека», можно увидеть архитектурные детали и инженерные коммуникации, которые находятся внутри сооружений (лифты, трубопроводы, лестницы, системы вентиляции и неприкрытые металлические конструкции).

Кинетическая архитектур (*динамическая архитектура*) – направление архитектуры, в котором части здания могут изменяться относительно друг друга, не нарушая общую целостность структуры [33]. Этот стиль относят к направлению архитектуры будущего (рисунок 11). К началу 21 века сформировались несколько типов кинетической архитектуры. Стиль «Кинетическая архитектура» в России на данный момент не представлен за исключением стадионов с раздвижным полем и крышей. Концепция кинетической архитектуры была разработана в 1970-х годах, приблизительно в тот же период, что и адаптивная архитектура (1960-е годы) и имеет несколько общих черт.

«Разгул творческой фантазии в *постмодернизме* превзошел все предыдущие этапы зодчества вместе взятые, порою доходило до того, что каждый архитектор представлял как

минимум одну, а иногда даже несколько концепций. Все это с научной точки зрения затрудняет классификацию архитектурных концепций по каким-либо критериям» [11].

Применительно к оболочечным структурам выдвигались следующие стилевые течения: советский деконструктивизм, поп-архитектура (рисунок 12), новый модернизм, новый авангардизм (пирамида Лувра, Париж, арх. Ио М. Пей, 1989 г.), нарочитый символизм (рисунок 13), авторская архитектура («Дворец пузырей», Канны, арх. А. Ловэг, 1989 г.), тотальный дизайн (музей вулканологии, Оуре-нес-Рохес, Франция, арх. Х. Холляйн, 1999 г.) (рисунок 14 а), техноэкспрессионизм (с 1970 г., рисунок 14 б), зеркальная архитектура (рисунок 14 в).

Некоторые указанные стилевые течения не получили широкого распространения, скорее всего они были единичными, другие течения ждут дальнейшего полноценного выражения, а третьи уже нашли применение в десятках сооружений.



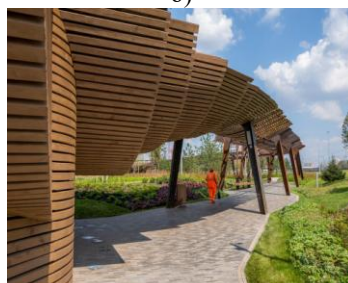
Рисунок 12 - Бар "Asahi",
арх. Ф. Старк, Токио, 1989 г.
(постмодернизм)
(стилевое течение поп-архитектура)



Рисунок 13 - Дом-ракушка,
пос. Таватуй, Свердловская обл.
(нарочитый символизм, или
архитектурная метафора)



«Тотальный» дизайн»



«Техноэкспрессионизм»



«Зеркальная архитектура»

Рисунок 14 - Силевые течения «Постмодернизма»:

а) Геодезический купол Р. Фуллера, Сент-Луис, США;

б) Тюфелева роща, Москва, 2008 г;

в) Отель «Бонавантюер» (the Westin Bonaventure Hotel), Лос-Анжелес, США, 1978 г., арх. Дж. Портмен.

Поп-архитектура, или «архитектура для масс» рассчитана на вкусы среднестатистического потребителя и часто определяется немецким словом «Kitsch» (означающим старую вещь, продаваемую за новую).

Теорию «тотального» дизайна» предложил Р. Фуллер. Он отвергал все функции архитектуры: эстетическую, информационную, культурную, кроме чисто утилитарной. Его концепция отвергала архитектуру вообще. Он заявлял, что техника – инструмент решения всех проблем. Р. Фуллер проводил смелые эксперименты с конструкциями, в частности, с «геодезическими куполами» (рисунок 14 а), которыми перекрывал значительные пространства, затрачивая при этом минимум материалов и усилий.

Зеркальная архитектура аннулирует архитектурные достоинства сооружения, а всё сводит к простому отражению окружающей среды.

В основном это были крупные конторские и коммерческие сооружения, которые стали облицовываться светоотражающими материалами и представлять собой гигантские зеркальные поверхности, которые отражают соседние здания, деревья, движущиеся автомобили, плывущие по небу облака (рисунок 14 в).

Авторская архитектура главной и важной считает роль архитектора, который рождает новые идеи и концепции, а затем реализует их. Это направление в архитектуре особенно ярко проявляется в современной японской архитектуре,

Архитектурный стиль и стилевые течения в архитектурной группе «Экоархитектура» с 1975 года по настоящее время

Архитектурная группа «Экоархитектура» или архитектура «устойчивого развития» начала формироваться в последней четверти XX-го века. В настоящее время она включает в себя архитектурный стиль «Ecotech» и два стилевых течения «Экологический хай-тек» и «Ноосферическая архитектура» (рисунок 15). Стилиевое течение «Экологический хай-тек» является также производным от архитектурного стиля «Хай-тек» (рисунок 7).

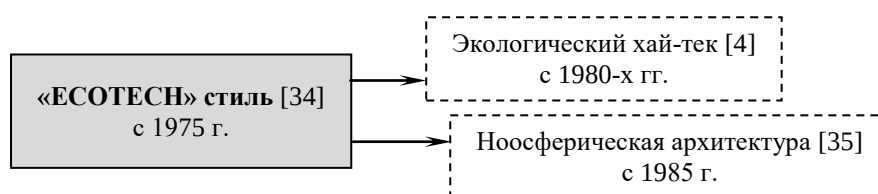


Рисунок 15 - Архитектурный стиль и архитектурные течения на основе архитектурного стиля ««Ecotech» стиль, входящего в архитектурную группу «Экоархитектура»



Рисунок 16 - Криволинейные сооружения в архитектурном стиле и стилевых течениях на основе архитектурного стиля «Ecotech», входящего в архитектурную группу «Экоархитектура»

В основу архитектурного стиля «Ecotech» положены принципы «нулевого энергопотребления», переработки отходов, сбора дождевой воды, использования солнечной, ветровой и других видов энергии при наиболее рациональном применении материалов и пространства, а также применения естественной инсоляции и вентиляции внутреннего пространства (рисунок 16).

Определение «Экологического хай-тека» дано ранее.

Архитектурные стили, направления и стилевые течения в архитектурной группе «Новейшие стили» с 2000 года по настоящее время

Параметрическая архитектура (рисунок 17) – это стиль, в котором взаимосвязаны такие понятия как скульптура, математика, архитектура, это стиль в архитектуре, основанный на аналитических методах задания поверхностей, математическом и компьютерном моделировании. Стиль сформировался в начале XXI века. Самыми известными архитекторами, работавшими в этом стиле, считаются Заха Хадид и Патрик Шумахер. Анализируя информативные источники можно выделить основные преимущества и особенности этого стиля: «особый» внешний вид зданий, инновационные формы; виртуозность решений; сложные компьютерные преобразования; продвижение компьютерных технологий, реализация уникальных творческих и организационных возможностей [38].

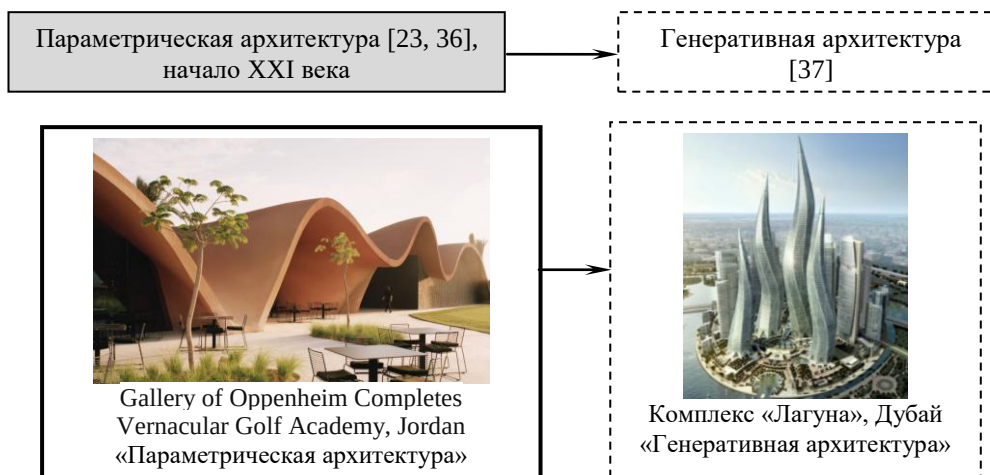


Рисунок 17 - Архитектурный стиль «Параметрическая архитектура» и стилевое течение «Генеративная архитектура»

Генеративная архитектура – это архитектура, полученная в результате определенных алгоритмов, основанных на ранее полученных данных и системы принятия решений созданной архитектором. Подходы к проектированию в параметрической и генеративной архитектуре близки, но вторая ближе к искусственному интеллекту. Основными методами в генеративном проектировании являются следующие методы: установка параметров; построение алгоритмов и правил; программирование процессов; варьирование результатов моделирования; визуализация процессов.



Рисунок 18 - Силевые течения архитектурного стиля «Этноархитектура»
а) Глинобитные жилые дома, Камерун, «Глинобитная архитектура»
б) Кафе Носепсо. Винь, Вьетнам, 2018 г., «Бамбуковая архитектура»
в) Современный дом в японском стиле «Этно»

Архитектурный стиль «*Этноархитектура*» – стиль с ярко выраженным национальным мотивом. В связи с этим появилось множество стилевых течений, например, *глинобитная архитектура* (рисунок 18 а), *бамбуковая архитектура* (рисунок 18 б), *этностиль* (рисунок 18 в) и др.

Эволюционная архитектура [39] и *Фрактальная архитектура* [19] являются стилевыми течениями нелинейной архитектуры [18]. Определение стилевых течений даны ранее (рисунок 4).

Адаптивная архитектура – это развивающаяся область архитектурной практики, которая измеряет состояние окружающей среды, адаптируя свою форму, цвет или функцию к целям наибольшего соответствия требованиям эксплуатации. К адаптивной архитектуре относится вид архитектурных объектов, которые демонстрируют способность изменять свои характеристики в соответствии с изменениями условий эксплуатации (рисунок 19). Несмотря на то, что термин «Адаптивная архитектура» появился в конце 1960-х годов, в Российской Федерации существует пока единственное здание, относящееся к адаптивной архитектуре, здание "ГИПЕРКУБ". Оно построено по проекту архитектора Б. Бернаскони в 2012 г. Это первое инновационное здание в Инновационном центре "Сколково". Однако это здание нельзя причислить к оболочечным структурам.



Рисунок 19 - Сооружения, выполненные по критериям «Адаптивной архитектуры»

Архитектурные стили, направления и стилевые течения XXI-го века

В работе [40] отмечается, что в XXI-ом веке наблюдается заметный рост интереса к проектированию и строительству большепролетных оболочек и оболочечных структур. После изучения опубликованных материалов было установлено, что в XXI-ом веке архитекторами были использованы 16 архитектурных стилей, а именно: *Промышленная архитектура*, *Архитектурный конструктивизм*, *Деконструктивизм* (культурный центр г. Алиева в Баку, Азербайджан, 2012 г.), *Бионическая архитектура* (дом «Яйцо», Москва, 2002 г.), *Органическая архитектура* (вилла «Shell», Kuruizawa, Япония, 2008 г.), *Экспрессионизм* (Художественный Музей в Милуоки, Висконсин, США, 2001 г.), *Американский модернизм* (терминал № 5 аэропорта им. Дж. Кеннеди, 2008 г.), *Хай-тек* (сетчатые оболочки; купол центра SONY, Берлин, 2000 г.), *Геометрический хайтек* (ботанический сад «Эдем» в Корнуолле, Англия, 2001 г.), *Экологический хайтек* (сооружения экологической деревни Дитикан, Швейцария, 2009 г.), *Архитектура многогранников* (Национальная библиотека Беларуси, Минск, 2006 г.), *Брутализм* (автостанция Касар-де-Касерес, Испания, 2003 г., арх. Х.Г. Рубио), *Ноосферная архитектура* (купола В.И. Грибнева), *Параметрическая архитектура* (ТРК «PITERLAND», один из самых больших деревянных куполов в мире, диаметр 92 м, С.-Петербург, 2012 г.), *Архитектура свободных форм* («Стеклянная кора», Зарядье, Москва), *Продуктивизм* (рисунок 3 в).

Выводы, содержащиеся в статье [40], подтверждаются материалами статьи [41], где указываются, что в мире нет государств, где бы не было построено хотя бы одно оболочечное сооружение или оболочка.

Результаты исследования

В представленной работе впервые собраны и проиллюстрированы на конкретных примерах все известные архитектурные стили и их подвиды применительно только к сооружениям криволинейной формы, в том числе, к оболочечным структурам и тонкостенным оболочкам. Даны определения архитектурным стилям, направлениям и стилевым течениям. Приведена соответствующая хронология их возникновения. В приведенной хронологии есть разночтения с аналогичной хронологией использованной литературы, так как разные исследователи принимают разные даты возникновения архитектурных стилей в зависимости от даты строительства первых зданий, позднее причисленных к определенному стилю, или от даты описания соответствующего стиля, зафиксированного в публикациях, или исходя из своих представлений о причислении сооружения к выбранному архитектурному стилю.

Установлено, что архитектурная группа «Ар-деко» («Модерн», «Ар-нуво», «Югендстиль», «Либерти» [4]), из оболочек включает в себя только сооружения простейших форм: цилиндрические с вертикальной осью. Оболочек и оболочечных структур, выполненных в этом стиле, не обнаружено. Только отдельные элементы зданий можно отнести к этому стилю, например, пирамидальная крыша Marine Building (Ванкувер), 1929-1930 гг. Некоторые архитекторы называют ар-деко стилевым течением, другие – полноценным архитектурным стилем.

Отмечено, что некоторые сооружения криволинейной формы, в том числе, оболочечные структуры и тонкостенные оболочки, причисляют к разным стилям, а иногда сооружения могут быть отнесены одновременно к нескольким стилям. Это возникает из-за неразберихи в определении архитектурных стилей и их подвидов. Часто сооружения вообще трудно отнести к какому-либо архитектурному стилю. Иногда один и тот же стиль называется по-разному. Это связано с трудностями перевода терминов с иностранных языков. Представленные материалы могут внести определенный порядок в этом вопросе.

Заключение

Рассмотренные архитектурные стили, направления и стилевые течения не исчерпывают весь перечень существующих стилей и их подвидов. Как уже отмечалось во Введении, изучались только архитектурные стили и их разновидности, имеющие отношение к архитектуре сооружений криволинейной формы, оболочечным структурам и тонким оболочкам. В научно-технической литературе упоминаются от 16 до 40 архитектурных групп. Установлено, что только 5 из них включают в себя строительные сооружения криволинейной формы.

Архитекторы и инженеры все больший интерес проявляют к проектированию оболочечных структур, что вызвано производственной необходимостью, появлением новых строительных материалов, разработкой математиками-геометрами новых геометрических форм, заинтересованностью молодых архитекторов в создании инновационных сооружений, улучшенными эстетическими и эргономическими качествами общественных зданий и положительным эмоциональным воздействием на человека криволинейных форм сооружений, что стимулирует отход от прямолинейности и способствует развитию криволинейности в архитектуре.

У архитектора и инженера-строителя имеется большой потенциал в выборе формы, материала, методов расчета, конструктивных решений, архитектурных стилей и примеров применения большепролетных тонкостенных оболочечных конструкций и зданий криволинейной формы.

Представленные материалы могут помочь появлению новых исследований по классификации архитектурных стилей, их систематизации, уточнению определений и хронологии их появления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Печёнкин И., Давыдов В. Определитель архитектурных стилей. 2017 (электронный ресурс) [arzamas.academy/mag/446-arch]
2. Кривошапко С.Н., Алборова Л.А., Мамиева И.А. Оболочечные структуры: генезис, материалы и подвиды. Часть 1: Подвиды и направления // Academia. Архитектура и строительство. 2021. № 3. С. 125-134. doi:10.22337/2077-9038-2021-3-125-134
3. Krivoshapko S.N., Christian A., Bock Hyeng, Gil-oulbe Mathieu. Stages and architectural styles in design and building of shells and shell structures // Building and Reconstruction. 2022. No. 4 (102). Pp. 112-131. doi:10.33979/2073-7416-2022-102-4-112-131
4. Кривошапко С.Н. К вопросу об основных архитектурных стилях, направлениях и стилевых течениях для оболочек и оболочечных структур // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2022. Том 18. № 3. С. 255-268. doi:10.22363/1815-5235-2022-18-3-255-268
5. Аткина Л.И., Жукова М.В., Морозов А.М. Основные стили архитектуры. Характерные особенности. Екатеринбург: УГЛТУ, 2015. 37 с.
6. Андреева О.А. Памятник архитектуры – объект современной эпохи: учебное пособие. Ульяновск: УлГТУ, 2012. 117 с. ISBN 978-5-9795-0943-3
7. Krivoshapko S.N., Christian A., Bock Hyeng, Mamieva I.A. Chronology of erection of the earliest reinforced concrete shells // International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences (ISSN: 2076-734X, EISSN: 2076-7366). 2014. Vol. 18. Iss. 2. Pp. 95-108.
8. Кривошапко С.Н. Металлические ребристо-кольцевые и сетчато-стержневые оболочки XIX-го – первой половины XX-го веков // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2014. № 6. С. 4-15.
9. Курбатов Ю.И. Архитектура в контексте среды // Строительство и архитектура Ленинграда. 1977. № 4. С. 28-32.
10. Уморина Ж.Э. Бионическая архитектура как новое направление в архитектуре. Зеленая экономика – стратегическое направление устойчивого развития регионов: Материалы III Всерос. конгресса «Промышленная экология регионов» (3–4 апреля, 2018 г.) и международной дискуссионной площадки РосПромЭКо, 2018 г. / Ред.-сост.: Ю.В. Корнеева, Д.Н. Лыжин. Екатеринбург: УрГАХУ, 2018. С. 46-48.
11. Воличенко О.В. Концептуально-прототипное моделирование архитектурных объектов: учебно-методическое пособие. Бишкек: КРСУ, 2017. 142 с. ISBN 978-9967-19-516-]
12. Giamarelos S. Intersecting itineraries beyond the strada novissima: the converging authorship of critical regionalism // Architectural Histories. 2016. No. 4(1). 11 p. doi:http://doi.org/10.5334/ah.192
13. Chaubin Fr. Cosmic Communist Constructions Photographed. Taschen, 2017. 448 p. ISBN:9783836565059
14. Барчугова Е.В. Параметризм как направление современной проектной деятельности // АМІТ. 2013. № 4(25). 19 p. [marhi.ru]
15. Селиванова А.Н. Постконструктивизм. Власть и архитектура в 1930-е годы в СССР. Москва: БуксМАрт, 2020. 320 с. ISBN: 978-5-6040055-9-0
16. Челноков А.В., Корниенко Д.А., Методы формообразования в цифровой архитектуре // Вестник Приднестровской государственной академии строительства и архитектуры. 2013. № 6. С. 25–29.
17. Алборова Л.А. Минимальные поверхности в строительстве и архитектуре // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2021. № 1. С. 3-11. doi:10.21869/2311-1518-2021-33-1-3-11
18. Воличенко О.В. Концепции нелинейной архитектуры // Архитектон: известия вузов. 2013. № 44 (декабрь). С. 21-39. ISSN 1990-4196
19. Заславская А.Ю. Особенности формирования архитектурного объекта на основе фрактальных структур // Градостроительство и архитектура. 2011. Том. 1. № 2. С. 15-17. doi:10.17673/vestnik.2011.02.4
20. Лезина Е.П. Неофункционализм: зарождение и развитие. Интеллектуальный потенциал XXI века: ступени познания: сборник материалов XXIII Молодежной международной научно-практической конференции / Под общ. ред. С.С. Чернова. – Новосибирск: Издательство ЦРНС, 2014. С. 10-14. ISBN 978-5-00068-136-7
21. Sheldon Dennis Robert. Digital surface representation and the constructability of Gehry's architecture. Thesis (Ph.D.). Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Architecture, 2002. 340 p. http://hdl.handle.net/1721.1/16899
22. Waters J.K. Blobitecture: Waveform Architecture and Digital Design. Rockport Pub., 2003. 192 p. ISBN-10: 1592530001
23. Pakowska Marta. Parametric, generative, evolutionary, organic and bionic architecture – A new look at an old problem // Architecture et Artibus. 2014. No. 1. Pp. 42-45.
24. Волков А.М. Неоконструктивизм // Архитектурный альманах «Корпус». Вып. 2 (Электронный ресурс). https://cih.ru/k2/neocon2.html
25. Schumacher P. Parametricism – A New Global Style for Architecture and Urban Design // AD Architectural Design – Digital Cities. 2009. Vol. 79. No. 4. Pp. 14-23. doi:1002/AD.912

26. Кривошапко С.Н. Многогранники и квазимногогранники в архитектуре гражданских и промышленных сооружений // Строительство и реконструкция. 2020. № 4 (90). С. 48-64. doi:10.33979/2073-7416-2020-90-4-48-64
27. Кривошапко С.Н. Оболочки и стержневые структуры в форме аналитически задаваемых поверхностей в современной архитектуре // Строительство и реконструкция. 2020. № 3. С. 20-30. doi:10.33979/2073-7416-2020-89-3-20-30
28. Хан-Магомедов С.О. Архитектура советского авангарда. Книга 1. Проблемы формообразования. Мастера и течения. М.: Стройиздат, 1996. 710 с. ISBN 5-274-02045-3
29. Ермоленко Е.В. Формы и построения в архитектуре советского авангарда и их интерпретация в современной зарубежной практике // Academia. Архитектура и строительство. 2020. № 1. С. 39-48. doi:10.22337/2077-2020-1-39-48].
30. Bykov Olexsiy, Gubkina Ievgeniia. Soviet Modernism. Brutalism. Post-Modernism Buildings and Structures in Ukraine 1955–1991. DOM Publishers. July 1, 2019. 250 p. [ISBN 978-3-86922-706-1].
31. Локтев В.И. Необрутализм и теория метаболизма (Кендзо Танге). Архитектура Запада: Книга 1. Мастера и течения. Москва: Стройиздат, 1972. С. 85-102.
32. Малинина Т. Модернизм и «модернизмы»: о содержании понятия и расширении его границ к ХХI веку в архитектурной критике. Методологические заметки // Архитектура. Теория и практика. 2014. № 3-4. С. 106-125 [sias.ru]
33. William Zuk, Roger H. Clark. Kinetic Architecture. NY: Van Nostrand Reinhold, 1970. 163 p.
34. Azam Sadat Mozhdemani, Iran Reza Afhami. Using Ecotech architecture as an effective tool for sustainability in construction industry // Engineering, Technology & Applied Science Research. 2017.Vol. 7. No. 5. Pp. 1914-1917 [www.etasr.com]
35. Лыткин К.А. Элементы ноосферной архитектуры // Архитектура и строительство России. 2013. № 1. С. 30-39.
36. Мамиева И.А. Аналитические поверхности для параметрической архитектуры в современных зданиях и сооружениях // Academia. Архитектура и строительство. 2020. № 1. С. 150-165 <http://aac.raasn.ru/index.php/aac/article/view/201>
37. Федчун Дм. Генеративное проектирование в архитектуре и дизайне // 4 января 2017. Archiprofi (Электронный ресурс) https://archiprofi.ru/journal/detail/generativnoe-proektirovanie-v-arkhitekture-i-dizayne_b580045/
38. Волынский В.Э. Эволюция как стратегия проектирования и дизайна в нелинейной архитектуре // Жилищное строительство. 2011. № 10. С. 1-6.
39. Конишева О.П. Анализ особенностей параметрической архитектуры // Молодой ученый. 2023. № 1 (448). С. 17-21. <https://moluch.ru/archive/448/98604/> (дата обращения: 28.07.2023).
40. Алборова Л.А., Мамиева И.А. Криволинейные формы в архитектуре зданий и сооружений в начале ХХI-го века // Строительство и реконструкция. 2023. № 5 (109). С. 76-86. doi:10.33979/2073-7416-2023-109-5-76-86
41. Krivoshapko S.N. Shell structures and shells at the beginning of the 21st century // Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings. 2021. No. 17(6). Pp. 553-561. doi:10.22363/1815-5235-2021-17-6-553-561

REFERENCES

1. Pechonkin I., Davydov V. List of architectural styles. 2017. [arzamas.academy/mag/446-arch]
2. Krivoshapko S.N., Alborova L.A., Mamieva I.A. Shell structures: genesis, materials, and subtypes. Part 1. Subtypes and directions. *Academia. Architecture and Construction*. 2021. No. 3. Pp. 125-134. doi:10.22337/2077-9038-2021-3-125-134 (rus)
3. Krivoshapko S.N., Christian A. Bock Hyeng, Gil-oulbe Mathieu. Stages and architectural styles in design and building of shells and shell structures. *Building and Reconstruction*. 2022. No. 4 (102). Pp. 112-131 doi:10.33979/2073-7416-2022-102-4-112-131
4. Krivoshapko S.N. On the basic architectural styles, directions, and style flows for shells and shell structures. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2022. No. 18(3). Pp. 255–268. (rus) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-3-255-268>
5. Atkina L.I., Zhukova M.V., Morozov A.M. The Basic Architectural Styles. The Characteristic Features. Ekaterinburg: UGLTU, 2015. 37 p.
6. Andreeva O.A. Architectural Monument: Object of Modern Era. Ulyanovsk: UIGTU, 2012. 117 p. ISBN 978-5-9795-0943-3
7. Krivoshapko S.N., Christian A. Bock Hyeng, Mamieva I.A. Chronology of erection of the earliest reinforced concrete shells. *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences* (ISSN: 2076-734X, EISSN: 2076-7366). 2014. Vol. 18. Iss. 2 Pp. 95-108.

8. Krivoshapko S.N. Metal ribbed-and-circular and lattice shells from the 19th until the first half of the 20th centuries. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2014. No. 6. Pp. 4-15.
9. Kurbatov Yu.I. Architecture in context of environment. *Stroitelstvo i Arhitektura Leningrada*. 1977. No. 4. Pp. 28-32. (rus).
10. Umorina Zh.E. Bionic architecture as a new direction in architecture. *Zelyonaya Ekonomika – Strategicheskoe Napravlenie Ustoicheskogo Razvitiya Regionov* [Green Economy: Strategic Direction of Stable Development of Regions]: Proc. of the III Congress “Industrial Ecology of Regions” (April 3–4, 2018.) RosPromEko. 2018. Ekaterinburg: UrGAHU, 2018. Pp. 46-48.
11. Volichenko O.V. Konseptualno-prototipnoe modelirovanie architecturnich obiectov [Concept-and-Prototype Modelling of Architectural Objects]. Bishkek: KRSU, 2017. 142 p. ISBN 978-9967-19-516-5
12. Giamarelos S. Intersecting itineraries beyond the strada novissima: the converging authorship of critical regionalism. *Architectural Histories*. 2016. No. 4(1). 11 p. doi:<http://doi.org/10.5334/ah.192>
13. Chaubin Fr. Cosmic Communist Constructions Photographed. Taschen, 2017. 448 p. ISBN: 9783836565059
14. Barchugova E.V. Parametrisism as a direction of the modern project activities. AMIT. 2013. No. 4(25). 19 p. [marhi.ru]
15. Selivanova A.N. Post-constructivism. Power and Architecture at 1930-s in USSR. Moscow; BuksMArt, 2020. 320 p. ISBN: 978-5-6040055-9-0
16. Chelnokov A.V., Kornienko D.A. Methods of forming in digital architecture. *Vestnik Pridneprovskoy Gosudarstvennoy Akademii Stroitelstva i Arhitekturi*. 2013. No. 6. Pp. 25–29.
17. Alborova L.A. Minimal surfaces in building and architecture. *Biosfernaya sovmestimost': chelovek, region, tekhnologii* [Biosphere compatibility: human, region, technologies]. 2021. No.1. Pp. 3-11. (rus). doi:10.21869/2311-1518-2021-33-1-3-11
18. Volichenko O.V. Conceptions of nob-linear architecture. *Architecton: Izvestiya vuzov*. 2013. No. 44 (December). Pp. 21-39. ISSN 1990-4196
19. Zaslavskaya A.Y. Features, forming an architectural object, basing on fractal structures. *Urban Construction and Architecture*. 2011. Vol. 1. No. 2. Pp. 15-17. doi:10.17673/vestnik.2011.02.4
20. Lezina E.P. Neo-functionalism: origin and development. *Intelktualniy Potenzial 21^{ogo} veka: Stupeni Poznaniya: Sb. Mat. XXIII Mologezhnoy Nauchno-Prakticheskoy Konferentsii / Ed. by S.S. Chernova*. Novosibirsk: Izd-vo TzRNS, 2014. Pp. 10-14. ISBN 978-5-00068-136-7
21. Sheldon Dennis Robert. Digital surface representation and the constructability of Gehry’s architecture. Thesis (Ph.D.). Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Architecture, 2002. 340 p. <http://hdl.handle.net/1721.1/16899>
22. Waters J.K. Blobitecture: Waveform Architecture and Digital Design. Rockport Pub., 2003. 192 p. ISBN-10: 1592530001
23. Pakowska Marta. Parametric, generative, evolutionary, organic and bionic architecture – A new look at an old problem. *Architecture et Artibus*. 2014. No. 1. Pp. 42-45.
24. Volkov A.M. Neo-constructivism. *Architekturniy Almanach “Korpus”*. No. 2. <https://cih.ru/k2/neocon2.html>
25. Schumacher P. Parametricism – A New Global Style for Architecture and Urban Design. *AD Architectural Design – Digital Cities*. 2009. Vol. 79. No. 4. Pp. 14-23. doi:1002/AD.912
26. Krivoshapko S.N. Polyhedra and quasi- polyhedra in architecture of civil and industrial erection. *Building and Reconstruction*. 2020. No. 4 (90). Pp. 48-64. doi:10.33979/2073-7416-2020-90-4-48-64 (rus).
27. Krivoshapko S.N. Shells and rod structures in the form of analytically non-given surfaces in modern architecture. *Building and Reconstruction*. 2020. No. 3. Pp. 20-30. doi:10.33979/2073-7416-2020-89-3-20-30
28. Khan-Magomedov S.O. Architecture of Soviet Vanguard. Book 1. Problems of Forming. Masters and Flows. Moscow: Stroyizdat, 1996. 710 p. ISBN 5-274-02045-3. (rus)
29. Ermolenko E.V. Forms and constructions on the architecture of the soviet avant-garde and their interpretation in modern foreign practice. *Academia. Architecture and Construction*. 2020. No. 1. Pp. 39-48. doi:10.22337/2077-2020-1-39-48
30. Bykov Oleksiy, Gubkina Ievgeniia. Soviet Modernism. Brutalism. Post-Modernism Buildings and Structures in Ukraine 1955–1991. DOM Publishers. July 1, 2019. 250 p. ISBN 978-3-86922-706-1
31. Loktev V.I. Neo-brutalism and theory of metabolism (Kenzo Tange). Architecture of the West. The Book 1. Masters and Directions. Moscow: Stroyizdat, 1972. Pp. 85-102.
32. Malinina T. Modernism and “modernisms”: on contents of an idea and expansion of its border to 21st century in architectural criticism. Methodological notes. *Architecture. Theory and Practice*. 2014. No. 3-4. Pp. 106-125. [sias.ru]
33. William Zuk, Roger H. Clark. Kinetic Architecture. NY: Van Nostrand Reinhold, 1970. 163 p.
34. Azam Sadat Mozhdemani, Iran Reza Afhami. Using Ecotech architecture as an effective tool for sustainability in construction industry. *Engineering, Technology & Applied Science Research*. 2017. Vol. 7. No. 5. Pp. 1914-1917. [www.etasr.com]

35. Lytkin K.A. Architectural elements noospheric. *Architektura i Stroitelstvo Rossii*. 2013. No. 1. Pp. 30-39 (rus).
36. Mamieva I.A. Analytical surfaces for parametrical architecture in contemporary buildings and structures. *Academia. Architecture and Construction*. 2020. No. 1. Pp. 150-165. (rus)
37. Fedchun Dm. Generative designing in architecture and design // January 4, 2017. Archiprofi https://archiprofi.ru/journal/detail/generativnoe-proektirovanie-v-arkhitekture-i-dizayne_b580045/
38. Volynskov V.E. Evolution as a strategy of projecting and designing in non-linear architecture. *Housing Construction*. 2011. No. 10. Pp. 1-6.
39. Konysheva O.P. Analysis of features of parametrical architecture. *Molodoy Uchoniye* [Young Scientist]. 2023. No. 1 (448). Pp. 17-21. <https://moluch.ru/archive/448/98604/>
40. Alborova L.A., Mamieva I.A. Curvilinear forms in architecture of buildings and erections. *Building and Reconstruction*. 2023. No. 5 (109). Pp. 76-86. doi:10.33979/2073-7416-2023-109-5-76-86
41. Krivoshapko S.N. Shell structures and shells at the beginning of the 21st century. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2021. No. 17(6). Pp. 553-561. doi:10.22363/1815-5235-2021-17-6-553-561

Информация об авторе:

Кривошاپко Сергей Николаевич

Инженерная академия ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов», г. Москва, Россия,
доктор технических наук, профессор, профессор-консультант департамента строительства ИА РУДН.
E-mail: sn.krivoshapko@mail.ru

Information about author:

Krivoshapko Sergey N.

Engineering Academy of the Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia,
DSc, professor, professor-tutor at the Civil Engineering Department of the EA of the RUDN University.
E-mail: sn.krivoshapko@mail.ru

А.Д. АЛТЫНБЕКОВА¹, Р.Е. ЛУКПАНОВ¹, Д.С. ДЮСЕМБИНОВ¹, Д.В. ЦЫГУЛЕВ¹,
С.Б. ЕНКЕБАЕВ¹, Н.К. ЕРЖАНОВА¹

¹НАО «Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева», г. Астана, Казахстан

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОЙ ДОБАВКИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА БУРОНАБИВНЫХ СВАЙ

Аннотация. В статье представлены результаты влияния добавки на водонепроницаемость, морозостойкость и удобоукладываемость, которые являются одними из основных показателей физико-механических свойств бетона. В данной работе авторы использовали разработанную комплексную добавку, включающую щелочь (каустическая сода NaOH), послеспиртовую барду (отход спиртового производства) и ускоритель твердения (гипс) в разных процентных соотношениях. Показано, что применение комплексной добавки в состав бетона значительно повышает водонепроницаемость и морозостойкость по сравнению с контрольными образцами (Тип I). Исследовано влияние комплексной добавки на удобоукладываемость бетонной смеси. Установлено, что комплексная добавка позволяет получать высокоподвижные бетонные смеси и снижает их водоотделение, обеспечивая высокую сохранность бетонных смесей. Водонепроницаемость бетона также существенно улучшается – марка по водонепроницаемости повышается на 4 марки в сравнении с бетоном без добавки (Тип I). Предложенный метод ускоряет процесс определения марки бетона по водонепроницаемости, позволяет на основе полученных зависимостей определять марку и степень проницаемости бетона. При введении комплексной добавки в количестве до 7 % от массы цемента возрастает марка по морозостойкости. Доказано, что бетон с исследуемой комплексной добавкой обладает высокими физико-механическими показателями. Найдены оптимальные дозировки рассматриваемой добавки, которые использовались в настоящей работе.

Ключевые слова: бетон, комплексная добавка, послеспиртовая барда, буронабивная свая, удобоукладываемость, водонепроницаемость, морозостойкость.

A.D. ALTYNBEKOVA¹, R.E. LUKPANOV¹, D.S. DYUSSEMBINOV¹, D.V. TSYGULYOV¹,
S.B. YENKEBAEV¹, N.K. YERZHANOVA¹

¹L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

DEVELOPMENT OF A COMPLEX ADDITIVE FOR BORED PILE PRODUCTION

Abstract. The article presents the results of the effect of the additive on water resistance, frost resistance and workability, which are one of the main indicators of the physical and mechanical properties of concrete. In the presented work the authors used a complex additive containing alkali (caustic soda), post-alcohol bard and hardening regulator (gypsum) in different % ratios. It is shown that the use of a complex additive in the composition of concrete significantly increases the water resistance and frost resistance compared with the control samples. The influence of the complex additive on the workability of concrete mixture has been studied. It has been established that the complex additive allows obtaining highly workable concrete mixtures and reducing their water separation, providing high preservation of concrete mixtures. The water impermeability of concrete is also significantly improved - the water impermeability grade increases by 4 steps in comparison with the concrete without additive. The proposed method speeds up the process of determining the concrete water impermeability grade and allows you to determine the water resistance grade and the degree of permeability of concrete on the basis of the obtained dependencies. When adding a complex additive in an amount of up to 7 % of the weight of cement increases the brand on frost resistance. It is found that

© Алтынбекова А.Д., Лукпанов Р.Е., Дюсембинов Д.С., Цыгулев Д.В., Енкебаев С.Б., Ержанова Н.К., 2023

the concrete with the studied complex additive has high physical and mechanical properties. The optimum dosages of the considered additive were found and used in the present work.

Keywords: concrete, complex additive, post-alcohol bard, bored pile, workability, water resistance, frost resistance.

Введение

В настоящее время в сложных инженерно-геологических условиях на территории Казахстана все большее применение находят свайные фундаменты в самых разнообразных областях строительства [1]. Одним из наиболее эффективных технологий возведения свайных фундаментов на практике строительного производства при возведении высотных, большепролетных и уникальных зданий, сооружений является устройство буронабивных свайных фундаментов, применение которых насчитывает уже 120-летнюю историю [2]. Эффективность свайного фундамента достигается за счет высокой эксплуатационной надежности, жесткости, относительно низкой материалоемкости, высокой индустриальности производства, возможности круглогодичного ведения работ [3]. Данная технология может использоваться в любых климатических условиях для создания фундаментов зданий и сооружений любого назначения без ущерба возведения качественного строения [4].

Актуальным вопросом в строительной индустрии, а также в науке строительных материалов является совершенствование изготовления железобетонных изделий с целью повышения их долговечности и будущем применении в производстве. Поскольку бетон применяется в многочисленных строительных зданиях сооружений как гражданских, так и особо сложных технических сооружений, которые имеют стратегическое значение для страны. В настоящее время, несмотря на многообразие и огромный выбор строительных материалов, бетон остается до сих пор одним из ведущих материалов. Будь это либо монолитные конструкции, или же сборные, потому что бетону можно предать различные геометрические формы конструкции, а также он может проявлять различные свойства. Одними из наиболее важных и основных эксплуатационных характеристик бетона является его механическая прочность, водонепроницаемость и морозостойкость [5].

Современное производство бетона и железобетона тесно связано с широким применением различных химических добавок [6-8], которые в малых дозировках позволяют регулировать технологический процесс и получать бетон и железобетон с требуемыми физико-техническими свойствами [9]. Большинство исследований отмечено [10-12], положительное влияние химических добавок на физико-механические свойства бетона, в частности прочности [13-15].

Буронабивные сваи изготавливаются из бетона с применением пластифицирующих и противоморозных добавок, обеспечивающих твердение бетона при температурах ниже +5 °С. Состав бетона устанавливается технологическим регламентом в зависимости от периода производства свайных работ [16]. Известно, что основное назначение пластифицирующих добавок – увеличение удобоукладываемости, что обеспечивает уменьшение энерго- и трудозатрат при укладке. С другой стороны, применение таких добавок позволяет, за счет снижения водоцементного отношения, при сохранении заданной подвижности смеси, повышать в значительной степени прочность и долговечность изделий. Кроме этого, введение пластификаторов позволяет влиять на сроки схватывания и кинетику твердения цемента, повышать прочность, морозостойкость и водонепроницаемость бетона за счет водоредуцирования, а также снижать расход цемента и энергозатраты на производство бетонов, растворов, и т.д. [17-30]. Поэтому разработка составов модифицированных тяжелых бетонов для общестроительного назначения с улучшенными технологическими параметрами путем использования эффективных модифицирующих добавок являются актуальным [31].

Для повышения эффективности использования свайных фундаментов нами предложено использовать комплексную добавку из преимущественно местных сырьевых материалов для производства буронабивных свай. В целях улучшения технологических

свойств, в растворные смеси вводят специальные добавки, поверхностно-активные вещества, оказывающие пластифицирующий (послеспиртовая барда) эффект. Применение пластифицирующих добавок позволяет получать удобоукладываемые растворы значительно в меньшем количестве воды (водовяжущем отношении – В/В) [32]. В состав комплексной добавки входят отход производства этилового спирта (послеспиртовая барда) и щелочь (каустическая сода, NaOH) для нейтрализации кислотности послеспиртовой барды, это связано с тем, что очистка проводится некачественно и послеспиртовая барда сохраняет кислотность. Таким образом, комплексное применение щелочи (каустическая сода, NaOH), пластифицирующей добавки (послеспиртовая барда) и гипса способствует улучшению физико-механических характеристик бетона. Послеспиртовая барда является ценным продуктом, которую можно использовать при решении проблем экологического загрязнения и получение дешевого сырья.

Цель исследования: разработать технологический состав бетона для улучшения физико-механических свойств.

Для достижения поставленной цели, были решены следующие задачи:

1. Подбор оптимального состава при разном %-ном соотношении
2. Приготовление образцов в лабораторных условиях
3. Лабораторные исследования разработанного бетона

Сравнения результатов лабораторных исследований проведены для четырех типов бетона:

Тип 1: контрольный состав бетона без добавок;

Тип 2: состав бетона с комплексной добавкой (послеспиртовая Барда – 3,0%, гипс – 1,0% и NaOH – 5,0%);

Тип 3: состав бетона с комплексной добавкой (послеспиртовая Барда – 5,0%, гипс – 1,5% и NaOH – 5,0%);

Тип 4: состав бетона с комплексной добавкой (послеспиртовая Барда – 7,0%, гипс – 2,0% и NaOH – 5,0%).

Методика экспериментальных исследований

В данной работе при проведении лабораторных исследований преимущественно были использованы сырьевые материалы, производимые в промышленных масштабах. Ниже приведены их основные характеристики, определенные по действующим стандартам.

Для проведения экспериментальных работ в качестве вяжущего использовался портландцемент марки ЦЕМ 42,5 I Н (бездобавочный), нормального твердения. Истинная плотность – 3100 кг/м³. Плотность насыпная – 1100-1600 кг/м³.

В качестве мелкого заполнителя использовался кварцевый песок с модулем крупности 2,23, удовлетворяющий требованиям ГОСТ 8736-2014 «Песок для строительных работ».

В качестве крупного заполнителя применялся гранитный щебень с размером фракций 5-20 мм, удовлетворяющий требованиям ГОСТ 8267-93 «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ».

В качестве модифицирующей добавки применялась послеспиртовая Барда, производимый по ТУ 5870-002-14153664-04, в количестве 3%; 5%; и 7% от массы цемента и регулятор твердения – гипс, который позволит ускорить процесс твердения, в количестве 1%; 1,5% и 2% от массы цемента и щелочь (каустическая сода NaOH) в количестве 5%.

Водопродонная вода в качестве воды затворения для получения бетонной смеси, соответствующая требованиям ГОСТ 23732-2011 «Вода для бетонов и строительных растворов».

При подборе состава учитывались качественные показатели сырьевых материалов, включая способы совмещения компонентов. При расчете расходов материалов были приняты три основных состава и один контрольный состав без добавок.

Расход сырьевых материалов образцов бетона (необходимых для измерения) произведен из расчета на 1 м³ бетонной смеси, представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Состав сравниваемых бетонных образцов

Бетон- ная смесь	Послеспир- товая барда %	Гипс, %	NaOH, %	Составы бетонных смесей, кг						
				Цемент	Гипс	Песок	Щебень	Вода	Послеспир- товая барда	NaOH
Тип 1	0	0	0	350	0	840	1200	105	0	0
Тип 2	3	1	5,0	346,5	3,5	840	1200	93,9	10,5	0,5
Тип 3	5	1,5	5,0	344,75	5,25	840	1200	86,6	17,5	0,8
Тип 4	7	2	5,0	343	7,0	840	1200	79,2	24,5	1,2

Лабораторные испытания включают в себя, фото 1:

- 1) Определение удобоукладываемости бетонной смеси.
- 2) Оценка морозостойкости бетона.
- 3) Оценка водонепроницаемости бетона.



Фото 1 –Проведение лабораторных испытаний

С целью улучшения параметров удобоукладываемости и сохраняемости бетонных смесей были проведены исследования типов 1, 2, 3 и 4, оценивается по диаметру его расплыва в миллиметрах с помощью конуса или конусной формы. Растекаемость смесей определена по диаметру расплыва конуса бетонной смеси по методике EN 12350.5-2000 «Методы испытания бетонной смеси». Расплыв конуса бетонной смеси определяется измерением диаметра расплывшейся лепешки в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Испытание водонепроницаемости бетона определяли на образцах-цилиндрах размером 150х150х150 мм осуществлено по EN 12390-8 «Глубина проникновения воды под давлением» и ГОСТ 12730.5 «Бетоны. Методы определения водонепроницаемости». Оценка глубины проникновения воды после 72±2-часового приложения давления в 0,5 МПа.

Исследования морозостойкости бетона проводились согласно ГОСТ 10060-2012 «Бетоны. Методы определения морозостойкости». Морозостойкость определяли на образцах 100х100х100 мм, возраст 28 суток.

Результаты и их анализ

В рамках исследования были определены наиболее важные физико-механические характеристики бетона с применением комплексной добавки и без нее.

Подсчет расхода сырьевых материалов на 1 м³ бетонной смеси с помощью методики, описанной в руководстве по подбору состава тяжелого бетона (таблица 1). При подборе состава учитывались качественные показатели сырьевых материалов, включая особенности способы совмещения компонентов. При расчете расходов материалов были приняты три основных состава и один контрольный состав без добавок.

Применение добавок позволяет получать качественные бетонные смеси, приготовление которых должно производиться в смесителях принудительного действия при фиксированной продолжительности перемешивания, так как это влияет на реологические свойства смеси.

Удобоукладываемость бетонной смеси. Главным показателем эффективности действия комплексной добавки на бетонную смесь представляет собой степень разжижающей способности. В данной работе, за эталон сравнения приняли смесь (Тип 1) без добавки. Комплексная добавка вводилась вместе с водой затворения в бетонную смесь в дозировках от 0 до 7% от массы цемента. Введение комплексной добавки в количестве, превышающем 7%, не увеличивало подвижности бетонной смеси, что подтверждает результаты опытов.

По результатам испытаний видно, что при добавлении добавок от массы цемента в водно-цементный раствор при постоянном В/Ц=0,56 соотношении, увеличивается растекаемость бетонной смеси и прочность цементного камня. При определении оптимальной дозировки для изготовления бетонной смеси требуемой подвижности расходы добавок были соответственно, (3%, 5%, 7%) от массы цемента. Для оценки реологической активности и влияния модификатора на растекаемость были приготовлены цементные композиции с дозировкой модификатора (3%, 5%, 7%) от массы цемента. Графическая зависимость растекаемости цементных композиций от расхода модификатора представлена на рисунке 1.

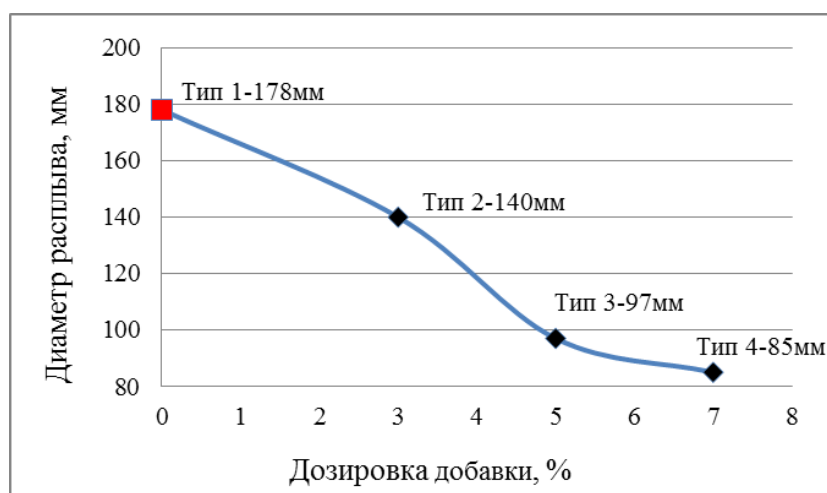


Рисунок 1 - Изменение растекаемости композиций в зависимости от расхода добавки

Анализ данных показывает, что в Типах 2-4, диаметр расплыва находится в пределах 85-140 мм, а для контрольного Типа 1-178 мм.

Растекаемость композиции типа 1 показал наибольшее значение, которое составляет 178 мм, в процентном соотношении больше на 27,14% по сравнению с Типом 2.

Растекаемость композиции Типа 2 составляет 140 мм, при введении в цементное тесто 3% комплексной добавки (по отношению к массе цемента).

Растекаемость композиции Типа 3 составляет 97 мм, при добавке к цементному тесту комплексной добавки в количестве 5%.

Растекаемость композиции Типа 4 наименьшее значение, которое составляет 85 мм, при добавке к цементному тесту комплексной добавки в количестве 7%. Из рисунка 6 видно, что с повышением дозировки добавок рост подвижности замедляется, т.е. выполняется своеобразное насыщение смеси. Увеличение дозировки выше предельного значения не следует к значительному росту подвижности, и, чаще всего, возникает водоотделение.

На основе полученных экспериментальных результатов следует вывод, что оптимальная дозировка для получения бетонной смеси с наибольшей подвижностью находится в пределах (5 и 7%) от массы цемента. Если расход превышает этот предел, то это в конечном итоге приводит к водоотделению и расслоению бетонной смеси. Добавление добавки более (7%) чаще всего приводит к уменьшению прочности цементного камня и считается нерентабельным.

Подвижность исследуемых составов находилась в пределах от 9-19 см. Расслаиваемость бетонной смеси находилась в пределах от 3,2% (Тип 1) до 7,1% (Тип 2). Прочность на сжатие в возрасте 28 суток составила от 36,8 Мпа (Тип 1) до 54,1 Мпа (Тип 3). Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что применение добавок приводит к увеличению прочности бетона и снижению расслаиваемости бетонной смеси.

Водонепроницаемость. Для исследования использовались добавки, техническая информация о которых приведена в таблице 1. Исследования выполнялись на портландцементе марки ЦЕМ 42,5 I Н (бездобавочный). Влияние комплексной добавки на водонепроницаемость бетона было изучено для варианта пластификации бетонной смеси при разных дозировках добавок ($B/C=const$).

Результаты испытаний представлены на рисунке 2. Из данных видно, что с увеличением дозировки комплексной добавки наблюдается уменьшение глубины проникновения воды.

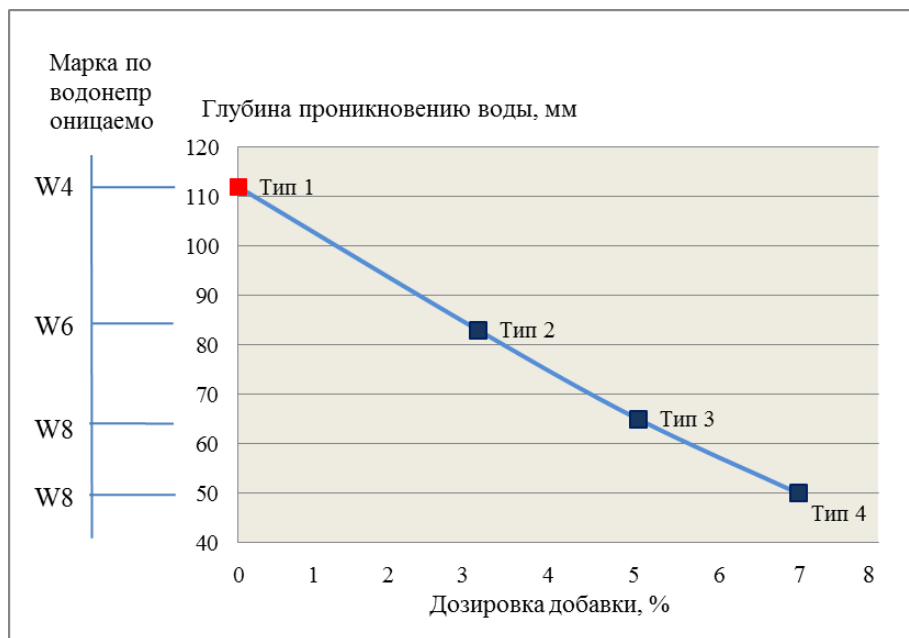


Рисунок 2 - Водонепроницаемость бетона в зависимости от вида и дозировки добавок:
 тип 1 - контрольная; тип 2 – с комплексной добавкой соответственно 1+3% от массы цемента;
 тип 3 – с комплексной добавкой соответственно 1,5+5% от массы цемента;
 тип 4 – с комплексной добавкой соответственно 2+7% от массы цемента

Тип 1. Анализ данных показали, что наименьшей водонепроницаемостью обладает бездобавочный состав бетона по сравнению с остальными типами. Это объясняется наличием в композите капиллярной пористости, которая ускоряет перенос воды вглубь бетона и увеличивает степень его пропитки. Насыщение материала влагой ведет к ускорению процессов коррозии и последующему разрушению материала. Дозировка комплексной добавки 0%. Глубина проникновения воды – 112 мм. Соответствующая марка по водонепроницаемости – W4. Степень проницаемости бетона - нормальная. Введение в состав бетона для типов 2, 3 и 4 комплексной добавки повышает водонепроницаемость на две-три марки.

Тип 2. Использование комплексной добавки в количестве 1+3% значительно повышает марку бетона по водонепроницаемости (W6) при сравнении с бездобавочным составом (W 4). Это объясняется тем, что комплексная добавка, равномерно распределяет по объему и наполняет межзерновое пространство, таким образом, создавая более плотную структуру. Глубина проникновения воды – 83 мм. Соответствующая марка по водонепроницаемости – W6. Степень проницаемости бетона - пониженная.

Тип 3. Введение в состав комплексной добавки в количестве 1,5+5% позволяет повысить водонепроницаемость композита (до W 8) по сравнению с бездобавочным бетоном на 60 %. Глубина проникновения воды – 63 мм. Соответствующая марка по водонепроницаемости – W8. Степень проницаемости бетона - низкая.

Тип 4. Самое высокое значение марка по водонепроницаемости-W8, получена при соотношении значений компонентов комплексной добавки 2+7% от массы цемента. Глубина проникновения воды – 50 мм. Соответствующая марка по водонепроницаемости – W8. Степень проницаемости бетона - низкая.

Проницаемость воды с комплексными добавками уменьшается с 112 мм для контрольного состава до 83-50 мм для пластифицированных составов. При исследовании водонепроницаемости с данными добавками при дозировках 3% - для типа 2, 5% - для типа 3 и 7% - для Типа 4 наблюдается уменьшение проницаемости бетона до 83-50 мм. Для Типов 2, 3 и 4 с комплексной добавкой с увеличением его дозировки до 1% наблюдается уменьшение проницаемости до 50 мм. Такое явление, возможно, объясняется эффектом самоуплотнения и перекрытием канальной пористости. Дальнейшее увеличение дозировки может привести к уменьшению проницаемости. Сравнивая показатели Типа 3 и 4 с комплексной добавкой, расхождение между глубиной проникновения воды является незначительным – 63 и 50 мм соответственно. Структура бетона Типов 2, 3 и 4 с комплексной добавкой более плотной, за счет чего она лучше сопротивляется воздействию воды по сравнению с бездобавочным составом.

Обобщая результаты влияния комплексных добавок на водонепроницаемость бетона, надо отметить их положительное воздействие во всех случаях. Применение комплексных добавок изменяет характер пористости цементного камня, уменьшая количество замкнутых пор по сравнению с бездобавочным составом. Ввод в бетонную смесь комплексных добавок при низких В/Ц отношениях позволяет надежно достигать высоких значений водонепроницаемости. Таким образом, использование комплексной добавки для уплотнения капиллярно-пористой структуры бетона позволяет повысить физико-механические характеристики, тем самым увеличив его сопротивляемость проникновению влаги. Использование комплексной добавки позволяет повысить водостойкость бетона, тем самым увеличив его плотность и сопротивляемость проникновению влаги. Сравнивая Типы 2, 3 и 4 с комплексной добавкой в количестве до 10 % с остальным, исследуемым в работе, стоит отметить, что данные типы обладают наилучшими показателями водонепроницаемости (до W 8).

Морозостойкость. Значения характеристик, полученные до замораживания, соответствуют нулю циклов и относятся к контрольным образцам, а все остальные значения, полученные после различного числа циклов, относятся к основным образцам (рисунок 3). Все испытанные на морозостойкость образцы бетона формовали из смеси с одинаковым значением В/Ц = 0,56.

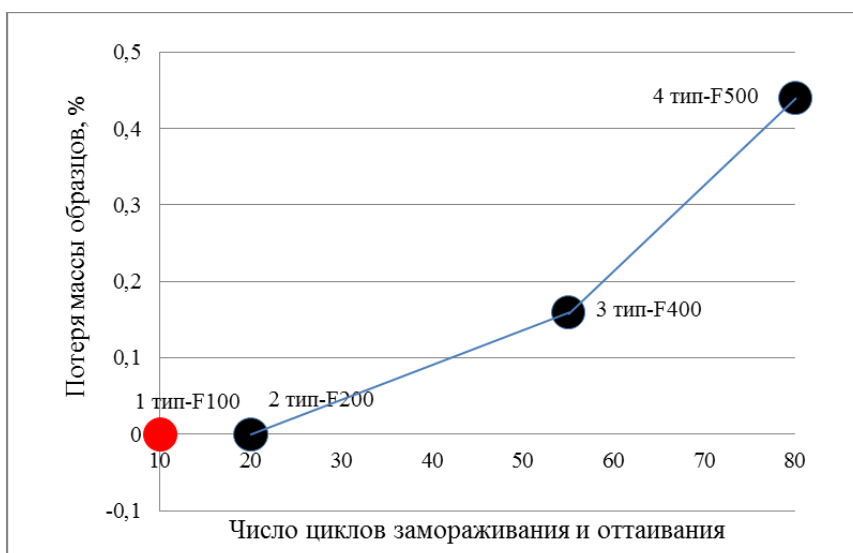


Рисунок 3 - Результаты испытания бетона на морозостойкость.

Определение морозостойкости привело к следующим результатам:

Тип 1. Наименьшие значения морозостойкости показали образцы бетона без добавок – F 100, которые были изготовлены с повышенным расходом цемента и воды, без изменения В/Ц в целях обеспечения равноподвижности бетонной смеси.

Тип 2. Увеличение количества комплексной добавки в количестве 3% при постоянном значении начального В/Ц значительно изменяет морозостойкость бетона до F 200. До 20 циклов включительно бетон практически не теряет массу.

Тип 3. Введение комплексной добавки в количестве 5%, регулирующий характер структуры бетона, в наибольшей мере способствует повышению морозостойкости бетона до F 400. Следовательно, добавка является эффективным способом повышения морозостойкости бетона при постоянном В/Ц. Испытание бетона до 55 циклов выявило, что результаты удовлетворяют критерию морозостойкости. Снижение массы достигло лишь 0,16 %, а шелушения поверхности образцов не отмечено.

Тип 4. Введение комплексной добавки в количестве 7% обеспечила высокую морозостойкость бетона до F 500. Значение потерь массы образцов до 80 циклов не превысило 0,44 %, однако наблюдалось существенное шелушение поверхности образцов, что вызвало необходимость завершить испытание.

Таким образом, по результатам испытания морозостойкости бетона можно сделать заключение, что наиболее стойкая структура цементного камня формируется в присутствии комплексных добавок. Введение комплексной добавки в составы бетона удастся значительно повысить морозостойкость, причем количество добавки (до 7%) практически не оказывает отрицательного влияния на показатель. Наоборот, с увеличением комплексной добавки до 7% наблюдается постепенное повышение морозостойкости бетона. Таким образом, проведенные исследования подтвердили возможность получения бетона высокой морозостойкости. По классификации ГОСТ 25192-2012 полученные типы бетона можно отнести к: Тип 1 – бетон средней морозостойкости; Тип 2 – бетон средней морозостойкости; Тип 3 – бетон высокой морозостойкости и Тип 4 – бетон высокой морозостойкости.

Выводы

На основании проведенных экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы для:

Типа 1. Растекаемость композиции показал наибольшее значение, которое составляет 178 мм, по сравнению с остальными типами. Образцы показали наименьшую прочность по сравнению с типами 2, 3 и 4, однако водопоглощение имеет наибольшее значение. Марка по

водонепроницаемости – W4. Степень проницаемости бетона - нормальная. Марка по морозостойкости F100, потеря массы – 0%;

Типа 2. При введении в цементное тесто 3% комплексной добавки (по отношению к массе цемента) растекаемость композиции составляет 140 мм. Марка по водонепроницаемости – W6. Степень проницаемости бетона - пониженная. Марка по морозостойкости F200, потеря массы – 0%;

Типа 3. Растекаемость композиции составляет 97 мм, при добавке к цементному тесту комплексной добавки в количестве 5%. Марка по водонепроницаемости – W8. Степень проницаемости бетона - низкая. Марка по морозостойкости F400, потеря массы – 0,16%;

Типа 4. Растекаемость композиции имеет наименьшее значение, которое составляет 85 мм, при добавке к цементному тесту комплексной добавки в количестве 7%. Марка по водонепроницаемости – W8. Степень проницаемости бетона - низкая. Марка по морозостойкости F500, потеря массы – 0,44%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдрахманова К.А., Байджанов Д.О. Высокопрочный бетон модифицированный с различными добавками // Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации. Пенза, 2019. С. 102-104.
2. Фёдоров В.С., Купчикова Н.В. Технологии устройства концевых уширений набивных и готовых свай и их влияние на формообразование конструкций фундамента // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2019. № 1 (27). С. 40-56.
3. Купчикова Н.В., Максимов А.О., Зинченко Д.В. Эволюция технологии устройства буронабивных свайных фундаментов с уширениями // Инновационное развитие регионов: потенциал науки и современного образования. Астрахань, 2018. С. 113-121.
4. Пономарев А.Б., Соловьев А.В., Богомоллова О.А. К вопросу определения расчетной нагрузки на сваю // Актуальные проблемы геотехники. 2014. С. 159–165.
5. Осипов А.А., Гертнер А.В., Чулкова И.Л. Влияние добавки «Реламикс» на свойства тяжелого бетона // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации. 2021. С. 671-675.
6. Тринкер Б.Д. и др. Эффективность применения комплексных добавок ПАВ и электролитов // Бетон и железобетон. 2007. № 10. С. 12–13.
7. Петрова Т.М., Смирнова О.М. Современные модифицирующие добавки для производства сборного бетона и железобетона // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2010. № 4. С. 203-212.
8. Боцман Л.Н., Строкова В.В., Ищенко А.В., Боцман А.Н. Модифицирование бетона за счет введения различных видов добавок // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 6. С. 90-94.
9. Кушбакова Б.Б., Ботиров И.Ш., Мухамедбаев А.А. Влияние химической добавки на прочность бетона // Scientific progress. 2021. № 1 (6). С. 302-304.
10. Бахташ К.Н., Абдрахманов У.К. Исследование возможности повышения качества бетона введением модифицирующих добавок // Молодой ученый. 2020. № 22. С. 91-94.
11. Зоткин А.Г. Бетоны с эффективными добавками. Москва. 2014. Учебное пособие. 160 с.
12. Руководство по применению химических добавок к бетону. М., Стройиздат, 1975, 66 с.
13. Анисимов С.Н., Кононова О.В., Минаков Ю.А., Лешканов А.Ю., Смирнов А.О. Исследование прочности тяжелого бетона с пластифицирующими и минеральными добавками // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2 (часть 1).
14. Jeyanth A., Kosalram R., Rajkiran R.C. Influence of chemical admixtures on the strength properties of concrete // Conference: SET conference, VIT university. 2013.
15. Дружинкин С.В., Немыкина Д.А., Краснова Е.А. Влияние суперпластифицирующих добавок на прочность бетона // Инженерный Вестник Дона. 2018. № 2. С. 212.
16. Ефимов В.М., Рожин И.И., Попенко Ф.Е., Степанов А.В., Степанов А.А., Васильчук Ю.К. Устройство буронабивных свай в условиях криолитозоны центральной Якутии // Арктика и антарктика. Москва, 2018. С. 133-141.
17. Калашников В.И. Через рациональную реологию – в будущее бетонов. Ч. 2. Тонкодисперсные реологические матрицы и порошковые бетоны нового поколения // Технологии бетонов. 2007. № 6. С. 8-11.

18. Базаров Б.Г., Норжинбадам С., Санжаасурен Р., Доржиева С.Г., Урханова Л.А. Пластифицирующие добавки в бетон на основе промышленных отходов // Вестник ВСГУТУ. 2012. № 1 (36). С. 27.
19. Копаница Н.О., Сорокина Е.А., Демьяненко О.В. Влияние добавки термомодифицированного торфа на технологические свойства строительных смесей для 3d-печати // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. Т. 20. № 4. С. 122-134.
20. Кинд В.В. Коррозия цемента и бетона в гидротехнических сооружениях. М.: Госэнергоиздат, 1955. 320 с.
21. Пустовгар А.П. Эффективность применения современных суперпластификаторов в сухих строительных смесях // 4-я Междунар. научно-техн. конф. «Современные технологии сухих смесей в строительстве «MixBUILD»». Санкт-Петербург, 2002. С. 45-52.
22. Иванов И.М., Крамар Л.Я., Кирсанова А.А., Тьерри В. Влияние комплекса "микрокремнезем-суперпластификатор" на формирование структуры и свойств цементного камня // Вестник ЮжноУральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2018. Т. 18. № 1. С. 32-40.
23. Калашников, В.И. Особенности реологических изменений цементных композиций под действием ионностабилизирующих пластификаторов // Сборник трудов «Технологическая механика бетона». Рига: РПИ, 1984. С. 103-118.
24. Баженов Ю.М., Демьянова В.С., Калашников В.И. Модифицированные высококачественные бетоны. М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2006. 368 с.
25. Калашников В.И. Учет реологических изменений бетонных смесей с суперпластификаторами // Материалы IX Всесоюзной 53 конференции по бетону и железобетону (Ташкент, 1983). Пенза, 1983. С. 7-10.
26. Танг Ван Лам. Возможность применений высококачественного мелкозернистого торкрет-бетона для строительства метро // сборник материалов XIX Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых учёных. ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет». Издательство: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (Москва). 2016. С. 909-912.
27. Батраков В.Г., Тюрина Т.Е., Фаликман В.Р. Адсорбция и пластифицирующий эффект суперпластификатора С-3 в зависимости от состава цемента // Бетоны с эффективными добавками. М.: НИИЖБ, 1985. С. 8-14.
28. Gaitero J.J., Campillo I., Guerrero A. Reduction of the calcium leaching rate of cement paste by addition of silica nanoparticles [Снижение скорости выщелачивания кальция из цементной пасты путем добавления наночастиц кремнезема]. Cem. Concr. Res, 2008. Vol. 38. Pp. 1112–1118.
29. Kopanitsa N., Sarkisov Y., Gorshkova A., Demyanenko O. Additives for Cement Compositions Based on Modified Peat [Добавки для цементных композиций на основе модифицированного торфа] // AIP Conference Proceedings. AIP Publishing, 2016. Т. 1698. № 1.
30. Sanchez F., Zhang L., Ince C. Multi-scale performance and durability of carbon nanofiber/cement composites [Многоуровневая работа и долговечность углеродного нановолокна/цементных композитов] // Nanotechnology in Construction 3: Proceedings of the NICOM3. – Springer Berlin Heidelberg, 2009. С. 345-350.
31. Куликова А.А., Демьяненко О.В., Ничинский А.Н. Разработка комплексных модифицирующих добавок для тяжелого бетона // The Scientific Heritage. 2021. № 80-1. Pp. 36-40.
32. Корчагина О.А., Однолько В.Г. Материаловедение. Бетоны и строительные растворы. 2004. 42 с.

REFERENCES

1. Abdrahmanova K.A., Bajdzhanov D.O. Vysokoprochnyj beton modifitsirovannyj s razlichnymi dobavkami [High-strength concrete modified with various additives]. *Fundamental'nye i prikladnye nauchnye issledovaniya: aktual'nye voprosy, dostizheniya i innovacii*. Penza, 2019. Pp. 102-104. (rus)
2. Fyodorov V.S., Kupchikova N.V. Tekhnologii ustrojstva koncevnyh ushirenij nabivnyh i gotovyh svaj i ih vliyanie na formoobrazovanie konstrukcij fundamenta [Technologies for the device of end widenings of packed and finished piles and their influence on the shaping of foundation structures]. *Inzhenerno-stroitel'nyj vestnik Prikaspiya*. 2019. No. 1 (27). Pp. 40-56. (rus)
3. Kupchikova N.V., Maksimov A.O., Zinchenko D.V. Evolyuciya tekhnologii ustrojstva buronabivnyh svajnyh fundamentov s ushireniami [Evolution of the technology of the device of bored pile foundations with widenings]. *Innovacionnoe razvitie regionov: potencial nauki i sovremennogo obrazovaniya*. Astrahan', 2018. Pp. 113-121. (rus)
4. Ponomarev A.B., Solov'ev A.V., Bogomolova O.A. K voprosu opredeleniya raschetnoj nagruzki na svaju [To determine the design load on the pile]. *Aktual'nye problemy geotekhniki*. 2014. Pp. 159–165. (rus)

5. Osipov A.A., Gertner A.V., Chulkova I.L. Vliyanie dobavki «Relamiks» na svojstva tyazhelogo betona [The effect of the Relamix additive on the properties of heavy concrete]. *Arhitekturno-stroitel'nyj i dorozhno-transportnyj kompleksy: problemy, perspektivy, innovacii*. 2021. Pp. 671-675. (rus)
6. Trinker B.D. i dr. Jefferktivnost' primenenija kompleksnyh dobavok PAV i jelektrolitov [Effectiveness of complex surfactant and electrolyte additives]. *Beton i zhelezobeton*. 2007. No. 10. Pp. 12–13. (rus)
7. Petrova T.M., Smirnova O.M. Sovremennye modificirujushhie dobavki dlja proizvodstva sbornogo betona i zhelezobetona [Modern modifying additives for the production of precast concrete and reinforced concrete]. *Izvestija Peterburgskogo universiteta putej soobshhenija*. 2010. No. 4. Pp. 203-212. (rus)
8. Bocman L.N., Stokova V.V., Ishhenko A.V., Bocman A.N. Modificirovanie betona za schet vvedenija razlichnyh vidov dobavok [Modifying concrete by introducing different types of additives]. *Vestnik BGTU im. V.G. Shuhova*. 2016. No. 6. Pp. 90-94. (rus)
9. Kushbakova B.B., Botirov I.Sh., Muhamedbaev A.A. Vlijanie himicheskoj dobavki na prochnost' betona [Effect of a chemical additive on the strength of concrete]. *Scientific progress*. 2021. No. 1 (6). Pp. 302-304. (rus)
10. Bahtash K.H., Abdrahmanov U.K. Issledovanie vozmozhnosti povyshenija kachestva betona vvedeniem modificirujushhih dobavok [Study of the possibility of improving the quality of concrete by introducing modifying additives]. *Molodoj uchenyj*. 2020. No. 22. Pp. 91-94. (rus)
11. Zotkin A.G. Betony s jefferktivnymi dobavkami [Concretes with effective additives]. Moskva, 2014. Uchebnoe posobie. 160 p. (rus)
12. Rukovodstvo po primeneniju himicheskikh dobavok k betonu [Guidelines for the use of chemical concrete additives]. M., Strojizdat, 1975, 66 p.
13. Anisimov S.N., Kononova O.V., Minakov Ju.A., Leshkanov A.Ju., Smirnov A.O. Issledovanie prochnosti tjazhelogo betona s plastificirujushhimi i mineral'nymi dobavkami [Study of the strength of heavy concrete with plasticizers and mineral additives]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovanija*. 2015. No. 2 (1). (rus)
14. Jeyanth A., Kosalram R., Rajkiran R.C. Influence of chemical admixtures on the strength properties of concrete. *Conference: SET conference, VIT university*. 2013. <https://www.researchgate.net/publication/267624951> doi:10.13140/2.1.1107.0404
15. Druzhinkin S.V., Nemykina D.A., Krasnova E.A. Vlijanie superplastificirujushhih dobavok na prochnost' betona [Effect of superplasticizing additives on concrete strength]. *Inzhenernyj Vestnik Dona*. 2018. No. 2. Pp. 212. (rus)
16. Efimov V.M., Rozhin I.I., Popenko F.E., Stepanov A.V., Stepanov A.A., Vasil'chuk Ju.K. Ustrojstvo buronabivnyh svaj v uslovijah kriolitozony central'noj Jakutii [Installation of bored piles in the cryolithozone conditions of central Yakutia]. *Arktika i antarktika*. Moskva, 2018. Pp. 133-141. (rus)
17. Kalashnikov V.I. Cherez racional'nuju reologiju – v budushhee betonov. Ch. 2. Tonkodispersnye reologicheskie matricy i poroshkovye betony novogo pokolenija [Through rational rheology into the future of concrete. Part 2: Fine rheological matrices and new generation powder concretes]. *Tehnologii betonov*. 2007. No. 6. Pp. 8-11. (rus)
18. Bazarov B.G., Norzhinbadam S., Sanzhaasuren R., Dorzhieva S.G., Urhanova L.A. Plastificirujushhie dobavki v beton na osnove promyshlennyh othodov [Plasticizing additives in concrete based on industrial waste]. *Vestnik VSGUTU*. 2012. No. 1 (36). Pp. 27. (rus)
19. Kopanica N.O., Sorokina E.A., Dem'janenko O.V. Vlijanie dobavki termomodificirovannogo torfa na tehnologicheskie svojstva stroitel'nyh smesej dlja 3d-pechati [Effect of thermally modified peat additive on the technological properties of construction mixtures for 3d-printing]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2018. T. 20. Pp. 122-134. (rus)
20. Kind V.V. Korrozija cementov i betona v gidrotehnicheskikh sooruzhenijah [Corrosion of cements and concrete in hydraulic structures]. M.: Gosjenergoizdat, 1955. 320 p. (rus)
21. Pustovgar A.P. Jefferktivnost' primenenija sovremennyh superplastifikatorov v suhih stroitel'nyh smesjah [Effectiveness of modern superplasticizers in dry building mixes]. *4-ja Mezhdunar. nauno-tehn. konf. «Sovremennye tehnologii suhih smesej v stroitel'stve «MixBUILD»»*. Sankt-Peterburg, 2002. Pp. 45-52. (rus)
22. Ivanov I.M., Kramar L.Ja., Kirsanova A.A., T'eri V. Vlijanie kompleksa "mikrokremnezem-superplastifikator" na formirovanie struktury i svojstv cementnogo kamnja [Influence of the complex "microsilica-superplasticizer" on the formation of the structure and properties of cement stone]. *Vestnik JuzhnoUral'skogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Stroitel'stvo i arhitektura*. 2018. T. 18. No. 1. Pp. 32-40. (rus)
23. Kalashnikov V.I. Osobennosti reologicheskikh izmenenij cementnyh kompozicij pod dejstviem ionnostabilizirujushhih plastifikatorov [Peculiarities of rheological changes of cement compositions under the action of ionic stabilizing plasticizers]. *Sbornik trudov «Tehnologicheskaja mehanika betona»*. Riga: RPI, 1984. Pp. 103-118. (rus)
24. Bazhenov Ju.M., Dem'janova B.C., Kalashnikov V.I. Modificirovannye vysokokachestvennye betony [Modified high quality concretes]. M.: Izdatel'stvo Associacii stroitel'nyh vuzov, 2006. 368 p. (rus)

25. Kalashnikov V.I. Uchet reologicheskikh izmenenij betonnyh smesey s superplastifikatorami [Accounting for rheological changes in concrete mixtures with superplasticizers]. *Materialy IX Vsesojuznoj 53 konferencii po betonu i zhelezobetonu* (Tashkent, 1983). Penza, 1983. Pp. 7-10. (rus)
26. Tang Van Lam. Vozmozhnost' primenenij vysokokachestvennogo melkozernistogo torkret-betona dlja stroitel'stva metro [The possibility of using high-quality fine-grained shotcrete for subway construction]. *Sbornik materialov XIX Mezhdunarodnoj mezhvuzovskoj nauchno-prakticheskoy konferencii studentov, magistrantov, aspirantov i molodyh uchjonyh*. FGBOU VO «Nacional'nyj issledovatel'skij Moskovskij gosudarstvennyj stroitel'nyj universitet». Izdatel'stvo: Nacional'nyj issledovatel'skij Moskovskij gosudarstvennyj stroitel'nyj universitet (Moskva). 2016. Pp. 909-912. (rus)
27. Batrakov V.G., Tjurina T.E., Falikman V.R. Adsorbicija i plastificirujushhij jeffekt superplastifikatora S-3 v zavisimosti ot sostava cementa [Adsorption and plasticizing effect of superplasticizer C-3 depending on cement composition]. *Betony s jeffektivnymi dobavkami*. M.: NIIZhB, 1985. Pp. 8-14. (rus)
28. Gaitero J.J., Campillo I., Guerrero A. Reduction of the calcium leaching rate of cement paste by addition of silica nanoparticles. *Cem. Concr. Res*, 2008. Vol. 38. Pp. 1112–1118.
29. Kopanitsa N., Sarkisov Y., Gorshkova A., Demyanenko O. Additives for Cement Compositions Based on Modified Peat [Добавки для цементных композиций на основе модифицированного торфа]. *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing. 2016. T. 1698. No. 1.
30. Sanchez F., Zhang L., Ince C. Multi-scale performance and durability of carbon nanofiber/cement composites [Многоуровневая работа и долговечность углеродного нановолокна/цементных композитов]. *Nanotechnology in Construction 3: Proceedings of the NICOM3*. – Springer Berlin Heidelberg, 2009. Pp. 345-350.
31. Kulikova A.A., Dem'yanenko O.V., Nichinskij A.N. Razrabotka kompleksnyh modifiziruyushchih dobavok dlya tyazhelogo betona. *The Scientific Heritage*. 2021. No. 80-1. Pp. 36-40. (rus)
32. Korchagina O.A., Odnol'ko V.G. Materialovedenie. *Betony i stroitel'nye rastvory*. 2004. 42 p. (rus)

Информация об авторах:

Алтынбекова Алия Досжанкызы

НАО «Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева», г. Астана, Казахстан, докторант кафедры технология промышленного и гражданского строительства.

E-mail: kleo-14@mail.ru

Лукпанов Рауан Ермагамбетович

НАО «Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева», г. Астана, Казахстан, PhD, ассоциированный профессор кафедры технология промышленного и гражданского строительства.

E-mail: rauan_82@mail.ru

Дюсембинов Думан Серикович

НАО «Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева», г. Астана, Казахстан, кандидат технических наук, доцент кафедры технология промышленного и гражданского строительства.

E-mail: dusembinov@mail.ru

Цыгулев Денис Владимирович

НАО «Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева», г. Астана, Казахстан, кандидат технических наук, доцент кафедры строительство.

E-mail: denis_riza_72@mail.ru

Енкебаев Серик Бейсенгалиевич

НАО «Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева», г. Астана, Казахстан, кандидат технических наук, доцент кафедры строительство.

E-mail: yenkebayev-serik@mail.ru

Ержанова Нурлиза Киякбаевна

НАО «Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева», г. Астана, Казахстан, магистр, старший преподаватель кафедры физической и экономической географии.

E-mail: nurliza66@mail.ru

Information about authors:

Altynbekova Aliya D.

L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan,
doctoral student of the department of technology of industrial and civil engineering.
E-mail: kleo-14@mail.ru

Lukpanov Rauan E.

L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan,
PhD, associated professor of the department of technology of industrial and civil engineering.
E-mail: rauan_82@mail.ru

Dyusseminov Duman S.

L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan,
candidate in technical sciences, associate professor of the department of Industrial and Civil Engineering Technology.
E-mail: duseminov@mail.ru

Tsygulyov Denis V.

L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan,
candidate in technical sciences, associated professor of the department of Constuction.
E-mail: denis_riza_72@mail.ru

Yenkebayev Serik B.

L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan,
candidate in technical sciences, associated professor of the department of Constuction.
E-mail: yenkebayev-serik@mail.ru

Yerzhanova Nurliza K.

L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan,
MSC, senior lecturer of the department of Physical and economic geography.
E-mail: nurliza66@mail.ru

РЕЦЕНЗИЯ НА УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

«ИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В СОВРЕМЕННОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ И ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНОМ ХОЗЯЙСТВЕ»

Авторы:

д.э.н., проф. В.Л. Курбатов, д.т.н., проф. В.И. Римшин,
д.т.н., проф. Шубин И.Л., к.т.н., доц. С.В. Волкова

Представленное на рецензию учебное пособие имеет объем 416 стр.

Итоговой целью цифровой трансформации в нашей стране является обеспечение эффективной информационной поддержки участников строительного и жилищно-коммунального комплексов и их взаимоотношений в рамках организации процесса получения образования и управления образовательной деятельностью.

В этой связи материалы, представленные в учебном пособии «Информационное моделирование и искусственный интеллект в современном строительстве и жилищно-коммунальном хозяйстве» являются актуальными и важными и представляют научный интерес.

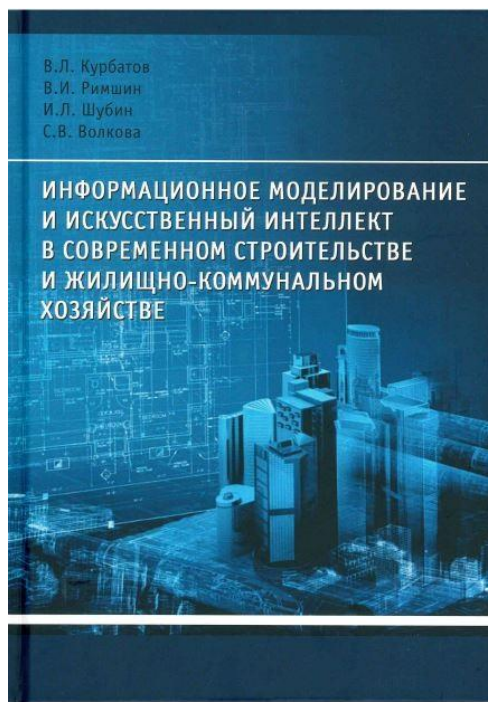
Авторы, с современных позиций, раскрывают вопросы организации строительства, в которых анализируется состояние дел, а также строится перспектива, посвященная технологии БИМ в строительстве. Здесь же даются история возникновения информационного моделирования, в которой раскрывается опыт зарубежного программного обеспечения, а также этапы жизненного цикла от проектирования до эксплуатации. В следующей главе представлена система профильной линейки ТИМ-технологий от российских производителей. Даются технологии проверки нормативных требований при формировании информационных моделей.

Достаточно емко представлены методы верификации и валидации цифровой информационной модели, которая позволяет осуществить создание и эксплуатацию информационного моделирования объекта в строительстве. Здесь же представлен классификатор строительных ресурсов.

Впервые, авторами представлены материалы по искусственному интеллекту в строительстве и жилищно-коммунальном хозяйстве, предлагаются национальные документы в области развития искусственного интеллекта, а также даются прогнозы по его развитию.

Методически материал построен достаточно грамотно. Таблицы, рисунки, размещенные в тексте, позволяют читателю быстро усваивать информацию, предложенную авторами. Главы и важные их разделы сопровождаются вопросами для самопроверки, позволяющие читателю проверить свои знания. Также логично материалы текста сопровождаются Приложениями.

Материалы учебного пособия вышли в свет в издательстве АСВ и имеют гриф Российской академии архитектуры и строительных наук.



Зав. кафедрой «Строительные конструкции, здания и сооружения»
Института Пути, строительства и сооружений
ФГАОУ ВО «Российского университета транспорта» (РУТ (МИИТ))
Академик РААСН, доктор технических наук, профессор,
В.С. Федоров

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. 9,1
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.