

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

Теория инженерных сооружений. Строительные конструкции

- Мамин А.Н., Авдеев К.В., Бобров В.В., Рэуцу А.В.** Реставрация архитектурного наследия В.Г. Шухова..... 3
- Мондрус В.Л., Сизов Д.К., Акимов И.В.** Определение характерных особенностей работы перфорированного резинометаллического виброизолятора с использованием программных комплексов, реализующих метод конечного элемента..... 11
- Тамразян А.Г., Сайед Й.А.К.** Экспериментальное исследование коэффициента перераспределения моментов в статически неопределимых железобетонных балках..... 24

Безопасность зданий и сооружений

- Истомин А.Д.** Влияние циклического замораживания и оттаивания на диаграмму деформирования сжатого бетона..... 36
- Мацевич Т.А., Андреев И.Ф.** Функция надежности предварительно напряженной корродированной железобетонной балки при нелинейном распространении коррозии..... 45
- Себешев В.Г., Лукин Е.К.** Надежность и долговечность трубчатых элементов стальных конструкций при неравномерных коррозионных повреждениях..... 53
- Федорова Н.В., Бушова О.Б., Колчунов В.И.** Расчет конструктивно нелинейных железобетонных рам при их хрупком разрушении по наклонному сечению..... 63

Архитектура и градостроительство

- Алборова Л.А., Мамиева И.А.** Криволинейные формы в архитектуре зданий и сооружений в начале XXI-го века..... 76
- Енин А.Е., Заплавная А.Э.** Специфика послевоенной реконструкции квартальной застройки исторического центра г. Воронежа в XX в.... 87

Строительные материалы и технологии

- Ельчищева Т.Ф., Ерофеев В.Т., Монастырев П.В., Абрамова Е.Н., Афонин В.В., Ерофеева И.В., Атманзин А.Ф.** Биостойкость цементных композитов из сухих строительных..... 103
- Макеев А.И.** Формирование маршрута магистральной трещины разрушения в многоуровневой структуре конгломератных строительных композитов..... 119
- Пузатова А.В., Дмитриева М.А., Захаров А.А., Лейцин В.Н.** Зола-уноса при производстве бетонов различного назначения и сухих строительных смесей..... 132

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 №ФЦ 77-67169 from 16.09.2016 r.

Index on the catalogue of the «Pressa Rossi»
86294 on the websites www.pressa-ru and
www.akc.ru

© Orel State University, 2023

Contents

Theory of engineering structures. Building units

- Mamin A.N., Avdeev K.V., Bobrov V.V., Reutsu A.V.** Restoration of the architectural heritage of V.G. Shukhov..... 3
- Mondrus V.L., Sizov D.K., Akimova I.V.** Determination of the characteristic features of the operation of a perforated rubber-metallic vibrator insulator with the use of software packages implementing the finite element method..... 11
- Tamrazyan A.G., Sayed Y.A.K.** Experimental study of the coefficient of moment redistribution in statically indeterminate rc beams..... 24

Building and structure safety

- Istomin A.D.** The effect of cyclic freezing and thawing on the deformation diagram of compressed concrete..... 36
- Matseevich T.A., Andreev I.F.** Reliability function of a prestressed corroded reinforced concrete beam with nonlinear corrosion propagation..... 45
- Sebeshev V.G., Lukin E.K.** Reliability and durability of tubular elements of steel structures under ununiform corrosion damage..... 53
- Fedorova N.V., Bushova O.B., Kolchunov V.I.** Calculation of structurally nonlinear reinforced concrete frames during their destruction along an inclined section..... 63

Architecture and town-planning

- Alborova L.A., Mamieva I.A.** Curvilinear forms in architecture of buildings and erections..... 76
- Enin A.E., Zaplavnaya A.E.** The specifics of the post-war reconstruction of the historical center of Voronezh (1943-1959)..... 87

Construction materials and technologies

- Elchishcheva T.F., Erofeev V.T., Monastirev P.V., Abramova E.N., Afonin V.V., Erofeeva I.V., Atmanzin A.F.** Biostability of cement composites from dry building mixtures..... 103
- Makeev A.I.** Formation of the route of the main crack of destruction in the multi-level structure of conglomerate building composites..... 119
- Puzatova A.V., Dmitrieva M.A., Zakharov, A.A., Leitsin V.N.** Fly ash in the production of concrete for various purpose and dry construction mixtures..... 132

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.

А.Н. МАМИН^{1,2}, К.В. АВДЕЕВ¹, В.В. БОБРОВ^{1,2,3}, А.В. РЭУЦУ¹

¹АО «Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений – ЦНИИПромзданий», г. Москва, Россия

²ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия

³Вятский государственный университет, г. Киров, Россия

РЕСТАВРАЦИЯ АРХИТЕКТУРНОГО НАСЛЕДИЯ В.Г. ШУХОВА

Аннотация. Статья посвящена вопросу сохранения архитектурного наследия выдающегося русского инженера В.Г. Шухова. Рассмотрены три объекта: московская Радиобашня на Шаболовке, «Шуховский пролет» Листопрокатного цеха и Водонапорная башня, расположенные в г. Выкса Нижегородской области. Представлены основные конструктивные параметры указанных сооружений и результаты их технического обследования, проведенные противоаварийные мероприятия для обеспечения сохранности Радиобашни в Москве и рекомендации по реставрации всех трех сооружений с переносом Листопрокатного цеха и Водонапорной башни в центральную часть г. Выкса. Предусмотрено воссоздание исторического облика сооружений, а также благоустройство прилегающей территории. Предполагается восстановление геометрической формы сечения лазерным напылением порошкового металла, и только в случае невозможности восстановления элемента предусмотрена его замена. Для сохранения исторического облика соединения стальных конструкций будут на болтах, имитирующих заклёпки. В ходе проведения земляных работ запланированы археологические исследования, так как в границах территории строительства (г. Выкса) могут залегать участки сохранившихся культурных напластований объекта культурного наследия «Усадебно-промышленный комплекс, XVIII-XIX вв.».

Ключевые слова: радиобашня, водонапорная башня, коррозия, обследование, реставрация.

A.N. MAMIN^{1,2}, K.V. AVDEEV¹, V.V. BOBROV^{1,2,3}, A.V. REUTSU¹

¹JSC «Central Research and Design Experimental Institute of Industrial Buildings and Structures – Tsniipromzdani», Moscow, Russia

²Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), Moscow, Russia

³Vyatka State University, Kirov, Russia

RESTORATION OF THE ARCHITECTURAL HERITAGE OF V.G. SHUKHOV

Abstract. The article is devoted to the issue of preserving the architectural heritage of the outstanding Russian engineer V.G. Shukhov. Three objects are considered: the Moscow Radio Tower on Shabolovka, the "Shukhov Span" of the Sheet-rolling Shop and the Water Tower located in Vyksa, Nizhny Novgorod region. The main technical parameters of these structures and the results of their technical inspection are presented, emergency measures taken to ensure the safety of the Radio Tower in Moscow and recommendations for the restoration of all three structures with the transfer of the Sheet Rolling Shop and the Water Tower to the central part of the city Vyksa. It is planned to recreate the historical appearance of the buildings, as well as the improvement of the adjacent territory. It is supposed to restore the geometric shape of the cross-section by laser spraying of powdered metal, and only if it is impossible to restore the element, its replacement is provided. In order to preserve the historical appearance, the joints of steel structures will be on bolts imitating rivets.

© Мамин А.Н., Авдеев К.В., Бобров В.В., Рэуцу А.В., 2023

Archaeological investigations are planned during the excavation, as areas of preserved cultural strata of the cultural heritage object "Manor-industrial complex, XVIII-XIX centuries" may lie within the boundaries of the construction territory (Vyksa).

Keywords: radio tower, water tower, corrosion, inspection, restoration.

Введение

С именем великого русского инженера Владимира Григорьевича Шухова связаны крупнейшие изобретения, научные работы и инженерные сооружения в разнообразных отраслях науки и техники. Им выполнены теоретические исследования с их практической реализацией в таких областях, как добыча, переработка, хранение, транспортировка и эффективное применение нефти и нефтепродуктов, мостостроение, судостроение и др.

Особое положение в творческом наследии В.Г. Шухова занимает архитектурно-строительное направление. Он исследовал, а затем широко использовал в своих проектах оригинальные арочные конструкции, пространственные системы покрытий. Им были предложены и запатентованы пространственные конструкции, образованные прямыми металлическими стержнями («сетчатые системы»), применяемые вначале для покрытий, а затем и как вертикальные несущие конструкции.

К сожалению, многие из творений В.Г. Шухова на сегодняшний день утрачены, а большинство из сохранившихся зданий и сооружения признаны памятниками культурного наследия, которые либо уже отреставрированы, либо находятся в процессе реставрации, либо ожидают своего часа.

В статье рассмотрены три объекта, исследования и проектирование реставрации которых были выполнены авторами в последнее время.

Объекты и методы исследований

Радиобашня в г. Москве

Самый известный объект, запроектированный и построенный В.Г. Шуховым – Радиобашня в г. Москве, на Шаболовке.

Первоначально В.Г. Шухов предложил проект гиперболоидной башни высотой 350 метров и массой 2200 тонн, но в связи с отсутствием металла был разработан и реализован второй проект башни – высотой 148,5 метров массой 240 тонн. Башня была сдана в эксплуатацию в марте 1922 года [1].

Радиобашня В.Г. Шухова является объектом культурного наследия регионального значения. За время эксплуатации башни произошло значительное ухудшение ее состояния, в основном из-за коррозионных процессов. Также увеличились технологические нагрузки (добавлена дополнительная секция для антенн, промежуточные площадки, кольца, лифт), для компенсации которых были приняты неудачные конструктивные решения (железобетонная обойма по верху фундамента, дополнительные накладки на сварке), реализация которых привела к возникновению новых очагов коррозии.

В 2011 г. институтом АО «ЦНИИПромзданий» было проведено полное обследование сооружения и, на основании данных лазерного сканирования, построена трёхмерная стержневая модель, отражающая фактическую геометрию башни, разработан проект реконструкции-реставрации.

Листопрокатный цех и Водонапорная башня в г. Выкса Нижегородской области

Нижегородская область занимает в творчестве Владимира Григорьевича особое место – именно представленные на Нижегородской ярмарке в 1896 году конструкции принесли ему всеобщее признание и широкую известность. Объекты, подобные представленным на ярмарке, возведены позже во многих регионах, в том числе и в Нижегородской области, где к настоящему времени выявлено не менее шести сооружений, связанных с именем В.Г. Шухова [2, 3].

В 2018 г. авторами были проведены научные исследования двух объектов культурного наследия федерального значения, расположенных в г. Выкса Нижегородской области на территории Выксунского металлургического завода: Листопрокатный цех и Водонапорная башня (рисунок 1). На основе натурных обследований и проверочных расчетов разработаны проекты реставрации с перемещением объектов в центральную часть города Выкса.

Сохранившаяся часть листопрокатного цеха, называемая «Шуховским пролетом», была построена на Нижне-Выксунском заводе в 1897-1898 годах [4].

«Шуховский пролет» представляет собой прямоугольное в плане здание размерами 72,9х38,4 м. Высота здания от уровня опорной плиты до верха арки 13,25 м [5]. Несущими конструкциями являются сквозные трехшарнирные арки из прокатных профилей и подстропильные фермы с круглым очертанием верхнего пояса, расположенные вдоль крайних продольных осей пролёта. Покрытие выполнено в виде металлического сетчатого свода двойной кривизны. Свод образован Z-образными прокатными профилями (прогонами).

При проведении обследования «Шуховского пролета» зафиксированы многочисленные дефекты и повреждения металлических конструкций. Наиболее опасные – это щелевая коррозия в узлах, глубокая язвенная коррозия элементов арок и фахверковых стоек, сквозная коррозия элементов [6].



**Рисунок 1 – Общий вид объектов в г. Выкса Нижегородской области на территории Выксунского металлургического завода в 2018 году:
а) листопрокатный цех («Шуховский пролет»); б) водонапорная башня**

Водонапорная башня построена в 30-е годы двадцатого века.

Геометрическая схема башни – гиперboloид вращения, образованный 25 наружными и 25 внутренними наклонными стойками из стальных одиночных уголков. Соединенные между собой и с равномерно расположенными по высоте башни горизонтальными кольцами стойки образуют треугольные ячейки, обеспечивающие геометрическую неизменяемость сооружения.

Диаметр нижнего опорного кольца составляет 14,6 м, диаметр верхнего кольца 7,47 м. Высота сооружения от обреза фундамента до верхней опорной площадки составляет 28,46 м, общая высота сооружения от обреза фундамента до отметки площадки на кровле составляет 38,82 м. Фундамент в виде кольца высотой 2,75 м, толщиной – 1,4 м, с наружным диаметром – 16 м [7, 8].

По центру сооружения располагается винтовая металлическая лестница.

Выявлены дефекты в виде сквозной коррозии, локальных и общих погибей, разрывов элементов лестницы. Наибольшую опасность, наряду с механическими повреждениями,

представляет щелевая коррозия. Продукты коррозии распирают соседние элементы, вследствие чего происходят деформации элементов и разрушение заклепок. Повреждение элементов в местах образования щелевой коррозии происходит интенсивнее, чем на соседних участках и составляет до 30% толщины сопрягаемого элемента [9].

Результаты

Реставрация Радиобашни в Москве

По совокупности выявленных дефектов, подробно описанных в [10], состояние Радиобашни было признано аварийным и необходимо было принятие оперативных мер по ее сохранению. В таблице 1 приведена информация об основных дефектах, выявленных при проведении обследования.

Таблица 1 – Количество дефектов металлических конструкций

	Количество выявленных дефектов									
	1-2 секция		3 секция		4 секция		5 секция		6 секция	
	шт	%	шт	%	шт	%	шт	%	шт	%
Всего узлов в секции	720		696		480		444		300	
Отсутствует элемент соединения между стойкой и кольцом	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Отсутствует заклепка (болт)	17	2.4	2	0.3	7	1.5	15	3.4	6	2
Промежуточные кольца с прокорродировавшими насквозь элементами	-	-	-	-	6	67	-	-	-	-
Значительная коррозия	57	7.9	33	4.7	130	27.1	5	1.1	13	4.3
Вмятины до 50мм	5	0.7	3	0.4	22	4.6	-	-	-	-
Зазор между элементами (больше 10мм)	11	1.5	13	1.9	6	1.3	3	0.7	9	3

Как показали численные эксперименты, удаление отдельных элементов Радиобашни без их разгрузки приведет к необратимым последствиям [11]. В связи с этим предусмотрена полная разгрузка башни путем «вывешивания» на временную дополнительную опору, что позволит поэлементно ее реставрировать.

Для исключения передачи горизонтальных нагрузок «вывешивание» предусмотрено через траверсы гибкими тросами. Разработана уникальная конструкция примыкания траверсы к узлам Радиобашни, обеспечивающая передачу вертикального усилия от веса башни по оси ее наклонных элементов, не допуская возникновения изгибающих моментов. Правильность разработки подтверждена в экспериментах, проведенных при опытном нагружении нижнего узла [12].

Для восстановления геометрии сечений металлических конструкций предложена и экспериментально подтверждена возможность лазерного напыления порошкового металла [13].

Проектом также предусмотрено удаление обетонирования опорных узлов и усиление фундамента Радиобашни монолитными железобетонными обоймами.

Проект реставрации, разработанный в 2011 г., получил положительное заключение государственной историко-культурной экспертизы Минкульта РФ, но из-за ограниченного финансирования не был реализован, и в 2014 г. институт АО «ЦНИИПромзданий» разработал противоаварийные мероприятия [14], которые были реализованы в 2016 г. после получения положительного заключения историко-культурной экспертизы Мосгорнаследия. Выполнен демонтаж седьмой секции, которая смонтирована в конце XX века и не является охраняемой частью памятника. Радиобашня «вывешена» в 24 узлах на консоли временной опорной конструкции (рисунок 2) с минимальным натяжением канатов.

Обследования, проведенные в 2017 и 2019-2020 годах, показали, что развитие коррозии металла продолжается. Проведенные противоаварийные мероприятия исключают

внезапное обрушение Радиобашни, но сохраняется опасность локальных разрушений, конструкции остаются в аварийном состоянии.

Реставрация Листопрокатного цеха и Водонапорной башни с переносом в центр города

Участок для размещения объектов культурного наследия «Листопрокатный цех» и «Водонапорная башня» выделен в центральной части г. Выкса Нижегородской области, что, по мнению городской администрации, повысит привлекательность города для туристов. Участок находится в границах Единой охранной зоны г. Выксы, Историко-архитектурной заповедной территории г. Выксы. На участке расположены остатки стен доменного корпуса Верхне-Выксунского завода, два корпуса мастерских (северный и южный), главный усадебный дом, также являющиеся объектами культурного наследия.

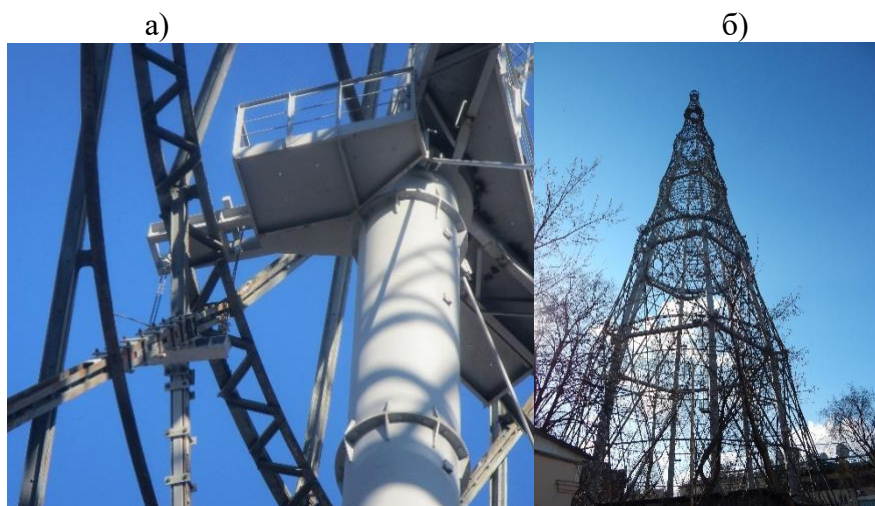


Рисунок 2 – Радиобашня в Москве [12]:

**а) смонтированный узел первой секции опорной башни;
б) общий вид Радиобашни после устройства опорной башни**

Проектом реставрации предполагается восстановить архитектурный облик несущих конструкций «Шуховского пролета» и открыть его для обзора со всех сторон. Стеновое ограждение и покрытие здания не предусмотрены. Реконструкция с реставрацией здания цеха заключается в разборке каркаса укрупненными блоками, переносу их на строительную площадку, восстановлении или замене повреждённых элементов каркаса и сборке цеха на новом месте. Предусмотрена полная замена прогонов покрытия. Предусмотрены мероприятия по устранению выявленных механических и коррозионных повреждений.

Для восстановления облика Водонапорной башни на верхнем опорном кольце устанавливается деревянный шатёр, с геометрией, соответствующей проекту инженера В.Г. Шухова. Шатёр башни запроектирован цилиндрической формы с техническим помещением внутри.

Восстановление геометрической формы сечений элементов цеха и башни предусмотрено лазерным напылением порошкового металла. Все новые соединения металлических конструкций выполняются на болтах, с головками в виде полусферы, имитирующими заклёпки. На открытые поверхности всех элементов предусмотрено нанесение антикоррозионного покрытия путем нанесения цинко-алюминиевого сплава методом газотермического напыления.

В ходе проведения земляных работ предусмотрены археологические исследования в режиме наблюдений за земляными работами, так как в границах территории строительства могут залегать участки сохранившихся культурных напластований объекта культурного

наследия «Усадебно-промышленный комплекс, XVIII-XIX вв.» (Остатки стен литейного корпуса Верхне-Выксунского завода, XVIII в.).

На проекты реставрации Листопрокатного цеха и Водонапорной башни получены положительные заключения государственной историко-культурной экспертизы Минкульта РФ и согласования Управления государственной охраны объектов культурного наследия Нижегородской области.

Заключение

Реставрация объектов культурного наследия – необходимое условие сохранения исторической среды, что несомненно важно для нормального развития общества. Сохранение и восстановление памятников архитектуры положительно отразится и на так называемом «интеллектуальном» туризме, который напрямую обращен к историческим объектам. Отметим, что в последние годы активизировались работы по реконструкции и реставрации памятников культурного наследия. В частности, это стало возможно благодаря небезразличному отношению к существующей проблеме и участию в планировании и производстве реставрационных работ не только государственных организаций, но и собственников объектов.

Качественная реставрация исторических зданий и сооружений – процесс весьма затратный и трудоемкий. Необходимо участие большого количества высококлассных специалистов как непосредственно при выполнении реставрационных работ, так и на этапе разработки проектной документации, в которой должны быть предусмотрены научно-обоснованные и экспериментально проверенные мероприятия, позволяющие на основе современных технологий максимально сохранить историческую ценность объекта. Авторы надеются, что разработанные ими проекты будут реализованы в ближайшее время, что позволит сохранить уникальные памятники архитектуры, связанные с именем выдающегося ученого, великого русского инженера Владимира Григорьевича Шухова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В.Г. Шухов (1853-1939). Искусство конструкции: Перевод с немецкого. Под ред. Р. Грефе, М.М. Гаппоева, О. Перчи. Москва: Мир, 1995. 192 с.
2. Зеленова С.В., Виноградова Т.П., Коротаева Д.И., Ометова Г.Н. Шухов В.Г. Нижегородские проекты. Территория уникальных объектов. Н. Новгород: Литера, 2016. 224 с.
3. Виноградова Т.П. Шухов В.Г. Нижегородские проекты. Гений В.Г. Шухова и современная эпоха: материалы международного конгресса. Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. С. 108-114.
4. Никитин Ю.А. Промышленные выставки России XIX – XX века. Череповец: Полиграфист, 2004. 269 с.
5. Гаппоев М.М. Арочные конструкции с системой гибких затяжек. В кн. Шухов В.Г. (1853 – 1939). Искусство конструкции. Москва: Мир, 1995. 54-59 с.
6. Мамин А.Н., Кодыш Э.Н., Бобров В.В., Рэуцу А.В. «Шуховский пролет» листопрокатного цеха Нижне-Выксунского завода // ACADEMIA. Архитектура и строительство. 2019. №2. С. 110–116. <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2019-2-110-116>
7. Водонапорная башня, Горьковская обл., г. Выкса. Паспорт памятника истории и культуры СССР. Министерство культуры СССР. Архив УГО ОКН Нижегородской области, 1976.
8. Отдел капитального строительства Выксунского металлургического завода. Технический проект водонапорной башни // Фонды Музея истории завода усадебно-промышленного комплекса Баташевых-Шепелевых, № 284/10. 1937.
9. Мамин А.Н., Кодыш Э.Н., Ершов М.Н., Бобров В.В., Рэуцу А.В. Реставрация водонапорной башни Нижне-Выксунского завода // Строительство и реконструкция. 2019. № 1. С. 67-75. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2019-81-1-67-75>
10. Гранев В.В., Мамин А.Н., Кодыш Э.Н., Кузнеценко С.А., Ершов М.Н. Техническое состояние несущих конструкций радиобашни В. Г. Шухова // Промышленное и гражданское строительство. 2012. № 12. С. 90-92.
11. Отчет по результатам обследования строительных конструкций Радиобашни Шухова, расположенной по адресу: г. Москва, ул. Шухова, 10, стр.2. (проектная документация на производство

ремонтно-реставрационных работ по сохранению объекта культурного наследия регионального значения «Радио-башня, 1922 г., инженера В.Г.Шухова», по адресу: Москва, ул. Шухова, дом 10, стр.2). Книга №1. Москва: АО «ЦНИИПромзданий», 2011. 99 с.

12. Гранев В.В., Мамин А.Н., Кодыш Э.Н., Бобров В.В., Ершов М.Н., Матвейюшкин С.А. Сохраним радиобашню В.Г. Шухова // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 6. С. 14-19.

13. Гранев В.В., Мамин А.Н., Кодыш Э.Н., Еремин К.И., Ершов М.Н., Шнейдеров Г.Р. Некоторые свойства порошкового металла при его лазерном напылении для восстановления сечений стальных строительных конструкций // Строительные материалы. 2018. № 9. С. 54 – 57.

14. Кодыш Э.Н., Мамин А.Н., Бобров В.В., Рэуцу А.В. и Кузнеценко С.А. Результаты обследования радиобашни В.Г. Шухова // Строительство и реконструкция. 2017. № 6 (74). С. 43-48.

REFERENCES

1. V.G. Shukhov 1853-1939. The Art of Construction, edited by R. Grefe, M.M. Gappoev, O. Perchi. Moscow: Izdatel'stvo Mir, 1995. 192 p.

2. Zelenova S.V., Vinogradova T.P., Korotaeva D.I., Shemetova G.N. Shukhov V.G.: Nizhny Novgorod projects. Territory of unique objects. N. Novgorod: Publishing house of the Litera, 2016. 224 p. (rus)

3. Vinogradova T.P. Shukhov V.G.: Nizhegorodskie proekty. Territoriya unikal'nykh obektov [V.G. Shukhov. Nizhny Novgorod projects. The Genius of V.G. Shukhov and the Modern Era]. Proceedings of the International Congress of the International Congress. Moscow: Publishing House of the Bauman Moscow State Technical University, 2015. Pp. 108-114. (rus)

4. Nikitin Yu.A. Industrial exhibitions of Russia of the XIX – XX century. Cherepovets: Polygraphist, 2004. 269 p. (rus)

5. Gappoev M.M. Arched structures with a system of flexible puffs, in V.G. Shukhov 1853-1939. The Art of Construction. Moscow: Izdatel'stvo Mir, 1995. Pp. 54-59.

6. Mamin A.N., Kodysh E.N., Bobrov V.V., Reutsu A.V. «Shukhovskii prolet» listopokatnogo tsekha Nizhne-Vyksunskogo zavoda ["Shukhov span" of the sheet rolling shop of the Nizhne-Vyksa plant]. *Academia. Architecture and construction*. 2019. No 2. Pp. 110 – 116 (2019). (rus) <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2019-2-110-116>

7. Vodonapornaya bashnya, Gor'kovskaya obl., g. Vyksa. Passport pamyatnika istorii i kul'tury SSSR. Ministerstvo kul'tury SSSR. Arkhiv UGO OKN Nizhegorodskoi oblasti [Water tower, Gorky region, Vyksa. Passport of the monument of history and culture of the USSR. Ministry of Culture of the USSR. Archive of the UGO OKN of the Nizhny Novgorod region]. 1976. (rus)

8. Otdel kapital'nogo stroitel'stva Vyksunskogo metallurgicheskogo zavoda. Tekhnicheskii projekt vodonapornoj bashni. Fondy Muzeia istorii zavoda usadbeno-promyshlennogo kompleksa Batashevyykh-Shepelevyykh, №284/10 [Department of capital construction of the Vyksa Metallurgical Plant. Technical project of the water tower. Funds of the Museum of the History of the Batashev-Shepelev estate and Industrial Complex]. No 284/10. 1937. (rus)

9. Mamin A.N., Kodysh E.N., Ershov M.N., Bobrov V.V., Reutsu A.V. Restoration of the water tower Nizhnyaya-Vyksa plant. *Building and Reconstruction*. 2017. No 1. Pp. 67-75. (rus) <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2019-81-1-67-75>

10. Granev V.V., Ershov M.N., Mamin A.N., Kodysh E.N., Kuznechenko S.A. Operating conditions of bearing structures of the Shukhov radio tower. *Industrial and civil engineering*, 2012. No 12. Pp. 90-92. (rus)

11. Report on the results of the survey of the building structures of the Shukhov Radio Tower, located at the address: Moscow, Shukhov str., 10, p.2. (project documentation for the production of repair and restoration works for the preservation of the cultural heritage object of regional significance "Radio Tower, 1922, engineer V.G.Shukhov", at the address: Moscow, ul.Shukhov, house 10, p. 2). Book No. 1. Moscow: Publishing of the AO TsNIIPromzdaniy. 2011. 99 p. (rus)

12. Granev V.V., Mamin A.N., Kodysh E.N., Bobrov V.V., Ershov M.N., Matveyushkin S.A. Sokhranim radiobashnyu V.G. Shukhova [Save the V. G. Shukhov radio tower]. *Industrial and civil engineering*. 2012. No 12. Pp. 14–19. (rus)

13. Granev V.V., Mamin A.N., Kodysh E.N., Eremine K.I., Ershov M.N., Schneiderov G.R. Nekotorye svoystva poroshkovogo metalla pri ego lazernom napylenii dlya vosstanovleniya sechenii stal'nykh stroitel'nykh konstruktсий [Some properties of powdered metal during its laser spraying for the restoration of sections of steel building structures]. *Building materials*. 2018. No 9. Pp. 54–57. (rus) <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-763-9-54-57>

14. Kodysh E.N., Mamin A.N., Bobrov V.V., Reutsu A.V., Kuznechenko S.A. Rezul'taty obsledovaniya radiobashni V.G. Shukhova [The results of the survey of the radio tower by V. Shukhov]. *Building and Reconstruction*. 2017. No 6. Pp. 43–48. (rus).

Информация об авторах:

Мамин Александр Николаевич

АО «Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений – ЦНИИПромзданий», г. Москва, Россия,
доктор технических наук, профессор, начальник отдела обследований зданий и сооружений.

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
г. Москва, Россия,
профессор кафедры железобетонных и каменных конструкций.

E-mail: otozs@yandex.ru

Авдеев Кирилл Владимирович

АО «Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений – ЦНИИПромзданий», г. Москва, Россия,
зам. генерального директора – главный инженер.

E-mail: 6136133@mail.ru

Бобров Владимир Викторович

АО «Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений – ЦНИИПромзданий», г. Москва, Россия,

кандидат технических наук, заведующий сектором отдела обследований зданий и сооружений № 1.

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

доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций.

Вятский государственный университет, г. Киров, Россия,

доцент кафедры строительного производства.

E-mail: ybobrov1985@bk.ru

Рзуцу Александр Викторович

АО «Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений – ЦНИИПромзданий», г. Москва, Россия,
ведущий инженер.

E-mail: otozs@yandex.ru

Information about authors:

Mamin Aleksandr N.

JSC «Central Research and Design Experimental Institute of Industrial Buildings and Structures – Tsniipromzdani»,
Moscow, Russia,

doctor of technical Sciences, Professor, Head of the Department of Surveys of Buildings and Structures.

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), Moscow, Russia,

professor of the department of Reinforced Concrete and Stone Structures.

E-mail: otozs@yandex.ru

Avdeev Kirill V.

JSC «Central Research and Design Experimental Institute of Industrial Buildings and Structures – Tsniipromzdani»,
Moscow, Russia,

deputy general director – chief engineer.

E-mail: 6136133@mail.ru

Bobrov Vladimir V.

JSC «Central Research and Design Experimental Institute of Industrial Buildings and Structures – Tsniipromzdani»,
Moscow, Russia,

candidate in technical sciences, Head of the Sector of the Department of Surveys of Buildings and Structures No. 1.

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), Moscow, Russia,

associate professor of the department of Reinforced Concrete and Stone Structures.

Vyatka State University, Kirov, Russia,

associate professor of the Department of Construction Production.

E-mail: ybobrov1985@bk.ru

Reutsu Alexandr V.

JSC «Central Research and Design Experimental Institute of Industrial Buildings and Structures – Tsniipromzdani»,
Moscow, Russia,

principal engineer.

E-mail: otozs@yandex.ru

В.Л. МОНДРУС¹, Д.К. СИЗОВ¹, И.В. АКИМОВА²¹НИУ МГСУ «Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия²ООО «ВИБРОСЕЙСМОЗАЩИТА», г. Москва, Россия

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ РАБОТЫ ПЕРФОРИРОВАННОГО РЕЗИНОМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ВИБРОИЗОЛЯТОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ, РЕАЛИЗУЮЩИХ МЕТОД КОНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА

Аннотация. Описываются особенности статического и динамического поведения резинометаллических виброизоляторов, планируемых к использованию для виброизоляции зданий в современном строительном комплексе. Приводятся результаты конечно-элементного моделирования виброизоляторов с целью определения статических и динамических характеристик. Рассмотрены как однослойные виброизоляторы, так и виброизоляторы, включающие в себя три резиновых слоя. Как показали результаты расчетов, наличие перфораций существенным образом сказывается на несущей способности виброизоляторов, значительно уменьшая её, однако, эффективность работы таких виброизоляторов также повышается по сравнению с полностью монолитными виброизоляторами без отверстий. Это объясняется целым рядом причин, одна из которых – это практическая несжимаемость резиновых слоев. Фактически, резиновые тела могут подвергаться сжатию только за счет деформирования боковой поверхности, таким образом, развивая боковую поверхность резиновых слоев можно добиться приемлемой жесткости виброизолятора как конструктивного элемента, что позволит снизить жесткость системы виброизоляции. Существенно важным является и пространственное расположение отверстий, так размещение отверстий вблизи от боковой поверхности резинового слоя дает существенно меньший эффект, по сравнению с размещением отверстий в центре. В процессе расчета выяснилось, что в сжатых резиновых слоях наблюдается эффект образования ярко выраженных зон всестороннего сжатия. Наличие центральных отверстий приводит к разрушению таких зон в большинстве образцов, что позволяет в большей степени понизить первую собственную частоту виброизолируемой системы, тем самым, способствуя повышению эффективности виброзащитных мероприятий. Выбор конфигурации отверстий представляет собой оптимизационную задачу, где, с одной стороны, необходимо обеспечить приемлемую с точки зрения практики виброизоляции несущую способность виброизоляторов при заданных размерах виброизолятора в плане, а, с другой стороны, максимально снизить жесткость системы, увеличивая, таким образом, эффективность виброзащитных мероприятий.

Ключевые слова: резинометаллические виброизоляторы, виброзащита, метод конечного элемента, многослойные виброизоляторы, техногенная вибрация

V.L. MONDRUS¹, D.K. SIZOV¹, I.V. AKIMOVA²¹NRU MG SU «Moscow State Construction University», Moscow, Russia²LLC «VIBROSEISMOZASCHITA», Moscow, Russia

DETERMINATION OF THE CHARACTERISTIC FEATURES OF THE OPERATION OF A PERFORATED RUBBER-METALLIC VIBRATOR INSULATOR WITH THE USE OF SOFTWARE PACKAGES IMPLEMENTING THE FINITE ELEMENT METHOD

Abstract. The features of the static and dynamic behavior of rubber-metal vibration isolators planned for use for vibration isolation of buildings in a modern building complex are considered.

© Мондрус В.Л., Сизов Д.К., Акимова И.В., 2023

The results of finite element modeling of vibration isolators are presented in order to determine the static and dynamic characteristics. Both single-layer vibration isolators and vibration isolators, including three rubber layers, are considered. As the calculation results showed, the presence of perforations significantly affects the bearing capacity of vibration isolators, significantly reducing it, however, the efficiency of such vibration isolators also increases compared to completely monolithic vibration isolators without holes. This is due to a number of reasons, one of which is the practical incompressibility of the rubber layers. In fact, rubber bodies can be subjected to compression only due to the deformation of the side surface, thus, by developing the side surface of the rubber layers, it is possible to achieve acceptable rigidity of the vibration isolator as a structural element, which will reduce the rigidity of the vibration isolation system. The spatial arrangement of the holes is also essential, since the placement of the holes close to the side surface of the rubber layer gives a significantly smaller effect compared to the placement of the holes in the center. In the process of calculation, it turned out that in the compressed rubber layers, the effect of the formation of pronounced zones of all-round compression is observed. The presence of central holes leads to the destruction of such zones in most samples, which makes it possible to reduce the first natural frequency of the vibration-isolated system to a greater extent, thereby contributing to an increase in the effectiveness of vibration protection measures. The choice of the hole configuration is an optimization problem, where, on the one hand, it is necessary to ensure the bearing capacity of vibration isolators acceptable from the point of view of vibration isolation for given dimensions of the vibration isolator in the plan, and, on the other hand, to minimize the rigidity of the system, thus increasing the effectiveness of vibration protection measures.

Keywords: rubber-metal vibration isolators, vibration protection, finite element method, multilayer vibration isolators, industrial vibration.

Введение

В современном строительном комплексе используются различные методы борьбы с вибрацией техногенного происхождения, возникающей от движения поездов метрополитена, трамваев, линий железных дорог. В большинстве случаев данные вибрации абсолютно безопасны с точки зрения оказываемого влияния на сами несущие конструкции, но вызывают значительные изменения в здоровье людей при их длительном воздействии [1-13]. Люди, подверженные повторяющемуся вибрационному воздействию, испытывают значительные стрессы, чаще болеют и утомляются, происходит постепенное снижение работоспособности и, в целом, снижается качество жизни. Безусловно, полностью исключить негативное воздействие вибрации, распространяющейся по грунтовому массиву от источника воздействия и, далее, по конструкциям здания непосредственно на ограждающие и несущие конструкции эксплуатируемых жилых и общественных помещений здания практически невозможно, но негативное влияние желательно и возможно ограничить. В настоящее время основным нормативным документом, регламентирующим на территории Российской Федерации максимально допустимые уровни вибрации в помещениях жилых, общественных зданий и на производстве является СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». Именно для удовлетворения требований данного нормативного документа и применяются, в основном, системы виброзащиты зданий. Известны различные способы гашения вибрационных воздействий, большинство из которых заключается в опирании основных несущих конструкций здания на различного рода упругие системы. В качестве упругих элементов чаще всего применяются резинометаллические виброизоляторы, пенополиуретановые маты, а также системы, основанные на пружинных сборках [14].

В практике отечественной виброзащиты наибольшее применение нашли системы, основанные на использовании резинометаллических виброизоляторов, устанавливаемые в конструкции зданий по методике д.т.н. М.А. Дашевского. Подробное изложение основ методики виброизоляции, осуществляемой по технологии "отсроченного монтажа", можно найти в книге [14]. Суть технологии отсроченного монтажа заключается в установке виброизоляторов в пределах специально устраиваемого "пояса виброзащиты", размещаемого в процессе проектирования и строительства здания чаще всего в уровне подвального этажа.

Пояс виброзащиты устраивается с использованием конструкций из монолитного железобетона и включает в себя специально оборудованные ниши для установки виброизоляторов. Уникальной особенностью метода М.А. Дашевского является установка виброизоляторов в уже возведенном до проектной отметки железобетонном каркасе здания до начала периода отделочных работ. В пределах пояса виброзащиты резинометаллические виброизоляторы сжимаются с использованием гидравлических домкратов, что позволяет точно повторить "эпюру действующих давлений" от веса здания, и, таким образом, избежать любых ошибок и неточностей, которые неизбежны при выполнении расчета здания. Технология "отсроченного монтажа" также позволяет осуществить замену вышедших из строя резинометаллических виброизоляторов с использованием их повторного монтажа.

Внешний вид установленного в проектное положение виброизолятора приводится на рисунке 1.

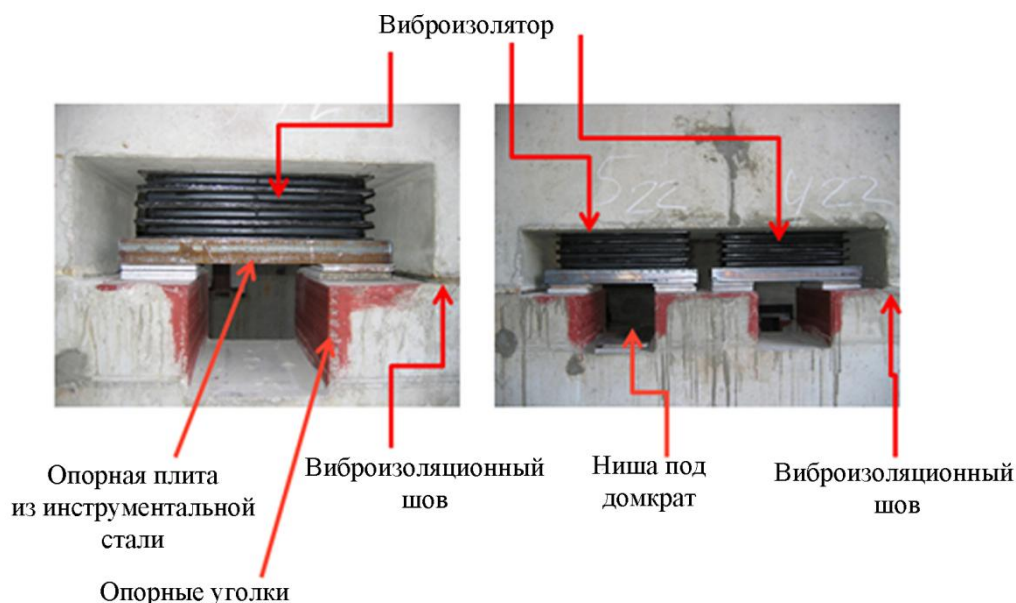


Рисунок 1 – Внешний вид установленного в проектное положение четырехслойного резинометаллического виброизолятора на одном из объектов в г. Москва

Несколько позднее на территории России началось применение систем виброизоляции строительных объектов с использованием полиуретановых матов. Данная технология менее требовательна к принимаемым проектным решениям, в меньшей степени затрагивает несущие конструкции здания, чем использование резинометаллических виброизоляторов, но требует установки полиуретановых матов уже в процессе строительства, то есть любые неточности в определении вертикальной нагрузки на конструкции здания в этом случае отразятся на равномерности осадки здания, расположенного на виброизолирующем слое; замена виброизолирующего подстилающего слоя также невозможна [14]. Аналогично, по незаменяемой схеме под зданиями устанавливаются и системы сейсмоизоляции, основанные на применении многослойных резино-металлических сейсмоизоляторов [15].

Несколько менее распространен в строительном комплексе России метод, основанный на применении сборок из стальных упругих пружин. Данный метод, обладая неоспоримым преимуществом – максимальной эффективностью виброизоляции, особенно в низком диапазоне частот воздействия, однако, является наиболее громоздким по принимаемым конструктивным решениям.

Далее в статье будет рассматриваться резинометаллический виброизолятор, как основной элемент виброзащиты объектов по технологии "отсроченного монтажа". До настоящего момента конструкции данных устройств не предполагала наличия перфораций,

размещаемых внутри виброизолирующего упругого резинового слоя, это объяснялось желанием сделать такое устройство наиболее компактным и позволяло при использовании многослойных виброизоляторов достичь практически любой требуемой эффективности виброзащиты. С целью повышения эффективности виброизоляционных работ и снижения их стоимости было предложено использовать виброизолирующие элементы с большей площадью боковой поверхности. Данный эффект достигается за счет внедрения в резиновые слои виброизоляторов необходимого числа отверстий. Рассматривается линейка однослойных резинометаллических виброизоляторов с размерами резинового слоя 450x350x40 мм, 450x300x40 мм, 450x350x30 мм, 450x250x30 мм, 450x150x30 мм, 450x480x40 мм и 450x480x30 мм, без отверстий, с одним отверстием диаметром 50 мм, а также с тремя-пятью отверстиями, из которых центральное отверстие обладает тем же диаметром, а отверстия, размещенные ближе к краям виброизолятора обладают меньшим диаметром 30 мм. Помимо однослойных образцов исследуются три трехслойных виброизолятора с тремя резиновыми пластинами размерами 450x480x30 мм с аналогичным размещением отверстий (один из трехслойных виброизоляторов также без отверстий). Все трехслойные виброизоляторы армированы стальными листами толщиной 4 мм, выходящими за пределы резиновых слоев на 20-30 мм. Стальные армирующие пластины в резинометаллических виброизоляторах жестко привулканизованы к резиновым слоям, что позволяет значительно повысить грузоподъемность и избежать явления неограниченного горизонтального смещения резиновых слоев при их статическом сжатии [16].

Вопросам распространения волн и оценке влияния вибрационного воздействия от движущихся составов метрополитена посвящена обширная литература [1-13], в большинстве случаев рассматриваются эмпирические зависимости, позволяющие учитывать затухание волнового процесса при распространении вибрации в грунте и последующее распространение колебаний по конструкциям здания. Наиболее полно вопрос прогноза уровней вибрации от воздействия движения поездов метрополитена представлен в СП 465.1325800.2019 "Здания и сооружения. Защита от вибрации метрополитена" и в СП 441.1325800.2019 "Защита зданий от вибрации, создаваемой железнодорожным транспортом", в том числе с учетом зарубежного опыта виброзащиты.

Однако в существующей литературе до текущего момента практически не рассматривалась проблема учета влияния перфорации резинового слоя резинометаллических виброизоляторов на ожидаемую эффективность виброзащиты и изменение грузоподъемности.

Модели и методы

В процессе исследования используется современный программный комплекс, реализующий метод конечного элемента. Все части резинометаллического виброизолятора (резиновые слои и стальные армирующие пластины) моделируются с использованием пространственных Solid конечных элементов. Исходя из известных рекомендаций по толщине каждого резинового слоя должно быть не менее 2-х-3-х слоев конечных элементов. При выполнении расчетов для резиновых пластин толщиной 30 мм принято три слоя пространственных конечных элементов, в то время как для пластин толщиной 40 мм принято четыре слоя конечных элементов. Для моделирования стальных пластин принято два слоя конечных элементов. В рамках допущения рассматриваемой задачи материал резиновых и армирующих слоев принят как линейно упругий. Резиновые слои приняты со следующими характеристиками: модуль упругости 5,0 МПа, коэффициент Пуассона 0,49.

При выполнении статического расчета осадка однослойных и трехслойных виброизоляторов принимается как 0,17 от первоначальной высоты резиновых слоев. Закрепления верхних и нижних узлов конечных элементов - жесткое, что в наибольшей степени соответствует условию совместной вулканизации резины и стальных пластин. Верхняя опорная плоскость виброизолятора перемещается на величину сжатия (в МКЭ модели задано вертикальное перемещение верхних узлов). Внешний вид характерных МКЭ моделей резинового слоя показан на рисунке 2.

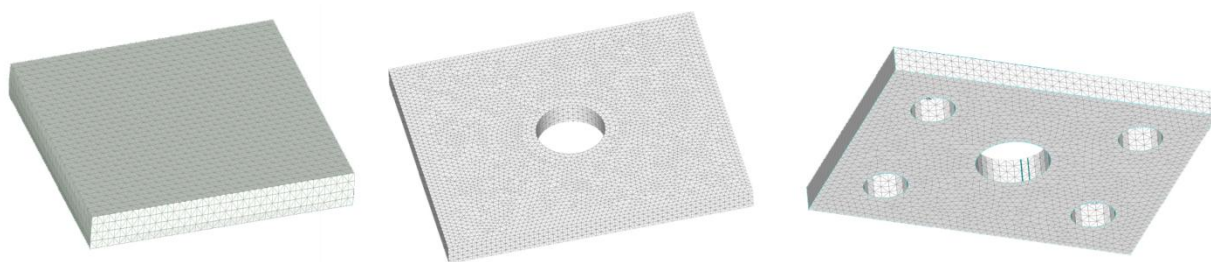


Рисунок 2 – Характерные конечно-элементные модели рассматриваемой линейки виброизоляторов (показаны модели, соответствующие резиновому слою 450x350x40 мм)

Аналогично рассмотрены три модели трехслойного резинометаллического виброизолятора с одной и пятью перфорациями. Внешний вид МКЭ моделей трехслойного виброизолятора показан на рисунке 3. Стальные армирующие слои не имеют перфораций в местах расположения отверстий в резиновых слоях. Следует отметить, что ряд работ [16], [17], [18] содержат описание результатов расчета однослойных резинометаллических виброизоляторов, выполненных методом конечного элемента, однако перфорированные и многослойные виброизоляторы ранее не рассматривались. В работе [19] приводится методика и результаты инженерного расчета резинометаллического виброизолятора по авторской методике М.А. Дашевского, в которой также рассматривается преимущественно однослойный виброизолятор.

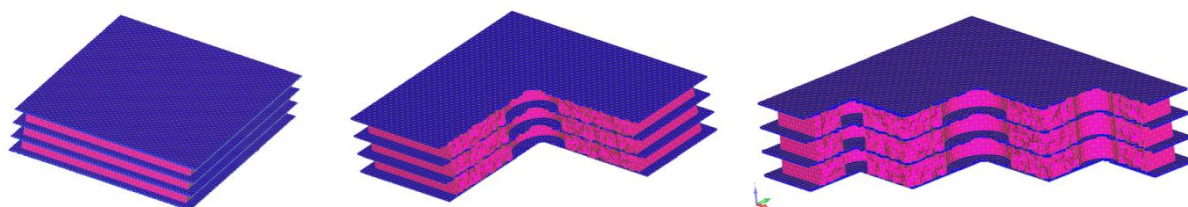


Рисунок 3 – Конечно-элементные модели трехслойных виброизоляторов (двух перфорированных и полнотелого)

Помимо статического расчета резинометаллических виброизоляторов было осуществлено определение собственных частот. Основное внимание уделялось вертикальной форме собственных колебаний, наиболее важной с точки зрения обеспечения виброзащитных свойств. С этой целью рассматривалась расчетная схема, представленная на следующем рисунке 4.

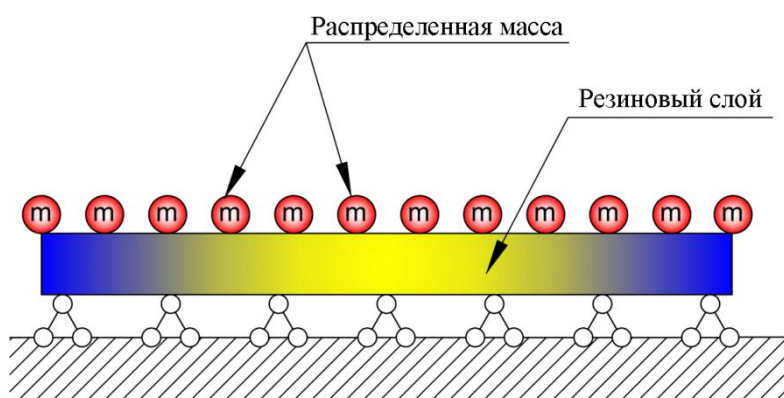


Рисунок 4 – Расчетная схема для определения собственных частот нагруженных резинометаллических виброизоляторов

Нижняя грань МКЭ модели виброизолятора при выполнении модального анализа была полностью закреплена от перемещений по трем направлениям, в то время как для верхней грани была оставлена одна степень свободы – возможность вертикального

перемещения. Для моделирования распределения массы по поверхности верхней грани возможны два способа. Первый способ заключается в создании на верхней грани виброизолятора пластинчатых конечных элементов, обладающих повышенной жесткостью (жесткость на несколько порядков больше жесткости резинового слоя на сжатие). Плотность данных конечных элементов должна быть подобрана таким образом, чтобы с учетом задаваемой толщины фиктивной пластинки смоделировать массу, приложенную к верхней грани (учитывает вес здания, действующий на виброизолятор). Второй способ задания распределенной по поверхности верхней грани виброизолятора массы заключается в использовании так называемых Rigid элементов, которые связывают степени свободы конечных элементов с одним произвольным узлом, к которому и прикладывается сосредоточенная масса. Согласно большинства рекомендаций [20], [21], [22] к конечно элементным программным комплексам наиболее предпочтительным является второй способ, так как позволяет избежать существования в рамках одной модели конечных элементов с сильно различающимися жесткостями, что может привести к численной неустойчивости. В статье приводятся данные, полученные с использованием Rigid элементов.

Результаты исследования и их анализ

После выполнения статического расчета линейки однослойных резинометаллических виброизоляторов без перфораций были получены грузоподъемности виброизоляторов, а последующий модальный анализ позволил получить значения первых собственных частот. Данные результатов расчетов приводятся в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчета для виброизоляторов без перфораций

№ п.п.	Размеры	Величина вертикальной реакции, тс.	Первая собственная частота, Гц
1	450х350х40 мм	108,01 тс	11,71 Гц
2	450х300х40 мм	84,19 тс	12,85 Гц
3	450х350х30 мм	114,04 тс	12,92 Гц
4	450х250х30 мм	67,10 тс	14,24 Гц
5	450х150х30 мм	26,32 тс	15,96 Гц
6	450х480х40 мм	122,67 тс	13,21 Гц
7	450х480х30 мм	128,45 тс	13,11 Гц

Обращает на себя внимание тот факт, что для большинства образцов внутри резинового слоя наблюдается наличие зоны, в которой материал находится в состоянии близком к всестороннему сжатию. Исключением из этого правила стал образец № 5 (размеры 450х150х30 мм), обладающий вытянутой формой и большим соотношением площади свободной боковой поверхности к площади опорных плоскостей. Данную ситуацию иллюстрирует приведенные на следующем рисунке 5 изополя напряжения сжатия, действующего на горизонтальных площадках верхней грани однослойного виброизолятора.

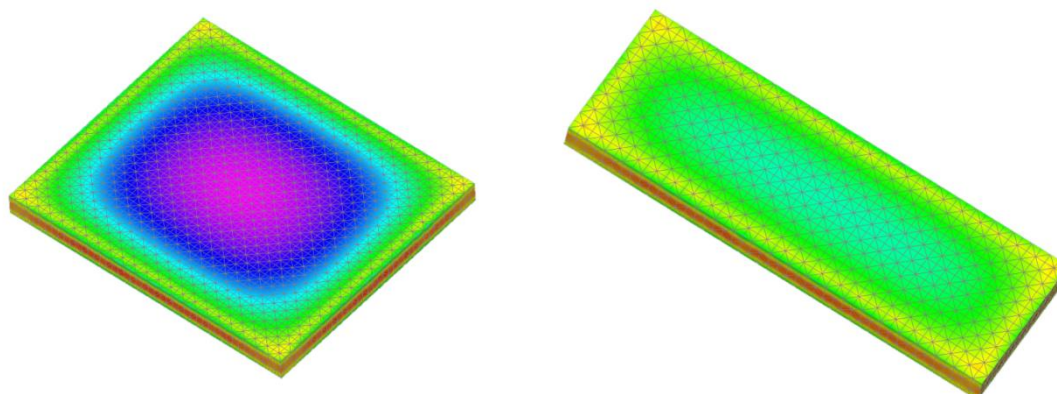


Рисунок 5 – Расположение зоны всестороннего сжатия внутри резинометаллических виброизоляторов с различными габаритами в плане

Найденные собственные частоты позволяют определить теоретическую эффективность виброзащиты по простейшей формуле [14], описывающей поведение одномассового осциллятора. Графики ожидаемой эффективности виброизоляции для виброизоляторов без перфораций приводятся на рисунке 6.

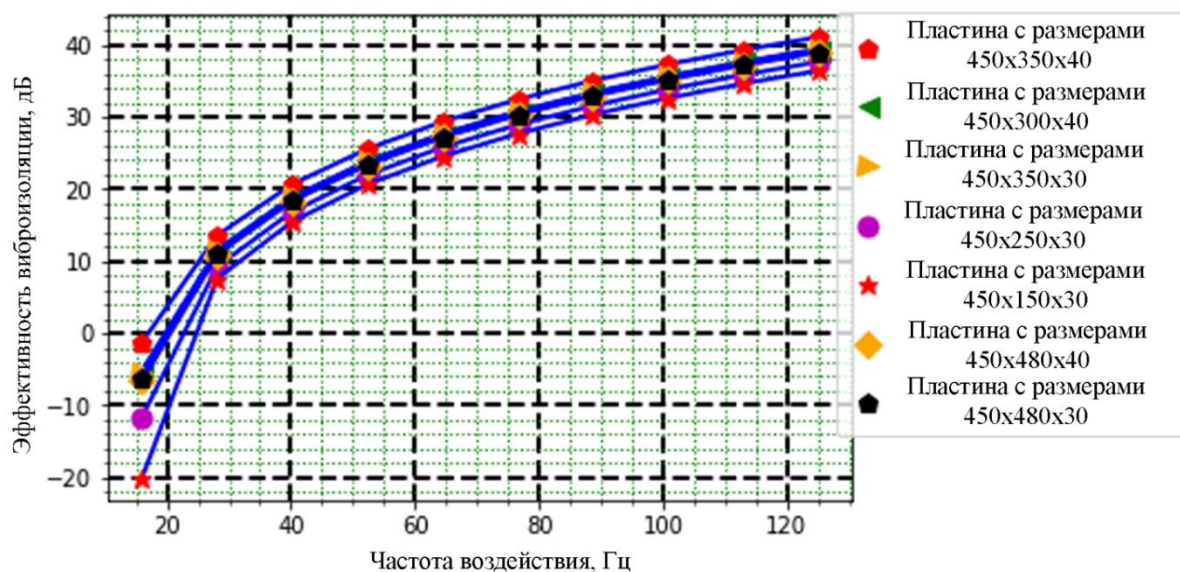


Рисунок 6 – Ожидаемая эффективность виброизоляции для полнотелых виброизоляторов для различных частот внешнего воздействия

Аналогично для заданной линейки однослойных виброизоляторов с перфорациями (одной по центру) и тремя-пяти были выполнены статические расчеты и определение первых собственных частот. Результаты расчетов приводятся в таблицах 2 и 3 соответственно.

Наличие перфораций значительно изменило картину распределения напряжений внутри виброизолятора, зона всестороннего сжатия уменьшилась и стала значительно менее выраженной (рисунки 7 и 8).

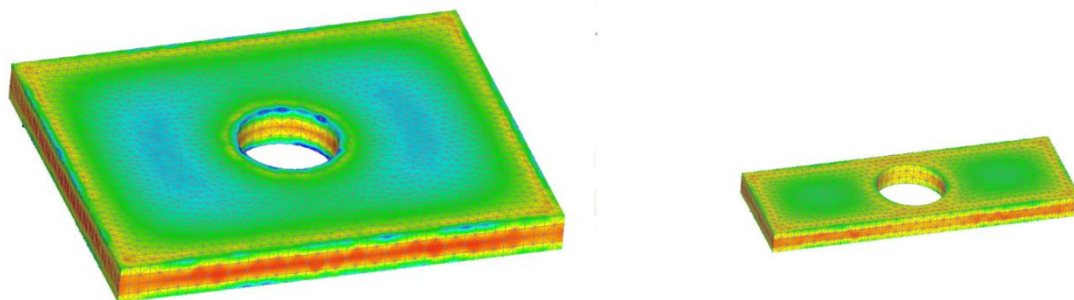


Рисунок 7 – Расположение зоны всестороннего сжатия для виброизоляторов с одним отверстием

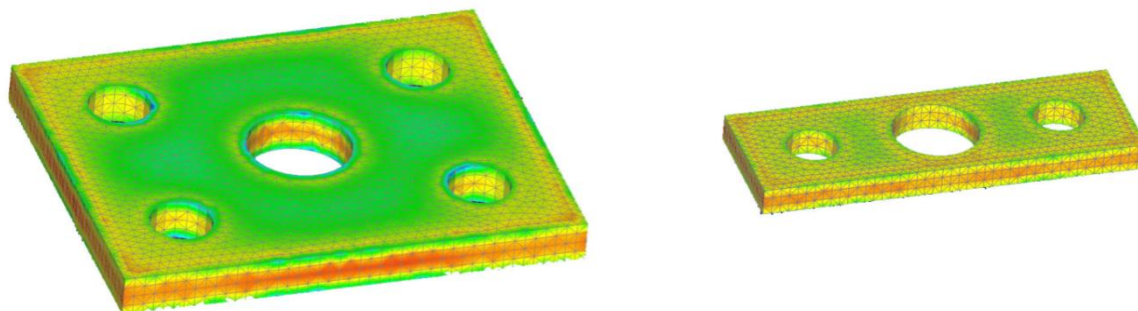


Рисунок 8 – Расположение зоны всестороннего сжатия для виброизоляторов с несколькими отверстиями

Таблица 2 – Результаты расчета для виброизоляторов с одной перфорацией

№ п.п.	Размеры	Величина вертикальной реакции, тс.	Первая собственная частота, Гц
1	450x350x40 мм	70,55 тс	8,31 Гц
2	450x300x40 мм	53,89 тс	6,16 Гц
3	450x350x30 мм	77,39 тс	7,41 Гц
4	450x250x30 мм	43,25 тс	7,35 Гц
5	450x150x30 мм	17,48 тс	7,31 Гц
6	450x480x40 мм	81,52 тс	6,12 Гц
7	450x480x30 мм	88,92 тс	7,37 Гц

Таблица 3 – Результаты расчета для виброизоляторов с тремя-пятью перфорациями

№ п.п.	Размеры	Величина вертикальной реакции, тс.	Первая собственная частота, Гц
1	450x350x40 мм	46,42 тс	6,16 Гц (пять отверстий)
2	450x300x40 мм	32,92 тс	6,16 Гц (пять отверстий)
3	450x350x30 мм	49,63 тс	7,31 Гц (пять отверстий)
4	450x250x30 мм	23,25 тс	7,28 Гц (пять отверстий)
5	450x150x30 мм	10,71 тс	7,28 Гц (три отверстия)
6	450x480x40 мм	55,70 тс	6,10 Гц (пять отверстий)
7	450x480x30 мм	59,73 тс	7,34 Гц (пять отверстий)

На следующих графиках показана зависимость несущей способности виброизолятора от величины свободной боковой поверхности резинового слоя, меняющейся за счет размещения отверстий. Как показано в работах [14], [19] важным параметром резинометаллического виброизолятора является так называемый "коэффициент формы", отражающий отношение свободной от закреплений и нагрузок боковой поверхности резинового слоя к общей площади боковой поверхности, в частности, данный параметр оказывает первостепенное влияние на величину грузоподъемности резинометаллического виброизолятора, так как резина является практически несжимаемым материалом (коэффициент Пуассона $\sim 0,49$). Следующие графики на рисунке 9 иллюстрируют данную зависимость для различных пластин.

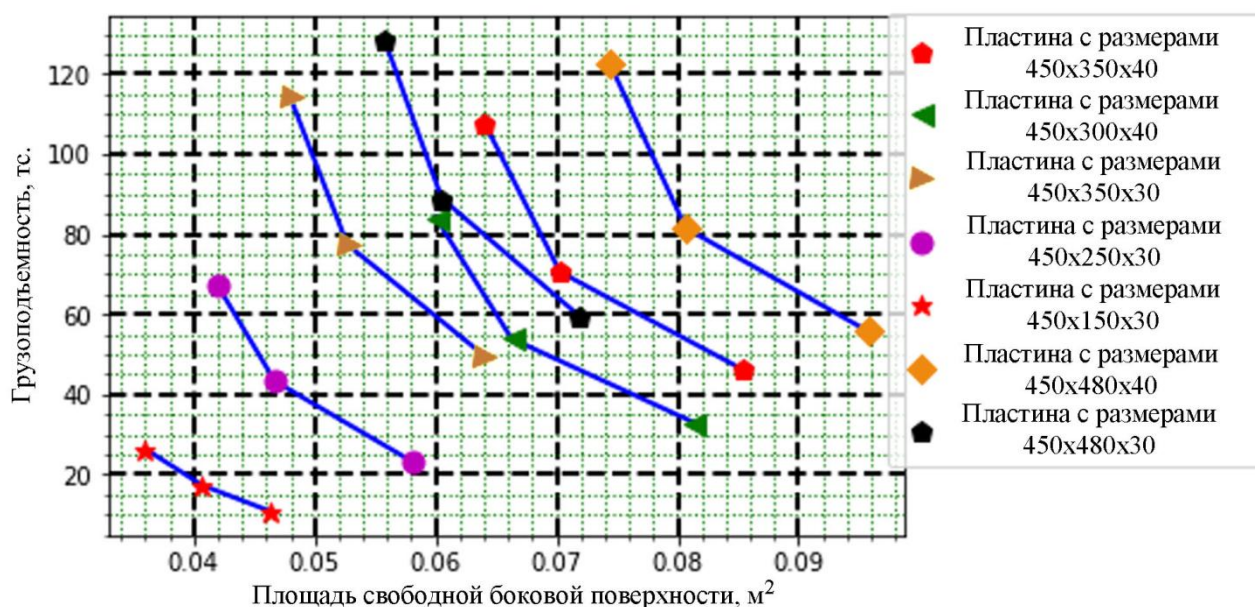


Рисунок 9 –Графики зависимости несущей способности виброизолятора от площади свободной поверхности

Также как и для виброизоляторов без отверстий, для перфорированных виброизоляторов возможно построить графики теоретической эффективности виброзащиты, рассматривая простейшую модель одномассового осциллятора (см. рисунок 10 и рисунок 11). Характерно, что при увеличении площади боковой поверхности перфораций в резиновых слоях эффективность виброизоляции системы в меньшей степени зависит от конкретной геометрии контура резинового слоя, в большей степени эффективность виброзащиты зависит именно от суммарной площади боковой поверхности резинового слоя, этим и объясняется качественное отличие графиков на рисунке 10 и рисунке 11 (большой разброс ожидаемой теоретической эффективности системы виброизоляции, основанной на применении виброизоляторов с одним отверстием по сравнению с виброизоляторами со многими отверстиями).

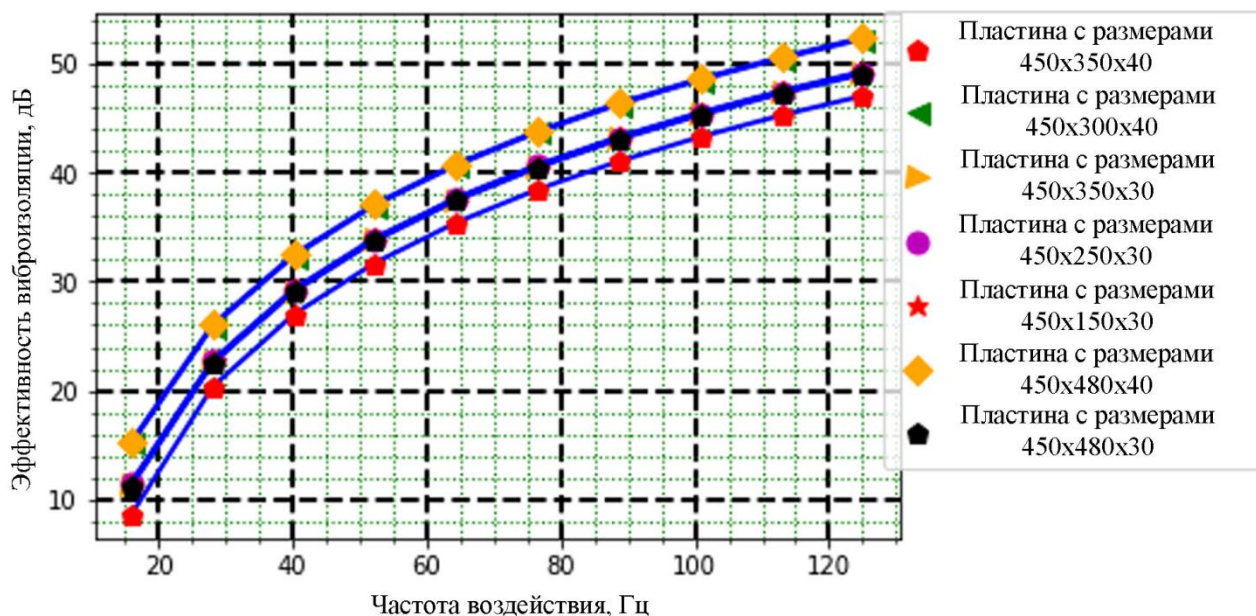


Рисунок 10 – Ожидаемая эффективность виброизоляции для виброизоляторов с одним центральным отверстием для различных частот внешнего воздействия

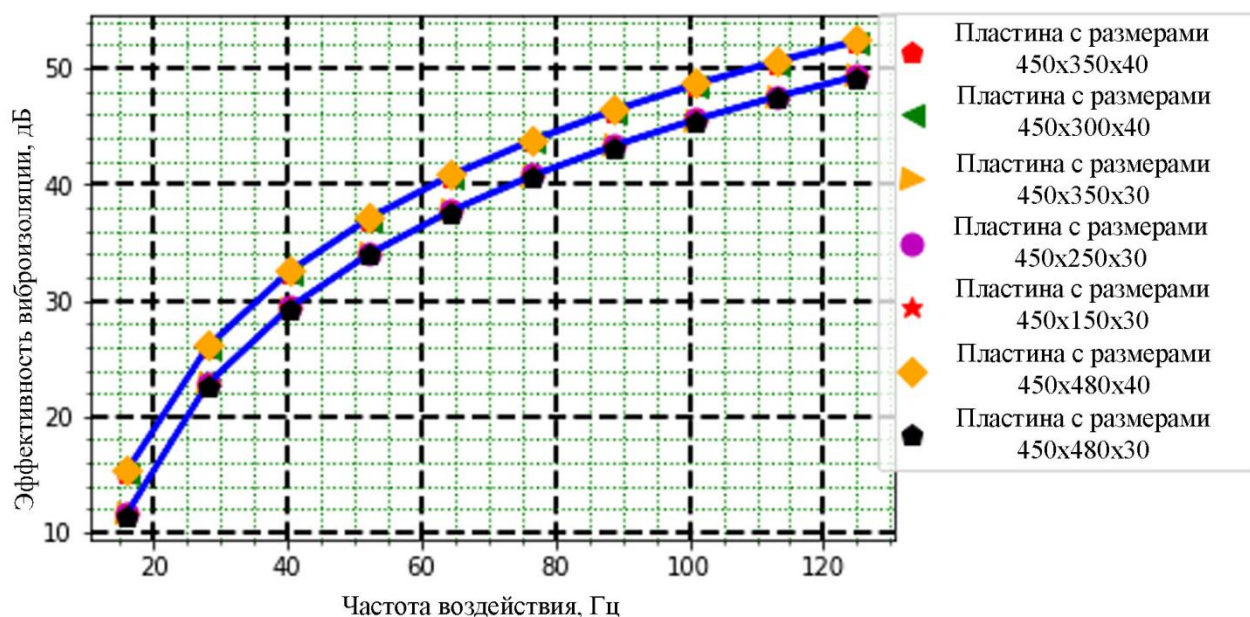


Рисунок 11 – Ожидаемая эффективность виброизоляции для виброизоляторов с несколькими (3 и 5) отверстиями для различных частот внешнего воздействия

Для трехслойного виброизолятора с отверстиями и без, также были получены значения несущей способности и значения собственных частот (рисунок 12). Данные этих расчетов приводятся в таблице 4. Использование программного комплекса, реализующего МКЭ в случае расчета трехслойного виброизолятора, особенно при наличии отверстий позволяет более полно описать напряженно-деформированное состояние и дополнить результаты, которые возможно получить с использованием методики, изложенной в [14] и [19].

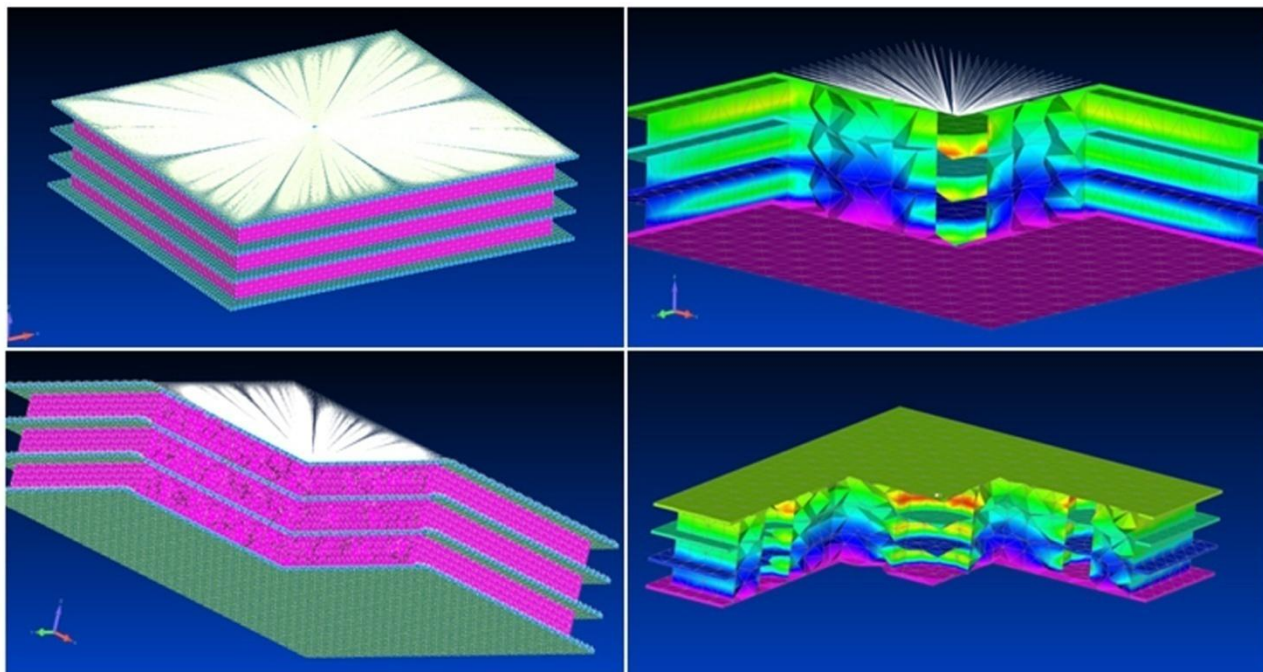


Рисунок 12 –Конечно-элементные модели трехслойного виброизолятора с Rigid элементами (независимый узел Rigid элемента соединен с элементом массы)

Таблица 4 – Результаты расчета многослойного виброизолятора

№ п.п.	Размеры	Величина вертикальной реакции, тс.	Первая собственная частота, Гц
1	Три пластины 450х480х30 мм без отверстий	4,44 Гц	128,45 тс
2	Три пластины 450х480х30 мм с одним отверстием по центру	4,37 Гц	88,92 тс
3	Три пластины 450х480х30 мм с одним отверстием по центру и 4-мя в углах	4,37 Гц	59,73 тс

Выводы

Для однослойного виброизолятора наличие одного отверстия, расположенного по центру зоны всестороннего сжатия приводит к значительному снижению грузоподъемности (в среднем на 30 %).

1. Наличие нескольких (3-5-ть) отверстий приводит к еще более значительному снижению грузоподъемности (в среднем на 50 %).

2. Для однослойного виброизолятора наличие одного отверстия повышает эффективность виброизоляции в октавной полосе 31,5 Гц в среднем на 10-11 дБ.

3. Наличие дополнительных отверстий, размещенных ближе к краю резинового слоя не приводит к большему увеличению эффективности. Наблюдается лишь значительное уменьшение несущей способности.

4. В многослойном виброизоляторе наличие, либо отсутствие отверстий сказывается в незначительной степени на эффективности работы системы виброизоляции, однако наличие отверстий, так же как и в однослойном варианте приводит к существенному сокращению несущей способности. Возможным путем преодоления данной ситуации является работа резиновых слоев в многослойных виброизоляторах при значительно больших относительных деформациях сжатия, а также использование однослойных виброизоляторов с перфорациями, но обладающими большей толщиной резинового слоя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дашевский М.А., Ковальчук О.А., Мондрус В.Л. Влияние поездного состава метрополитена на поведение крупнопанельных зданий повышенной этажности // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений (ССБС). 2004. № 3. С. 40-43.
2. Дашевский М.А., Моторин В.В., Акимова И.В. Формирование напряжённого состояния виброизолируемого здания в процессе монтажа резинометаллических виброизоляторов // Москва. Вестник МГСУ. 2015. № 12. С. 25-33.
3. Liu W.N., M.Ma, Metro Train Induced Environmental Vibrations: Prediction, Evaluation and Control // Science Press, Beijing, China. 2013. Pp. 615-626. doi:10.1007/978-981-15-2349-6_38
4. Fang L., Yao J., Xia H. Prediction on soil-ground vibration induced by high-speed moving train based on artificial neural network model // Advances in Mechanical Engineering. 2019. Vol. 11. No. 5. doi:10.1177/1687814019847290 journals.sagepub.com/home/ade
5. Tao Sheng, Gan-bin Liu, Xuecheng Bian, Wei-xing Shi, Yue Chen, Development of a three-directional vibration isolator for buildings subject to metro- and earthquake-induced vibrations // Engineering Structures. 2022. Vol. 252. 113576, ISSN 0141-0296
6. Yang, Jianjin, Shengyang Zhu, Wanming Zhai, Georges Kouroussis, Yue Wang, Kaiyun Wang, Kai Lan, Fangzheng Xu, Prediction and mitigation of train-induced vibrations of large-scale building constructed on subway tunnel // Science of The Total Environment. 2021. Vol. 668. Pp. 485-499.
7. Sheng X., Jones C.J.C., Thompson D.J. Prediction of ground vibration from trains using the wavenumber finite and boundary element methods // Journal of Sound and Vibration. 2006. Vol. 293. No. 3-5. Pp. 575-586.
8. Мондрус В.Л., Хуэн Л.Т.Т., Сизов Д.К. Распределение амплитуд виброускорений в многоэтажном административном здании от источников техногенного происхождения // Вестник МГСУ. 2010. № 1. С. 113-116.
9. Волков А.В., Калашникова Н.К., Курнавин С.А., Веретина И.А. Виброзащита зданий, расположенных вблизи линий метрополитена. [Электронный ресурс]. <http://www.mukhin.ru/stroysovet/funds/35.html> (дата обращения: 24.07.2023).
10. Дашевский М.А., Моторин В.В., Мамажанов М.А. Виброзащита крупнопанельных зданий // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2004. № 10. [Электронный ресурс]. <https://cyberleninka.ru/article/n/kontseptsiya-vibrozaschity-zdaniy-i-sooruzheniy-v-pole-stroitelnyh-normativov-rf/viewer> (дата обращения: 24.07.2023).
11. Trifunac M.D., Ivanovic S.S., Todorovska M.I. Wave propagation in a seven-story reinforced concrete building: III Damage detection via changes in wavenumbers // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2003. Vol. 23. Iss. 1. Pp. 65-75.
12. Mickaitis M., Stauskis V.J. Vibration transmission through joints of walls and columns in frame buildings // Journal of civil engineering and management. 2005. Vol. XI. No. 3. Pp. 185-191.
13. Алявдин П.В., Музычкин Ю.А. Вибрация конструкций каркасного здания, вызванная движением поездов метрополитена // Вестник Белорусского национального технического университета: научно-технический журнал. 2011. № 2. С. 5-9.
14. Дашевский М.А., Мондрус В.В., Моторин В.В., Сизов Д.К. Виброзащита зданий Москва: Из-во ООО «Сам Полиграфист», 2021. 252 с.
15. Мондрус В.Л., Сизов Д.К., Хуэн Л.Т.Т. Снижение уровня сейсмического воздействия при движении грунта основания с использованием сейсмоизоляторов // Строительные материалы, оборудование, технологии XIX века. 2011. № 1(144). С. 48-49.
16. Балакин П.Д., Красотина Л.В., Кривцов А.В. Моделирование работы резинометаллического виброизолятора // Омск: Омский научный вестник. 2016. № 3 (147). С. 5-9.
17. Федорова А.С. Расчет систем виброизоляции в том числе с нелинейными характеристиками // Дни студенческой науки Сборник докладов научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ студентов института строительства и архитектуры НИУ МГСУ (13-17 марта 2017). 2017. С. 871-874. ISBN 978-5-7264-1604-5.

18. Zhixing Li, Jingjun Lou, Shijian Zhu and Simi Tang, Simulation on performance of rubber isolator based on ANSYS, 2011 // Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, Inner Mongolia, China, 2011. Pp. 1608-1611. doi:10.1109/MACE.2011.5987260
19. Дашевский М.А. Инженерный метод нелинейного расчета резинометаллических виброизоляторов для зданий // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2006. № 6. С. 37-41.
20. Шимкович Д.Г. Расчет конструкций в MSC/Nastran for Windows. Москва: ДМК Пресс, 2003. 448 с.
21. Басов К.А. ANSYS Справочник пользователя. Москва: ДМК Пресс, 2014. 640 с.
22. Басов К.А. ANSYS В примерах и задачах. Москва: КомпьютерПресс, 2002. 224 с.

REFERENCES

1. Dashevskyy M.A., Koval'chuk O.A., Mondrus V.L Vliyanie poyezdnogo sostava metropolitena na povedeniye krupnopanel'nykh zdaniy povyshennoy etazhnosti [The Influence of the Subway Train Composition on the Behavior of Large-Panel High-Rise Buildings] // Seysmostoykoye stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzheniy (SSBS). 2004. No. 3. Pp. 40-43. (rus).
2. Dashevskiy M.A., Motorin V.V., Akimova I.V. Formirovaniye napryazhonnogo sostoyaniya vibroizoliruyemogo zdaniya v protsesse montazha rezinometallicheskiykh vibroizolyatorov [Formation of a stressed state of a vibration-insulated building during the installation of rubber-metal vibration isolators] Vestnik MGSU. 2015. No. 12. Pp.25-33. (rus).
3. Liu W.N., M. Ma, Metro Train Induced Environmental Vibrations: Prediction, Evaluation and Control // Science Press, Beijing, China. 2013. Pp. 615-626. doi:10.1007/978-981-15-2349-6_38
4. Fang L., Yao J., Xia H. Prediction on soil-ground vibration induced by high-speed moving train based on artificial neural network model // Advances in Mechanical Engineering, 2019. Vol. 11. No. 5. doi:10.1177/1687814019847290 journals.sagepub.com/home/ade
5. Tao Sheng, Gan-bin Liu, XuechengBian, Wei-xing Shi, Yue Chen, Development of a three-directional vibration isolator for buildings subject to metro- and earthquake-induced vibrations // Engineering Structures. 2022. Vol. 252. 113576, ISSN 0141-0296
6. Yang, Jianjin , Shengyang Zhu, Wanming Zhai, Georges Kouroussis, Yue Wang, Kaiyun Wang, Kai Lan, Fangzheng Xu, Prediction and mitigation of train-induced vibrations of large-scale building constructed on subway tunnel // Science of The Total Environment. 2021. Vol. 668. Pp. 485-499.
7. Sheng X., Jones C.J.C., Thompson D.J. Prediction of ground vibration from trains using the wavenumber finite and boundary element methods // Journal of Sound and Vibration. 2006. Vol. 293. No. 3-5. Pp. 575-586.
8. Mondrus V.L., Khuen L.T.T., Sizov D.K. Raspredeleniye amplitud vibroshkolebeniy v mnogoetazhnom administrativnom zdanii ot istochnikov tekhnogennogo proiskhozhdeniya [Distribution of amplitudes of vibration accelerations in a multi-storey administrative building from sources of technogenic origin] Vestnik MGSU. 2010. No. 1. Pp. 113-116. (rus).
9. Volkov A.V., Kalashnikova N.K., Kurnavin S.A., Veretina I.A. Vibrozashchita zdaniy, raspolozhennykh vblizi liniy metropolitena [Vibration protection of buildings located near metro lines]. [Online]. <http://www.mukhin.ru/stroysovet/funds/35.html> (date of application: 24.07.2023). (rus).
10. Dashevskiy M.A., Motorin V.V., Mamazhanov M.A. Vibrozashchita krupnopanel'nykh zdaniy. [Vibration protection of large-panel buildings] // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2004. No. 10. [Online]. <https://cyberleninka.ru/article/n/kontseptsiya-vibrozaschity-zdaniy-i-sooruzheniy-v-polestroitelnyh-normativov-rf/viewer> (date of application: 24.07.2023). (rus).
11. Trifunac M.D., Ivanovic S.S., Todorovska M.I. Wave propagation in a seven-story reinforced concrete building: III Damage detection via changes in wavenumbers // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2003. Vol.23. Iss. 1. Pp. 65-75.
12. Mickaitis M., Stauskis V.J. Vibration transmission through joints of walls and columns in frame buildings // Journal of civil engineering and management. 2005. Vol. XI. No. 3. Pp. 185-191.
13. Alyavdin P.V., Muzychkin YU.A. Vibratsiya konstruktivnykh karkasnykh zdaniy, vyzvannaya dvizheniyem poyezdov metropolitena [Vibration of frame building structures caused by the movement of subway trains] Vestnik Belorusskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta : nauchno-tekhnicheskii zhurnal. 2011. No. 2. Pp. 5-9. (rus).
14. Dashevskiy M.A., Mondrus V.V., Motorin V.V., Sizov D.K.. Vibrozashchita zdaniy [Vibration protection of buildings]. Moscow: Iz-vo LLC «Sam Poligrafist», 2021. 252 p.
15. Mondrus V.L., Sizov D.K., Khuen L.T.T. Snizheniye urovnya seysmicheskogo vozdeystviya pri dvizhenii grunta osnovaniya s ispol'zovaniyem seismoizolyatorov [Reducing the level of seismic impact during the movement of the foundation soil using seismic isolators] Stroitel'nyye materialy, oborudovaniye, tekhnologii XIX veka. 2011. No. 1(144). Pp. 48-49. (rus).
16. Balakin P.D., Krasotina L.V., Krivtsov A.V. Modelirovaniye raboty rezinometallicheskogo vibroizolyatora [Modeling the operation of a rubber-metal vibration isolator] Omskiy nauchnyy vestnik. 2016. No. 3 (147). Pp. 5-9.

17. Fedorova A.S. Raschet sistem vibroizolyatsii v tom chisle s nelineynymi kharakteristikami [Calculation of vibration isolation systems, including those with non-linear characteristics] // Dni studencheskoy nauki Sbornik dokladov nauchno-tehnicheskoy konferentsii po itogam nauchno-issledovatel'skikh rabot studentov instituta stroitel'stva i arkhitektury NIU MGSU (13-17 marta 2017). 2017. Pp. 871-874. ISBN 978-5-7264-1604-5. (rus).
18. Zhixing Li, Jingjun Lou, Shijian Zhu and Simi Tang, Simulation on performance of rubber isolator based on ANSYS, 2011 // Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, Inner Mongolia, China. 2011. Pp. 1608-1611. doi:10.1109/MACE.2011.5987260
19. Dashevskiy M.A. Inzhenernyy metod nelineynogo rascheta rezinometallicheskich vibroizolyatorov dlya zdaniy [Engineering method for non-linear calculation of rubber-metal vibration isolators for buildings] Seysmostoykoye stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzheniy. 2006. No. 6. Pp. 37-41. (rus).
20. Shimkovich D.G. Raschet konstruktsiy v MSC/Nastran for Windows. [Structural Analysis in MSC/Nastran for Windows] Moscow: DMK Press, 2003. 448 p. (rus).
21. Basov K.A. ANSYS Spravochnik pol'zovatelya [ANSYS User Manual]. Moscow: DMK Press. 2014. 640 p. (rus).
22. Basov K.A. ANSYS V primerakh i zadachakh. [ANSYS In examples and tasks] Moscow: ComputerPress. 2002. 224 p. (rus).

Информация об авторах:

Мондрус Владимир Львович

НИУ МГСУ «Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия, доктор технических наук, член-корр. РААСН, заведующий кафедрой «Строительная и теоретическая механика», и.о. президента Eurasian SEISMO Association (EASA).

E-mail: mondrus@mail.ru

Сизов Дмитрий Константинович

НИУ МГСУ «Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительная и теоретическая механика».

E-mail: newfff@mail.ru

Акимова Ирина Валерьевна

ООО «ВИБРОСЕЙСМОЗАЩИТА», г. Москва, Россия, ведущий инженер.

E-mail: vibroprotect@mail.ru

Information about authors:

Mondrus Vladimir L.

NRU MGSU «Moscow State Construction University», Moscow, Russia, Professor, Corresponding Member RAASN, Head of the Department of Construction and Theoretical Mechanics, NRU MGSU, acting President of the Eurasian SEISMO Association (EASA).

E-mail: mondrus@mail.ru

Sizov Dmitry K.

NRU MGSU «Moscow State Construction University», Moscow, Russia, candidate of technical science, associate professor of the department of Construction and Theoretical Mechanics.

E-mail: newfff@mail.ru

Akimova Irina V.

LLC "VIBROSEISMOZASCHITA", Moscow, Russia, leading engineer.

E-mail: vibroprotect@mail.ru

А.Г. ТАМРАЗЯН¹, Й.А.К. САЙЕД¹¹ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)», г. Москва, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ МОМЕНТОВ В СТАТИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛИМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛКАХ

Аннотация. В данной статье исследуется коэффициент перераспределения моментов в статически неопределимых железобетонных балках через экспериментальный и аналитический подход. Были испытаны на изгиб двухпролетные статически неопределимые железобетонные балки. Было проведено обсуждение результатов определения схемы разрушения, диаграммы прогиб-нагрузка, деформация-нагрузка и коэффициентов перераспределения моментов. Экспериментальные результаты были сравнены с аналитическими расчетами существующих моделей, включая нормы ACI 318-19 и CSA A23.3-19, и другие. Результаты показывают, что коэффициент перераспределения моментов в статически неопределимых железобетонных балках зависит от коэффициента армирования (μ_{sl}) и может быть более точно предсказан комплексным анализом. Результаты экспериментов также показывают, что коэффициенты перераспределения моментов испытанных балок превышают значения, предсказанные другими существующими моделями.

Ключевые слова: статически неопределимые железобетонные балки, перераспределение моментов, экспериментальное исследование, теоретические модели, коэффициент армирования.

A.G. TAMRAZYAN¹, Y.A.K. SAYED¹¹Moscow State University of Civil Engineering (MGSU) National Research University, Moscow, Russia

EXPERIMENTAL STUDY OF THE COEFFICIENT OF MOMENT REDISTRIBUTION IN STATICALLY INDETERMINATE RC BEAMS

Abstract. This article investigates the coefficient of moments redistribution in statically indeterminate RC beams through an experimental and analytical approach. Two-span statically indeterminate RC beams were tested under bending moment. A discussion of the results of the mode of failure, load-deformation, load-strain, and the coefficient of the moments redistribution were conducted. Moreover, the experimental results were compared to the analytical predictions of the related existing models, including the ACI 318-19 and CSA A23.3-19 codes, and others. The results show that the coefficient of moment redistribution is affected by the reinforcement ratio (μ_{sl}) and can be accurately predicted by a recent mathematical analysis. The experimental results also reveal that the moment redistribution capacity of the beams exceeds the values predicted by the other existing models.

Keywords: statically indeterminate RC beams, moment redistribution, experimental investigation, theoretical existing models, reinforcement ratio.

Введение

Статически неопределимые железобетонные балки широко используются в строительстве благодаря их способности выдерживать большие нагрузки и иметь более длинные пролеты, чем их определяемые аналоги. Однако расчет коэффициента перераспределения моментов, который необходим для проектирования этих балок, остается сложной задачей. Существующие модели для прогнозирования коэффициента перераспределения моментов

© Тамразян А.Г., Сайед Й.А.К., 2023

имеют свои ограничения, и требуются новые экспериментальные исследования для дальнейшего улучшения точности этих моделей [1-5]. В данном исследовании проведено экспериментальное исследование статически неопределимых железобетонных балок для получения новых результатов коэффициента перераспределения моментов. Цель данной работы - оценить существующие модели и сравнить их с новыми экспериментальными результатами. Результаты этого исследования внесут свой вклад в разработку более точных моделей для прогнозирования коэффициента перераспределения моментов в железобетонных балках, и в конечном итоге повысят безопасность и эффективность проектирования железобетонных балок.

Коэффициент перераспределения моментов является важным параметром в проектировании статически неопределимых железобетонных балок. Он представляет собой степень возможности балки передавать моменты от переармированных сечений к недостаточно армированным сечениям, что увеличивает несущую способность и пластичность конструкции. Несколько исследователей изучали коэффициент перераспределения моментов в железобетонных балках [2-8]. Некоторые из часто используемых моделей для прогнозирования коэффициента перераспределения моментов включают нормы ACI 318, Еврокод и модельный стандарт *fib*, а также работы [12-19]. Однако большинство из этих моделей имеют ограничения, особенно при применении к балкам с разной геометрией или не призматическими поперечными сечениями [20]. В таблице 1 приведены некоторые из существующих моделей в стандартах проектирования и модели, а также данные исследователей. Все сокращения указаны в [20].

В последние годы несколько исследователей провели экспериментальные исследования коэффициента перераспределения моментов в железобетонных балках [6-11]. Например, Scott and Whittle (2005) [7] провели экспериментальное исследование железобетонных балок для изучения влияния соотношения поперечной арматуры к продольной на коэффициент перераспределения моментов. Результаты показали, что увеличение соотношения (A_{s1}/A_{s2}) изменяет жесткость вдоль балки и, следовательно, перераспределение моментов уменьшается. Аналогично, Li et al. (2019) [11] провели экспериментальное исследование железобетонных балок и рам с различными классами бетона, количеством и свойствами арматурной стали и обнаружили, что существующие модели в стандартах недооценивают коэффициент перераспределения моментов.

Эти исследования подчеркивают необходимость дальнейших экспериментальных исследований для повышения точности существующих моделей, для прогнозирования коэффициента перераспределения моментов в железобетонных балках. В данной статье сделана попытка внести свой вклад в это усилие, проведя экспериментальное исследование на статически неопределимых железобетонных балках и сравнив полученные результаты с существующими моделями.

Таблица 1 – Коэффициенты перераспределения моментов

Стандарты проектирования или исследование	Определение коэффициентов перераспределения моментов	Ограничения
----	$\beta_{\text{эксп.}} = \frac{M_E - M_{\text{act}}}{M_E}$	$0,00 \leq \beta_{\text{эксп.}} \leq 1,00$
ACI 318-19 [12]	$\beta_{\text{рассч.}} (\%) \leq 1000 \varepsilon_t$	$\varepsilon_t \leq 0,0075$ $\beta_{\text{рассч.}} \leq 20\%$
CSA A23.3-19 [13]	$\beta_{\text{рассч.}} (\%) \leq 30 - 50 (x/h_o)$	$\beta_{\text{рассч.}} \leq 20\%$

AS 3600:2018 [14]	$\beta_{\text{расч.}} = \begin{cases} 30\% & x/h_o \leq 0,2 \\ (30 - 75 x/h_o)\% & 0,2 < x/h_o \leq 0,4 \\ 0 & x/h_o > 0,4 \end{cases}$		
BS 8110:1997 [15]	$\beta_{\text{расч.}} \leq 0,6 - (x/h_o)$	$\beta_{\text{расч.}} \leq 0,3$	
DIN 1045-1 [16]	$\beta_{\text{расч.}} \leq 0,36 - 0,8 (x/h_o) \Rightarrow \text{для } f'_c \geq 50 \text{ МПа}$	$\beta_{\text{расч.}} \leq 0,3$	Высокая пластичность
	$\beta_{\text{расч.}} \leq 0,28 - 0,8 (x/h_o) \Rightarrow \text{для } f'_c \leq 55 \text{ МПа и легкийбетон}$	$\beta_{\text{расч.}} \leq 0,2$	
	$\beta_{\text{расч.}} \leq 0,36 - 0,8 (x/h_o) \Rightarrow \text{для } f'_c \geq 55 \text{ МПа}$	$\beta_{\text{расч.}} \leq 0,15$	Нормальная пластичность
	$\beta_{\text{расч.}} \leq 0,28 - 0,8 (x/h_o) \Rightarrow \text{для } f'_c \leq 55 \text{ МПа и легкийбетон}$	$\beta_{\text{расч.}} \leq 0,00$	
	Высокая пластичность: $(R_{su}/R_{sy})_k \geq 1,08; \varepsilon_{uk} \geq 5,0\%$ Нормальная пластичность: $(R_{su}/R_{sy})_k \geq 1,05; \varepsilon_{uk} \geq 2,5\%$		
fib Model Code 2010 & Eurocode 2 [17,18]	$\beta_{\text{расч.}} \leq 0,56 - 1,25 (0,6 + 0,0014/\varepsilon_{cu2})(x/h_o) \Rightarrow \text{для } f'_c \leq 50 \text{ МПа}$ $\beta_{\text{расч.}} \leq 0,46 - 1,25 (0,6 + 0,0014/\varepsilon_{cu2})(x/h_o) \Rightarrow \text{для } f'_c > 50 \text{ МПа}$	$\beta_{\text{расч.}} \leq 0,3$	Для класса В, С или D
	$\beta_{\text{расч.}} \leq 0,56 - 1,25 (0,6 + 0,0014/\varepsilon_{cu2})(x/h_o) \Rightarrow \text{для } f'_c \leq 50 \text{ МПа}$ $\beta_{\text{расч.}} \leq 0,46 - 1,25 (0,6 + 0,0014/\varepsilon_{cu2})(x/h_o) \Rightarrow \text{для } f'_c > 50 \text{ МПа}$	$\beta_{\text{расч.}} \leq 0,2$	Класс А
	КлассА : $(R_{su}/R_{sy})_k \geq 1,05; \varepsilon_{uk} \geq 2,0\%$;		
	КлассВ : $(R_{su}/R_{sy})_k \geq 1,08; \varepsilon_{uk} \geq 5,0\%$;		
	КлассС : $1,15 \leq (R_{su}/R_{sy})_k \leq 1,35; \varepsilon_{uk} \geq 7,5\%$;		
	КлассD : $1,25 \leq (R_{su}/R_{sy})_k \leq 1,45; \varepsilon_{uk} \geq 8,0\%$		
$\varepsilon_{uc2} = 0,0035 \text{ когда } f'_c \leq 50 \text{ МПа}$ $\varepsilon_{uc2} / 1000 = 2,6 + 35 [((90 - f'_c)/100)]^4 \text{ когда } f'_c > 50 \text{ МПа}$			
do Carmo and Lopes (2005) [6]	$\beta_{\text{расч.}} (\%) = 47 - 114 x/h_o$		
Tamrazyan and Sayed (2022) [5]	$\beta_{\text{расч.}} = \left(0,001 \frac{R_{sy}}{f'_c} + 0,05(\omega_w \%) + 0,0035 L/h \right) - \left(0,74 x/h_o + 0,13 \frac{\mu_{s1}}{\mu_{s2}} \right) + 0,4612$		
Aydogan et al. (2023) [19]	$\beta_{\text{расч.}} (\%) = \left(\frac{\mu_{s1} \%}{x/h_o} - (x/h_o) - 6,45 \right) \left(\frac{\mu_{s1} \% (x/h_o)}{0,34 - (\mu_{s1}/\mu_{s2})} \right) - \left(\frac{(\mu_{s1} \%)}{1,21(\mu_{s1} \% - (\mu_{s1}/\mu_{s2})^2)} \right) + \left(\frac{0,81 - x/h_o + 2,81\mu_{s1} \%}{\mu_{s1} \% \left(\frac{\mu_{s1}/\mu_{s2}}{0,85f'_c} \right)^{\frac{1}{2}}} \right)$		

Экспериментальная программа

Для экспериментальной программы были изготовлены две двухпролетные железобетонные балки с размерами 120 x 150 x 2150 мм. Бетон, класса В20. Геометрия и армирование балок, а также конструкция опор и нагрузки показаны на рисунке 1. Балки были симметрично армированы двумя стержнями диаметром 12 мм сверху и снизу, а также закрытыми хомутами диаметром 6 мм, расположенными на расстоянии 75 мм и 150 мм друг от друга, чтобы предотвратить разрушение железобетонных балок при сдвиге.

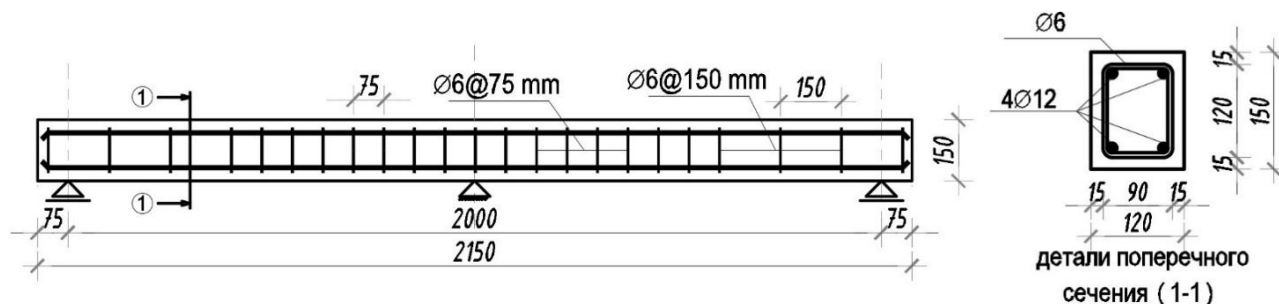


Рисунок 1 – Детали экспериментальной балки

Свойства материала

Были проведены испытания на одноосное сжатие бетонных кубов (100 х 100 х 100 мм). Средняя прочность бетонного куба на 28-й день испытаний (F_{cu}) составила 24,6 МПа. Кроме того, были проведены испытания на одноосное сжатие бетонных призм размером 100 х 100 х 400 мм. На каждую грань каждого образца-призмы были установлены два электрических деформационных датчика, чтобы измерить вертикальные и горизонтальные деформации во время испытаний на сжатие. Средняя прочность испытанного бетона (R_b) составила 18,5 МПа с предельными деформациями (ε_u) = 0,0024, модулем упругости бетона (E_c) = 20887 МПа и коэффициентом Пуассона, равным 0,16. Предполагаемое соотношение между прочностью цилиндра (f'_c) и прочностью призмы составляет ($f'_c = 1,067 R_b$). Таким образом, средняя прочность цилиндра на сжатие (f'_c) составила 19,75 МПа. Во время формования балок было изготовлено шесть бетонных кубов и три призмы, которые хранились вместе с балками во время выдержки. Свойства использованной стали: предел текучести (R_{sy}) - 551 МПа, максимальная прочность на растяжение R_{su} =6 МПа. Модуль упругости (E_s) стальных стержней составлял 201 ГПа для стержней диаметром 12 мм, предел текучести - 379 МПа, максимальная прочность на растяжение - 511 МПа. Модуль упругости стальных хомутов диаметром 6 мм составлял 200 ГПа. Балки были размещены на испытательной машине в соответствии с необходимыми параметрами для проведения испытаний. При нагрузке на балки была применена сосредоточенная нагрузка в центре каждого пролета (см. рисунок 2).

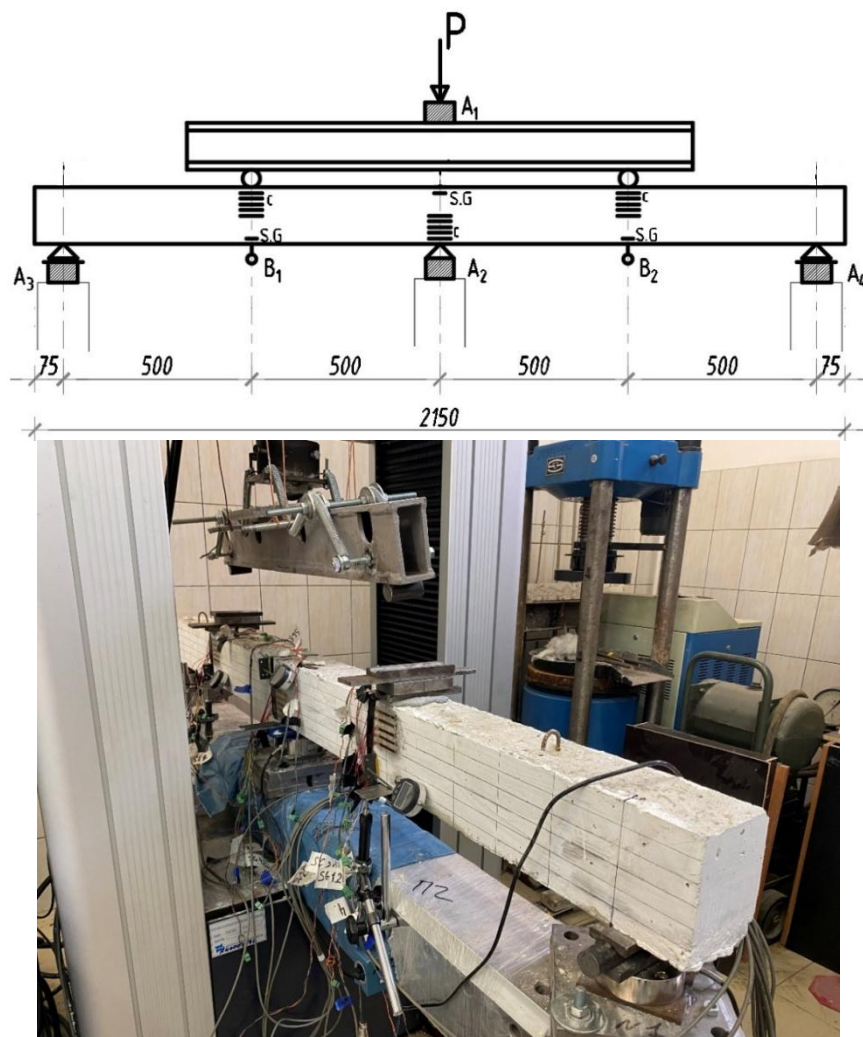


Рисунок 2 – Схема испытания железобетонной балки:

A - измерение сил тензодатчиком; *B* - LVDT; *S.G.* = Тензометрический датчик на продольном стержне;
C = Тензометрические датчики на бетоне.

Результаты исследования и их анализ

Статически неопределимые железобетонные балки были нагружены сосредоточенной нагрузкой в середине каждого пролета. Полученные экспериментальные результаты, включая режим разрушения, зависимость прогиба от нагрузки, деформации от нагрузки и перераспределения моментов, представлены ниже и обсуждаются. Кроме того, в данном разделе будут сравниваться средние значения экспериментальных результатов с расчетами по существующим моделям для перераспределения моментов в статически неопределимых железобетонных балках. Для оценки их точности использованы 10 наиболее распространенных моделей.

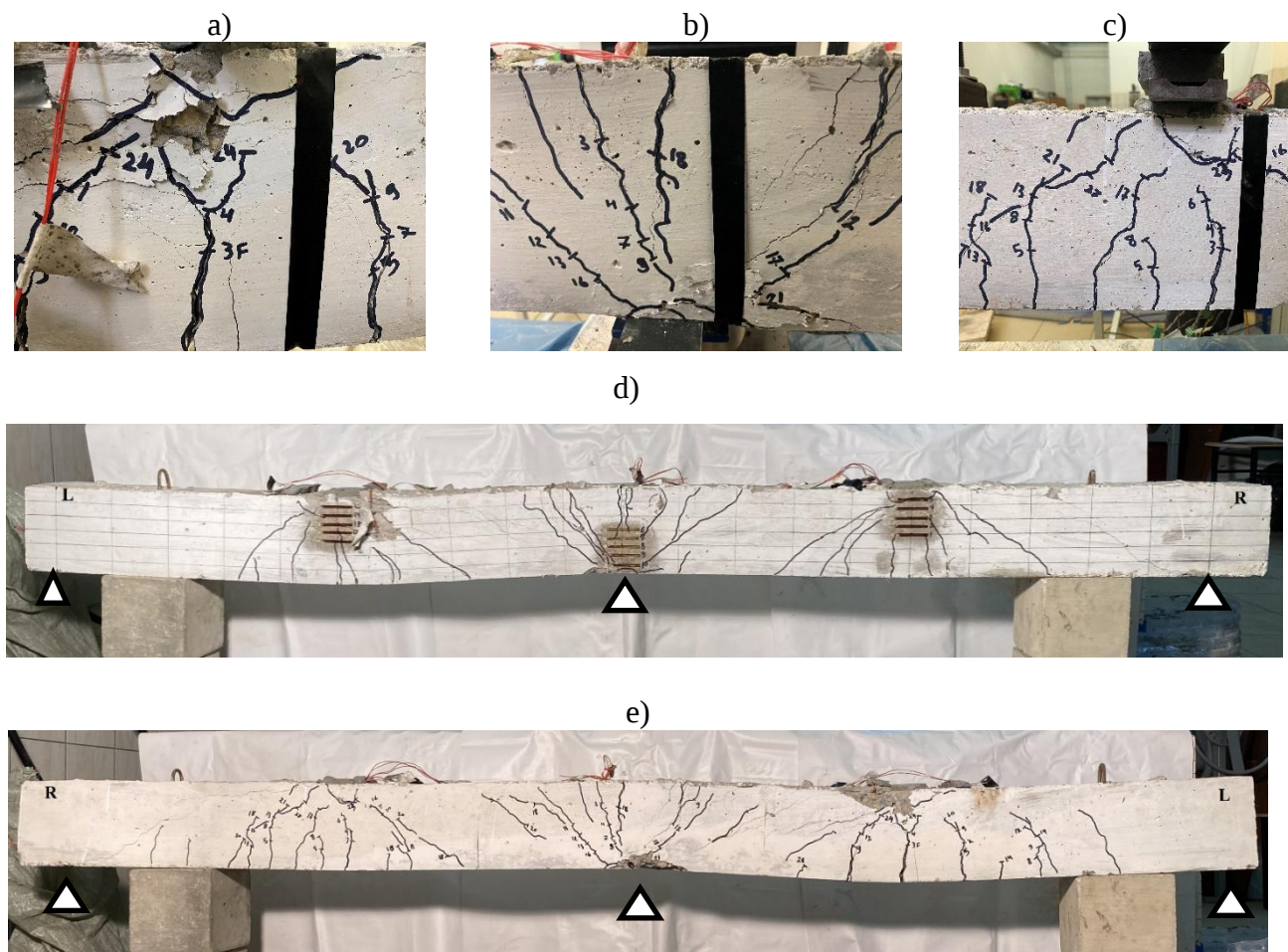


Рисунок 3 – Разрушение железобетонной балки при изгибе обозначается разрушением бетона в центральной опоре (b), а также на левом и правом промежуточных пролетах (a и c, соответственно). Кроме того, представлены полные изображения балки с лицевой и обратной стороны (d и e).

Первая растягивающая арматура сильно деформировалась на срединной опоре ($P_y = 134$ кН) и на промежуточных пролетах ($P_y = 175$ кН), прежде чем произошло деформирование бетона в обоих сечениях: на центральной опоре ($P_u = 185$ кН) и на промежуточных пролетах, как показано на рисунке 3. Кроме того, на промежуточных пролетах и на центральной опоре образовались широкие трещины, которые проникали в области сжатия. Балки также проявили трехступенчатую реакцию до разрушения, которую можно разделить на стадию предварительного раскрытия трещин бетона, стадию пост-раскрытия трещин бетона до предела прочности растягивающей арматуры, и стадию пост-предела прочности растягивающей арматуры до разрушения, как показано на рисунке 4.

Кроме того, на рисунке 5 представлена зависимость деформации от нагрузки на срединной опоре и на обоих промежуточных пролетах, что дает представление о деформационном поведении балок. На рисунке 6 и 7 показаны изменения распределения моментов, которые происходят по мере деформации балок и приближения к стадии разрушению. Фактический коэффициент перераспределения моментов на средней опоре составляет 0,146, а на промежуточных пролетах равен 0,088. Эти значения, а также все другие данные, полученные в ходе экспериментов, представлены в таблице 2. Экспериментальные данные далее будут использоваться для оценки точности существующих моделей прогнозирования перераспределения моментов в статически неопределимых железобетонных балках.

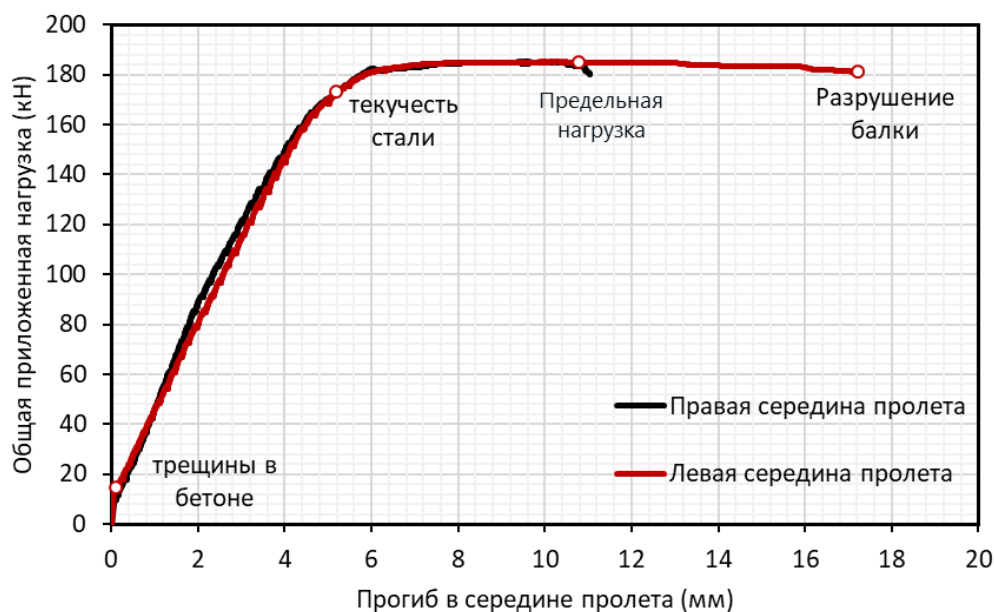
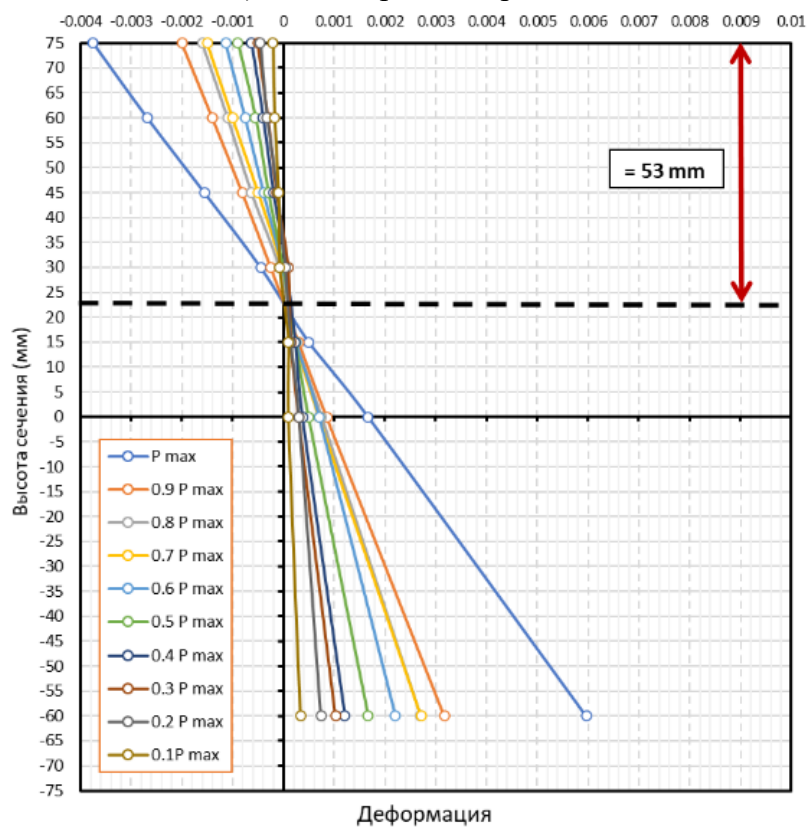


Рисунок 4 – Реакция балки прогиб - нагрузка

Таблица 2 – Параметры экспериментального образца

Переменные параметров	Значение	Переменные параметров	Значение
h_0 (мм) - рабочая высота сечения	135	h (мм) - высота сечения	150
f'_c (МПа) - прочность бетона на сжатие	19,75	L (мм) - длина пролета	1000
$\xi = x/h_0$ - относительная высота сжатой зоны бетона	0,35	L/h - гибкость балки	6,67
R_{sy} (МПа) - предел текучести арматуры	551	$\epsilon_s = \epsilon_t$ - максимальное значение деформации в растянутой арматуре, достигнутое в данном сечении	0,0054
R_{su} (МПа) - предел прочности арматуры	646	ϵ_{uk} - предельная деформация в арматуре	0,118
$\omega_w(\%)$ - коэффициент армирования хомутов в средней опорной зоне	0,31	μ_{s1} - коэффициент армирования на средней опоре	0,014
$\frac{\mu_{s1}}{\mu_{s2}} = \frac{A_{s1}}{A_{s2}}$ - отношение коэффициентов армирования между средней опорой и средним пролетом	1,00	$\beta_{\text{эксп.}}$	0,146

а) Левая середина пролета



б) Средняя опора

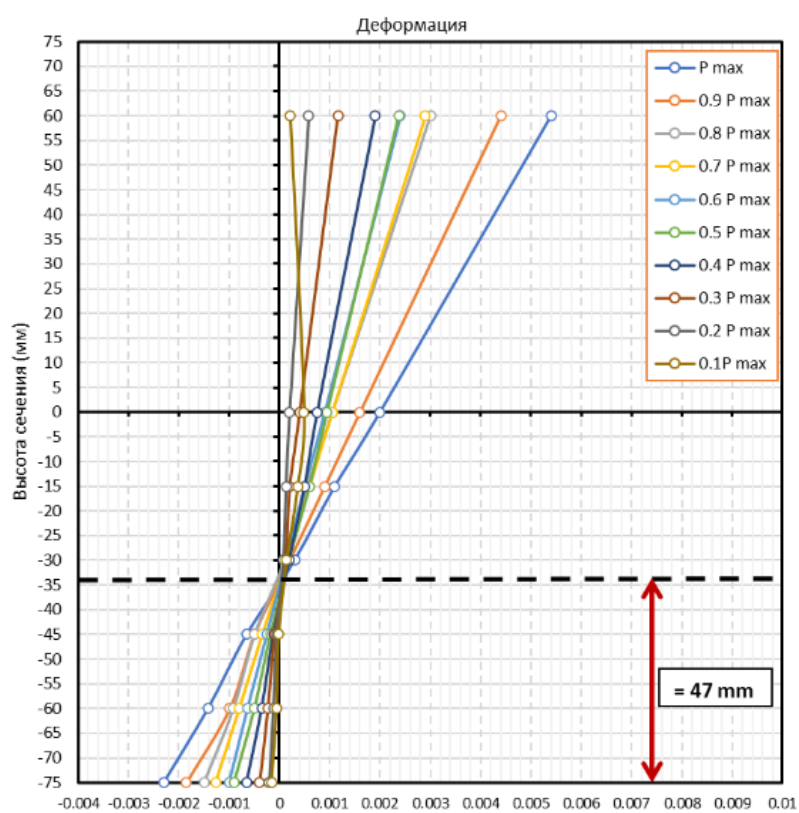


Рисунок 5 – График зависимости деформаций от нагрузки для стали и бетона:
(б) на центральной опоре и (а, с) на промежуточных пролетах

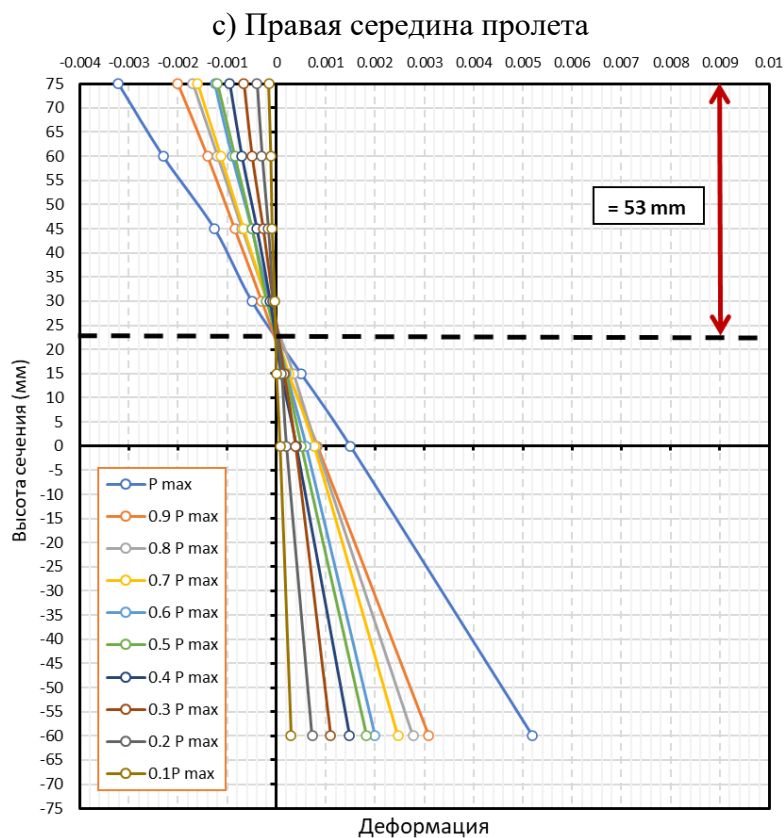


Рисунок 6 (продолжение) – График зависимости деформаций от нагрузки для стали и бетона:
(b) на центральной опоре и (а, с) на промежуточных пролетах

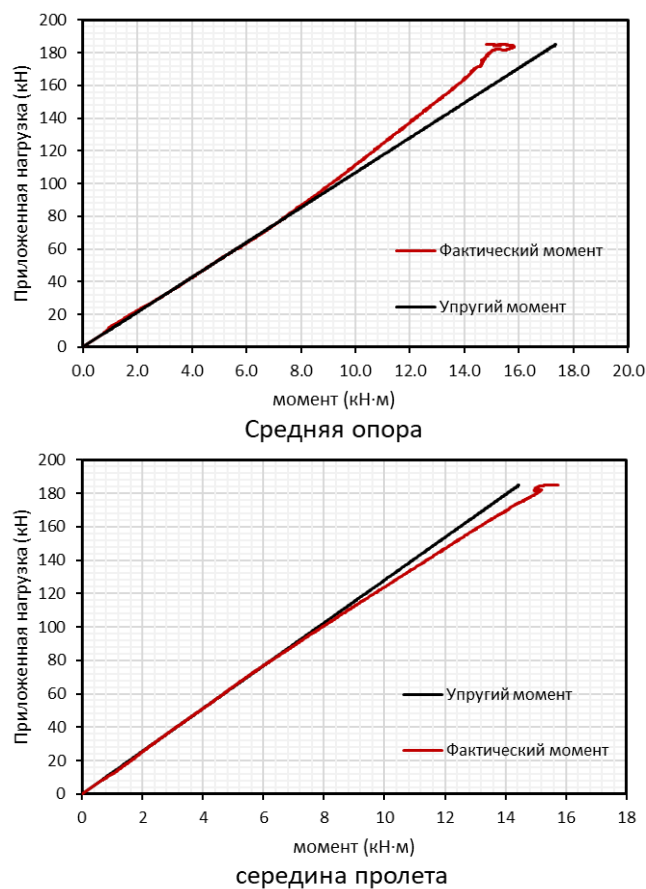


Рисунок 7 – Ответная реакция моментов под полной нагрузкой

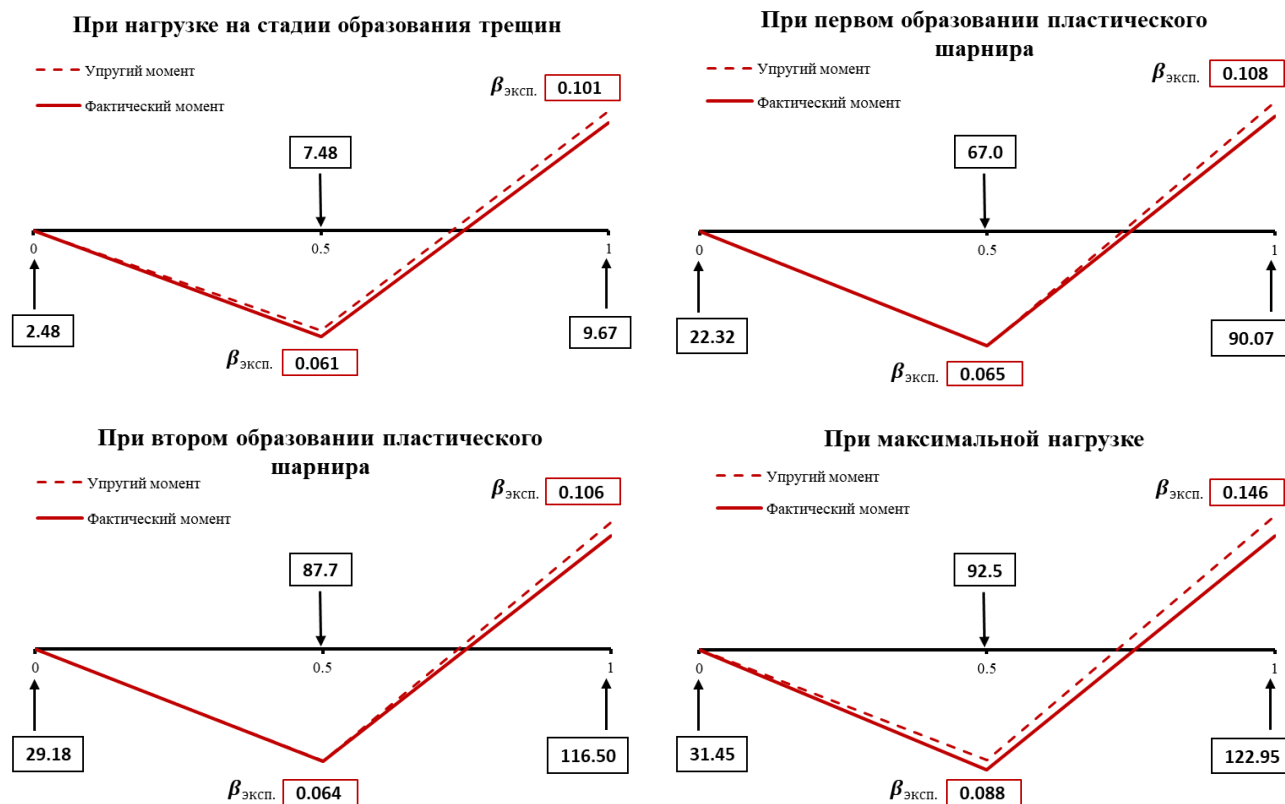


Рисунок 8 – Экспериментальный и упругий изгибающий момент испытуемых балок на различных стадиях нагрузки

Оценка существующих моделей для прогнозирования перераспределения моментов в железобетонных балках была проведена с использованием данных, полученных в экспериментах, как показано в таблице 3 и на рисунке 8. Среди предыдущих моделей Tamrazyan and Sayed (2022) [5] достигли наиболее точного прогнозирования коэффициентов перераспределения моментов ($\beta_{\text{расч.}}$), который находился в пределах 5% от экспериментального значения ($\beta_{\text{эсп.}}$), и абсолютной ошибкой 0,05. Aydogan et al. (2023) [14] также показали хорошую точность прогнозирования коэффициента перераспределения моментов, который был в пределах 12% от экспериментального значения, и абсолютной ошибкой 0,12.

Из моделей, используемых в нормативных документах, наиболее высокую точность прогнозирования показали Канадские стандарты [13], *fib* Model Code 2010 и Eurocode 2 [17,18], с коэффициентами перераспределения моментов, которые находились в пределах 15-16% от экспериментальных значений. В частности, у Канадских стандартов предсказанные коэффициенты перераспределения моментов находились в пределах 15% от экспериментальных значений, а у *fib* Model Code 2010 и Eurocode 2 - в пределах 16% от экспериментальных значений. Британские стандарты [15], напротив, склонны переоценивать коэффициент перераспределения моментов, в то время как остальные существующие модели склонны его недооценивать. В целом, результаты свидетельствуют о том, что модель Tamrazyan and Sayed [5], рассмотренная в данном исследовании, обеспечивает наиболее точные прогнозы перераспределения моментов в статически неопределимых железобетонных балках.

Таблица 3 – Эффективность различных существующих моделей

Литературы	$\beta_{\text{эксп.}}$	$\beta_{\text{расч.}}$	$\beta_{\text{расч.}}/\beta_{\text{эксп.}}$	Погрешность δ %
CSA A23.3-19	0,146	0,125	0,85	15
BS 8100-1 1997		0,250	1,71	71
AS 3600-2018		0,038	0,26	74
do Carmo and Lopes (2005)		0,071	0,49	51
Tamrazyan and Sayed (2022)		0,139	0,95	5
ACI 318-19		0,075	0,51	49
Aydogan et al. (2023)		0,129	0,88	12
DIN 1045-1		0,080	0,55	45
fib Model Code 2010 и Eurocode 2		0,123	0,84	16

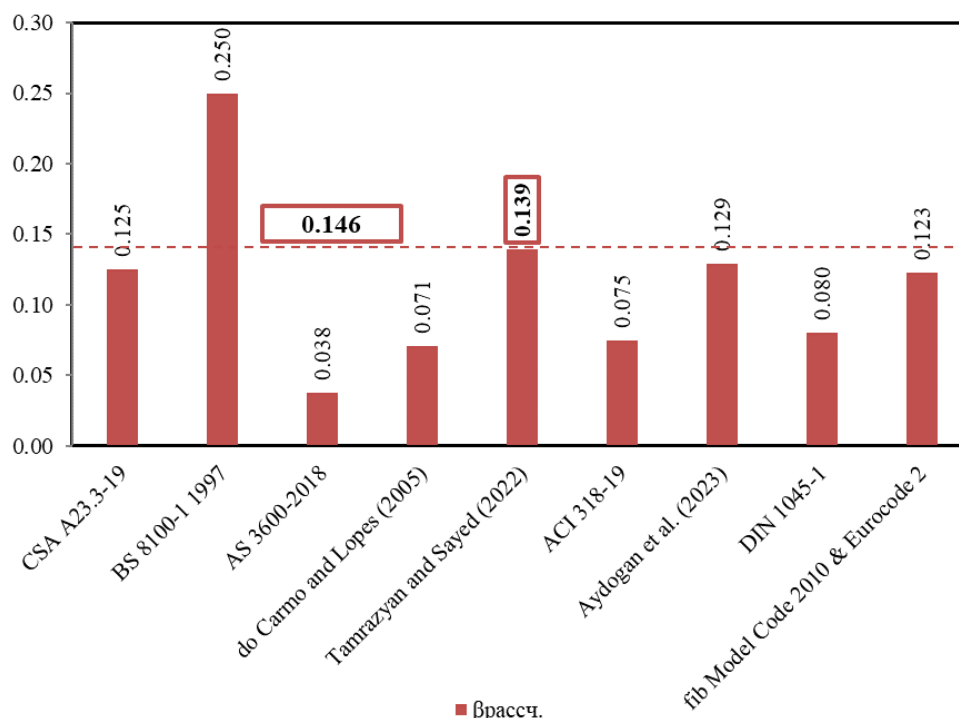


Рисунок 8 – Сравнение расчетного и экспериментального коэффициентов перераспределения моментов

Вывод

Коэффициент перераспределения моментов оказался зависим от различных параметров, таких как армирование балки μ_{s1} , относительная высота сжатой зоны бетона ξ , соотношение предела текучести арматуры на промежуточной опоре к прочности бетона f_y/f_c и соотношения процентов армирования μ_{s1}/μ_{s2} .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кальницкий А.А. Расчёт статически неопределимых железобетонных конструкций с учётом перераспределения усилий. М., 1970. 168 с.
2. Черняева Р.П. К определению границ перераспределения усилий при расчете статически неопределимых железобетонных балок по методу предельного равновесия // Строительство и реконструкция. 2014. № 1 (51). С. 41-45.

3. Тамразян А.Г., Рашидов Б. О влиянии некоторых факторов на уровни перераспределения моментов в статически неопределимых железобетонных балках // "Лолейтовские чтения-150". Современные методы расчета железобетонных и каменных конструкций по предельным состояниям. 2018. С. 447-454.
4. Тамразян А.Г., Рашидов Б.Т. К уровню перераспределения моментов в статически неопределимых железобетонных балках // Строительство и реконструкция. 2018. № 6 (80). С. 14-21.
5. Tamrazyan A.G., Sayed Y.A.K. A practical model for moment redistribution in statically indeterminate RC beams // European Journal of Environmental and Civil Engineering. 2023. Т. 27. № 4. С. 1503-1511.
6. Do Carmo R. N. F., Lopes S. M.R. Ductility and linear analysis with moment redistribution in reinforced high-strength concrete beams // Canadian Journal of Civil Engineering. 2005. Т. 32. № 1. С. 194-203.
7. Scott R.H., Whittle R.T. Moment redistribution effects in beams // Magazine of Concrete Research. 2005. Т. 57. № 1. С. 9-20.
8. Bagge N., O'Connor A., Elfgren L., Pedersen C. Moment redistribution in RC beams—A study of the influence of longitudinal and transverse reinforcement ratios and concrete strength // Engineering structures. 2014. Т. 80. С. 11-23.
9. Шалобыта Н.Н., Царук О.Г., Полонский М.Ч., Демчук И.Е. Численное исследование перераспределения усилий в железобетонных элементах с комбинированным армированием // Вестник Брестского государственного технического университета. 2016. № 1(97). С. 86-92.
10. Истомин А. Д., Кудрявцев А. В. Работа статически неопределимых железобетонных элементов в условиях отрицательных температур // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 7. С. 51-55.
11. Li L., Zheng W., Wang Y. Prediction of moment redistribution in statically indeterminate reinforced concrete structures using artificial neural network and support vector regression // Applied Sciences. 2018. Т. 9. № 1. С. 28.
12. ACI 318-19. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary // American Concrete Institute: Farmington Hills, MI, USA, 2019.
13. CSA, A-19. Design of concrete structures. Toronto, Ontario, Canada, 2019.
14. AS 3600-2018. Concrete structures. Sydney, Australia, 2018.
15. BS 8110-1. Structural Use of Concrete: Part 1: Code of Practice for Design and Construction // British Standards Institution. London, UK. 1997.
16. DIN, 1045-1. Concrete reinforced and prestressed concrete structures // German Institute of Standard Berlin, Germany. 2008.
17. FIB Model Code 2010. For Concrete Structures 2010 // International Federation for Structural Concrete. Ernst Sohn Publ, House, Lausanne. Switzerland. 2010.
18. BS., EN. 1992-1-1. Eurocode2. Design of concrete structures: Part 1-1: General rules and rules for buildings // British Standards Institution, London, UK. 2004.
19. Aydogan M. S., Alacali S., Arslan G. Prediction of moment redistribution capacity in reinforced concrete beams using gene expression programming // Structures. Elsevier. 2023. Т. 47. С. 2209-2219.
20. Тамразян А.Г., Сайед Й.А.К. Параметры, влияющие на перераспределение моментов в статически неопределимых железобетонных балках // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 6. С. 4-11. doi:10.33622/0869-7019.2022.06.04-11

REFERENCES

1. Kal'nitskiy A.A. Raschot staticheskikh neopredelimykh zhelezobetonnykh konstruktsey s uchotom pereraspredeleniya usiliy [Calculation of statically indefinable reinforced concrete structures, taking into account the redistribution of forces]. Moscow, 1970. 168 p. (rus)
2. Chernyayeva R.P. K opredeleniyu granits pereraspredeleniya usiliy pri raschete staticheskikh neopredelimykh zhelezobetonnykh balok po metodu predelnogo ravnovesiya [To determine the limits of redistribution of efforts in the calculation of statically non-selectable reinforced concrete beams using the method of limiting equilibrium]. Building and Reconstruction. 2014. No. 1 (51). Pp. 41-45. (rus)
3. Tamrazyan A.G., Rashidov B.T. O vliyaniy nekotorykh faktorov na urovni pereraspredeleniya momentov v staticheskikh neopredelimykh zhelezobetonnykh balkakh [On the influence of certain factors on the levels of moment redistribution in statically indeterminate reinforced concrete beams] // "Loleytovskie chteniya-150". Sovremennyye metody rascheta zhelezobetonnykh i kamennykh konstruktsey po predel'nyim sostoyaniyam. 2018. Pp. 447-454. (rus)
4. Tamrazyan A.G., Rashidov B.T. K urovnyu pereraspredeleniya momentov v staticheskikh neopredelimykh zhelezobetonnykh balkakh [To the level of redistribution of moments in statically uncertain reinforced concrete beams] // Stroitel'stvo i rekonstruktsiya. 2018. No. 6 (80). Pp. 14-21. (rus)
5. Tamrazyan A.G., Sayed Y.A.K. A practical model for moment redistribution in statically indeterminate RC beams // European Journal of Environmental and Civil Engineering. 2023. Т. 27. No. 4. Pp. 1503-1511.
6. Do Carmo R.N.F., Lopes S.M.R. Ductility and linear analysis with moment redistribution in reinforced high-strength concrete beams // Canadian Journal of Civil Engineering. 2005. Т. 32. No. 1. Pp. 194-203.

7. Scott R.H., Whittle R.T. Moment redistribution effects in beams // Magazine of Concrete Research. 2005. T. 57. No. 1. Pp. 9-20.
8. Bagge N., O'Connor A., Elfgrén L., Pedersen C. Moment redistribution in RC beams—A study of the influence of longitudinal and transverse reinforcement ratios and concrete strength // Engineering structures. 2014. T. 80. Pp. 11-23.
9. Shalobyta N.N., Tsaruk O.G., Polonskii M.Ch., Demchuk I.E. Chislennoe issledovanie pereraspredeleniya usilii v zhelezobetonnykh elementakh s kombinirovannym armirovaniem [Numerical study of redistribution of the internal force in reinforced concrete elements with combined reinforcement] // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2016. No. 1(97). Pp. 86-92. (rus)
10. Istomin A.D., Kudryavtsev A.V. Rabota staticheski neopredelimykh zhelezobetonnykh elementov v usloviyakh otritsatel'nykh temperatur [Behavior of statically indeterminate reinforced concrete elements under negative temperature conditions] // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2016. No. 7. Pp. 51-55. (rus)
11. Li L., Zheng W., Wang Y. Prediction of moment redistribution in statically indeterminate reinforced concrete structures using artificial neural network and support vector regression // Applied Sciences. 2018. T. 9. No. 1. Pp. 28.
12. ACI 318-19: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary // American Concrete Institute: Farmington Hills, MI, USA, 2019.
13. CSA, A-19: Design of concrete structures. Toronto, Ontario, Canada, 2019.
14. AS 3600-2018: Concrete structures. Sydney, Australia, 2018.
15. BS8110-1: Structural Use of Concrete: Part 1: Code of Practice for Design and Construction // British Standards Institution. London, UK, 1997.
16. DIN, 1045-1: Concrete reinforced and prestressed concrete structures // German Institute of Standard Berlin, Germany, 2008.
17. FIB Model Code 2010: for Concrete Structures 2010 // International Federation for Structural Concrete. Ernst Sohn Publ, House, Lausanne. Switzerland, 2010.
18. BS., EN. 1992-1-1. Eurocode2: Design of concrete structures: Part 1-1: General rules and rules for buildings // British Standards Institution, London, UK, 2004.
19. Aydogan M. S., Alacali S., Arslan G. Prediction of moment redistribution capacity in reinforced concrete beams using gene expression programming // Structures. Elsevier. 2023. T. 47. Pp. 2209-2219.
20. Tamrazyan A.G., Sayed Y.A.K. Parameters Affected the Moment Redistribution in Statically Indeterminate Reinforced Concrete Beams // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2022. No. 6. Pp. 4-11. doi:10.33622/0869-7019.2022.06.04-11

Информация об авторах:

Тамразян Ашот Георгиевич

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)», г. Москва, Россия,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой железобетонных и каменных конструкций.
E-mail: tamrazian@mail.ru

Сайед Йехия Ахмед Котп

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)», г. Москва, Россия,
аспирант кафедры железобетонных и каменных конструкций.
E-mail: engyehia250@gmail.com

Information about authors:

Tamrazyan Ashot G.

Moscow State University of Civil Engineering (MGSU) National Research University, Moscow, Russia,
doctor of technical science, professor, and the head of reinforced concrete and masonry structures department.
E-mail: tamrazian@mail.ru

Sayed Yehia Ahmed Kotp

Moscow State University of Civil Engineering (MGSU) National Research University, Moscow, Russia,
PhD, student at the reinforced concrete and masonry structures department.
E-mail: engyehia250@gmail.com

А.Д. ИСТОМИН¹

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

ВЛИЯНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОГО ЗАМОРАЖИВАНИЯ И ОТТАИВАНИЯ НА ДИАГРАММУ ДЕФОРМИРОВАНИЯ СЖАТОГО БЕТОНА

Аннотация. При расчете железобетонных конструкций широко применяются деформационные модели материалов. При этом используются диаграммы бетона при сжатии с учетом нисходящей ветви. Аналитическое описание диаграммы работы бетона связано с определением таких параметров бетона, как начальный модуль упругости; призматическая прочность; предельные деформации сжатия в вершине диаграммы; значение деформаций на нисходящей ветви при 85% от призматической прочности. Воздействие знакопеременных температур на железобетонные конструкции зданий и сооружений приводит к развитию деструктивных процессов в бетоне. При этом мало исследованным остается вопрос о влиянии циклического замораживания и оттаивания на полные диаграммы бетона, включая предельные деформации сжатия. Определяющим фактором, влияющим на деформативно-прочностные свойства бетона в условиях замораживания и оттаивания, является его влажность. В связи с этим проведены исследования по влиянию циклических замораживаний и оттаиваний на диаграммы состояния бетона различной влажности, результаты которых представлены в данной работе.

Ключевые слова: циклическое замораживание и оттаивание, диаграмма деформирования, влажность бетона, предельные деформации, прочность, модуль упругости.

A.D. ISTOMIN¹

¹Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

THE EFFECT OF CYCLIC FREEZING AND THAWING ON THE DEFORMATION DIAGRAM OF COMPRESSED CONCRETE

Abstract. Deformation models of materials are widely used in the calculation of reinforced concrete structures. At the same time, concrete compression diagrams are used, taking into account the descending branch. The analytical description of the concrete work diagram is associated with the determination of such concrete parameters as the initial modulus of elasticity; prismatic strength; extreme compression deformations at the top of the diagram; the value of deformations on the descending branch at 85% of the prismatic strength. The influence of alternating temperatures on reinforced concrete structures of buildings and structures leads to the development of destructive processes in concrete. At the same time, the question of the effect of cyclic freezing and thawing on the complete diagrams of concrete, including the ultimate compression deformations, remains poorly investigated. The determining factor affecting the deformation and strength properties of concrete under freezing and thawing conditions is its humidity. In this regard, studies have been conducted on the effect of cyclic freezing and thawing on the diagrams of the state of concrete of various humidity, the results of which are presented in this paper.

Keywords: cyclic freezing and thawing, deformation diagram, concrete moisture, ultimate deformations, strength, modulus of elasticity.

Введение

В качестве обобщенной характеристики свойств бетона при одноосном напряженном состоянии принимается диаграмма деформирования бетона при кратковременной нагрузке [1, 2].

Диаграмма деформирования бетона при осевом кратковременном сжатии имеет криволинейное очертание с нисходящей ветвью. Различают экспериментальные диаграммы деформирования « $\sigma_b - \varepsilon_b$ », полученные опытным путем и расчетные зависимости « $\sigma_b - \varepsilon_b$ », которые аппроксимируют экспериментальные данные заданной функцией.

В настоящее время при расчете железобетонных конструкций широко используется деформационные модели материалов. При этом используются диаграммы бетона при сжатии с учетом нисходящей ветви [3]. Для описания полной диаграммы деформирования бетона в условиях осевого кратковременного сжатия при выполнении нелинейных расчетов конструкций используются различные аналитические зависимости [4-17]. Область работы бетона на нисходящем участке диаграммы деформирования при расчете ограничивают уровнем напряжений $\sigma_b = 0,85R_b$. Аналитическое описание зависимости « $\sigma_b - \varepsilon_b$ » связано с определением таких параметров бетона, как начальный модуль упругости; призмная прочность; предельные деформации сжатия (ε_{b0}) при $\sigma_b = R_b$, то есть в вершине диаграммы; значение деформаций на нисходящей ветви диаграммы ε_{bu} при $\sigma_b = 0,85R_b$ соответствующее разрушению бетона.

Аналитическая зависимость для описания и построения диаграмм бетона при сжатии в РФ принята на основании предложений Карпенко Н.И. и др. авторов [2, 5]:

$$\varepsilon_b = \frac{\sigma_b}{v_b E_b}, \quad (1)$$

где σ_b - текущее напряжение в бетоне,

v_b - коэффициент изменения секущего модуля (упругости) при сжатии,

E_b - начальный модуль упругости бетона.

В отечественных нормах для обычных тяжелых бетонов принято среднее значение предельных деформации в вершине диаграммы $\varepsilon_{b0} = 200 \cdot 10^{-5}$. Предельные деформации бетона при сжатии в зависимости от его прочности согласно предложению [18] определяются по формуле (2):

$$\varepsilon_{b0} = -\frac{B}{E_b} \lambda \left[1 + \left(0,8 - 0,15 \frac{B^2}{10000} \right) \lambda B / 60 + 0,2 \lambda / B \right] \cdot (0,12 + 1,03 B / 60 + 0,2 / B)^{-1}, \quad (2)$$

где B - класс бетона по прочности на сжатие,

λ - безразмерный коэффициент, зависящий от вида бетона ($\lambda = 1,0$ - для тяжелого бетона).

Аналитическое описание диаграмм сжатого бетона в Европе представлено зависимостью [19] (3):

$$\frac{\sigma_b}{R_b} = \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k - 2)\eta}, \quad (3)$$

$$\eta = \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{b0}}$$

где ε_{b0} - относительный уровень деформаций,

$$k = \frac{1,1 E_b |\varepsilon_{b0}|}{R_b}$$

- коэффициент, учитывающий кривизну диаграммы деформирования бетона.

В европейских нормах [19] величина предельных деформаций сжатия зависит от прочности бетона.

Воздействие знакопеременных температур на железобетонные конструкции зданий и сооружений приводит к развитию деструктивных процессов в бетоне [20-23]. Во многих случаях ограничиваются исследованием влияния циклических замораживаний и оттаиваний (ЦЗО) на прочность бетона при сжатии и начальный модуль упругости. При этом мало исследованным остается вопрос о влиянии ЦЗО на полные равновесные диаграммы бетона, включая предельные деформации сжатия. Определяющим фактором, влияющим на деформативно-прочностные свойства бетона в условиях замораживания и оттаивания, является его влажность. В связи с этим проведены исследования по влиянию циклических замораживаний и оттаиваний на диаграммы состояния бетона различной влажности.

Материалы и методы

В качестве опытных образцов использовались бетонные призмы с размерами 10х10х40 см. Для изготовления опытных образцов использовался тяжелый бетон естественного твердения. Состав бетона по весу был принят следующим Ц/Ц:П/Ц:Щ/Ц:В/Ц = 1:2,2:4,7:0,6. Расход цемента при этом составил 250 кг на 1 м³ бетонной смеси.

Для приготовления бетона использовался гранитный щебень фракции 5-15 мм, речной песок с модулем крупности $M_{кр} = 2,1$, портландцемент марки 400. Образцы изготавливались в металлической опалубке. В течение 28 суток образцы хранились во влажной среде при температуре $+20 \pm 5^\circ\text{C}$ и относительной влажности 75... 80%.

Возраст бетона к моменту испытаний составил 180 суток. Перед испытанием в термокамере бетонные образцы разбивались на три серии. Образцы первой серии имели естественную влажность ($W = 3,64\%$). Образцы второй серии перед испытанием водонасыщались в течение двух недель ($W = 5,05\%$). Образцы третьей серии перед испытанием водонасыщались в течение четырех трех недель ($W = 6,4\%$). Влажность бетона определялась на пробах, полученных дроблением образцов после их испытания на кратковременное сжатие.

Испытания на кратковременное сжатие проводилось как перед циклическим замораживанием-оттаиванием (0 циклов), так и после 20 циклов, 40 циклов и 60 циклов замораживания и оттаивания, в термобарокамере TBV-2000. Понижение температуры бетона образцов происходило от $+20^\circ\text{C}$ до -50°C до полного выравнивания температуры по сечению испытываемых образцов. Один цикл замораживания-оттаивания составлял 12 часов. Результаты испытания бетонных кубов показали, что марка бетона по морозостойкости составила F300.

Результаты и обсуждение

Деформативные и прочностные характеристики, полученные при испытании бетонных призм на сжатие в нормальных условиях ($+15...20^\circ\text{C}$) после 0, 20, 40 и 60 циклов замораживания-оттаивания приведены таблице 1.

Таблица 1 - Деформативные и прочностные характеристики бетона при его влажности (W)

ЦЗО, С	$W = 3,64\%$			$W = 5,05\%$			$W = 6,4\%$		
	R_b , МПа	$E_b \cdot 10^{-3}$, МПа	$\varepsilon_{b0} \cdot 10^5$	R_b , МПа	$E_b \cdot 10^{-3}$, МПа	$\varepsilon_{b0} \cdot 10^5$	R_b , МПа	$E_b \cdot 10^{-3}$, МПа	$\varepsilon_{b0} \cdot 10^5$
0	37,9	30,7	200	35,6	30,41	205	28,7	24,04	210
20	37,4	30,38	204	29,2	25,55	220	26,3	18,79	251
40	35,1	29,76	208	24,0	20,82	240	23,4	14,30	349
60	34,2	28,08	214	22,1	15,63	267	19,2	11,09	430

Из приведенных результатов видно, что при 60 ЦЗО предельные деформации сжатого бетона с влажностью $W = 3,64\%$ увеличиваются с $200 \cdot 10^{-5}$ от. ед. до $214 \cdot 10^{-5}$, то есть на 7%; с влажностью $W = 5,05\%$ увеличиваются с $205 \cdot 10^{-5}$ от. ед. до $267 \cdot 10^{-5}$, то есть на 30%; с влажностью $W = 6,4\%$ увеличиваются с $210 \cdot 10^{-5}$ от. ед. до $430 \cdot 10^{-5}$, то есть на 105%. Таким образом, при 60 циклов замораживания-оттаивания увеличение влажности бетона с $W = 3,64\%$ до $W = 6,4\%$ приводит к росту предельных деформаций сжатого бетона (ε_{b0}) в 2,0 раза.

На рисунках 1, 2 представлены результаты испытаний в виде зависимости предельных деформаций сжатого бетона различной влажности от количества циклов замораживания-оттаивания.

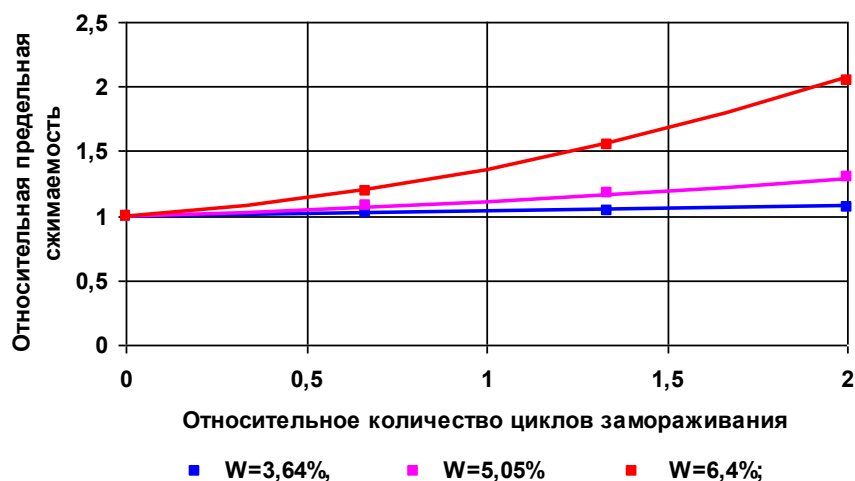


Рисунок 1 – Относительная предельная сжимаемость бетона при ЦЗО

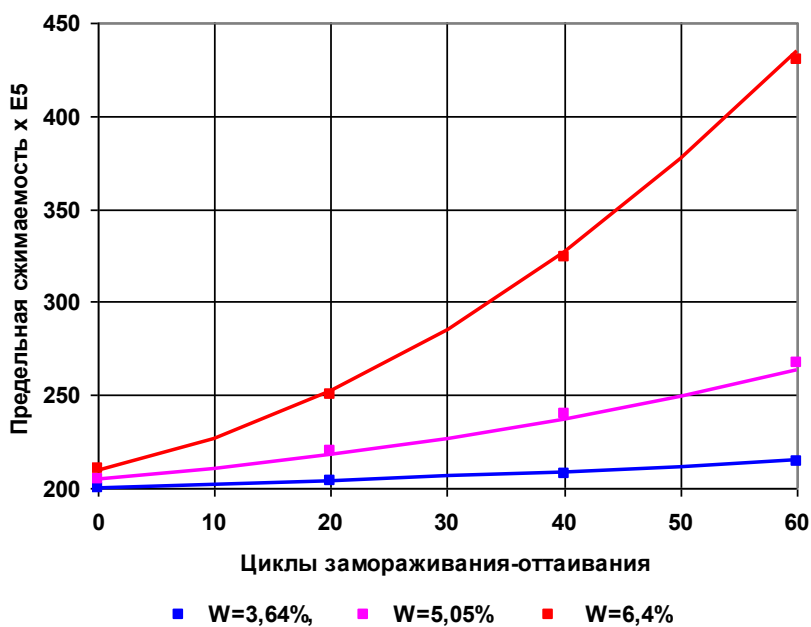


Рисунок 2 – Предельные деформации сжатого бетона при ЦЗО

В результате аппроксимации представленных опытных данных получена зависимость для предельных деформаций сжатого бетона ($\varepsilon_{b0,c}$) при ЦЗО в зависимости от относительного количества циклов замораживания-оттаивания и влажности бетона (4):

$$\varepsilon_{b0,c} = (a_w \eta_c^2 + b_w \eta_c + 1) \cdot \varepsilon_{b0}, \quad (4)$$

где ε_{b0} - предельные деформации сжатого бетона до ЦЗО, которые в зависимости от влажности бетона определяются по формуле (5):

$$\varepsilon_{b0} = 187,45 e^{0,0177W}, \quad (5)$$

a_w, b_w - эмпирические коэффициенты, которые в зависимости от влажности бетона определяются по формулам (6, 7):

$$a_w = 4 \cdot 10^{-5} e^{1,3503W}, \quad (6)$$

$$b_w = 2 \cdot 10^{-3} e^{0,7019W}; \quad (7)$$

W - влажность бетона, %.

Для инженерных расчетов выражение (1) может быть представлено в виде:

$$\varepsilon_{b0,c} = (6 \cdot 10^{-6} C^2 + k_w 8 \cdot 10^{-4} C + 1) \cdot \varepsilon_{b0}, \quad (8)$$

где k_w - коэффициент, учитывающий важность бетона (таблица 2).

Таблица 2 - Значения коэффициента k_w в зависимости от условий эксплуатации

Переменное замораживание и оттаивание в условиях		
воздушной среды	эпизодического водонасыщения	водонасыщенного состояния
$W \leq 4\%$	$4\% < W \leq 5,5\%$	$W > 5,5\%$
$k_w = 1,0$	$k_w = 5,5$	$k_w = 19,375$

Результаты расчетов $\varepsilon_{b0,c}$ для бетонов различной влажности представлены на рисунке 3 в виде соответствующих сплошных линий.

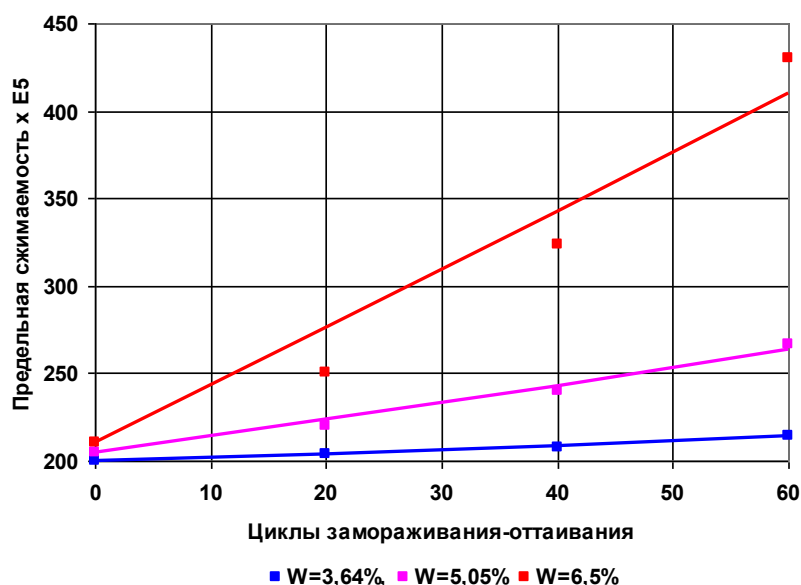


Рисунок 3 – Предельные деформации сжатого бетона при ЦЗО, рассчитанные по формуле (8)

Отклонение опытных данных предельных деформаций от значений, рассчитанных по формуле (8) составляет -5%....+10%.

На рисунках 4-6 представлены графики деформирования бетона при кратковременном сжатии после соответствующего количества циклов замораживания и оттаивания в зависимости от влажности бетона.

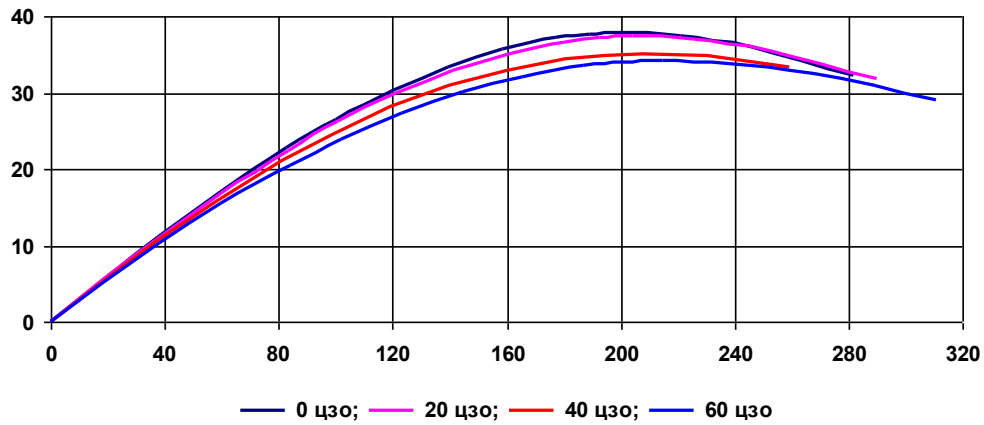


Рисунок 4 – Диаграммы деформирования сжатого бетона ($W=3,64\%$)

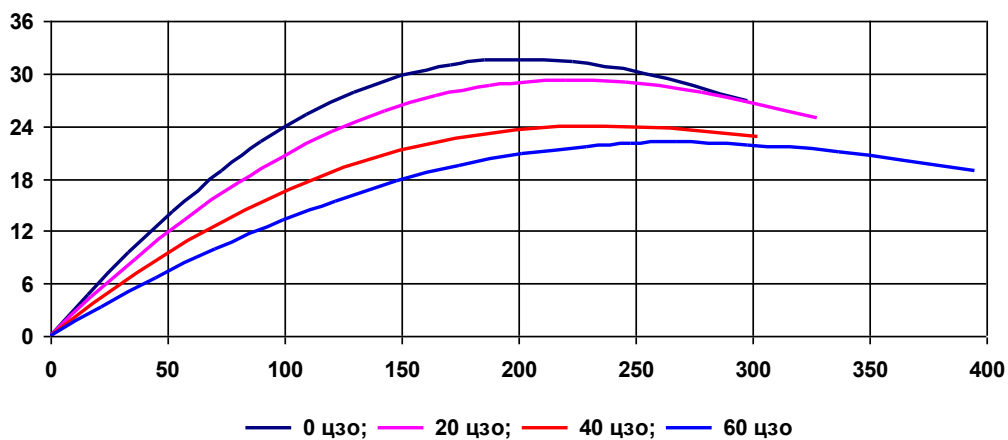


Рисунок 5 – Диаграммы деформирования сжатого бетона ($W=5,05\%$)

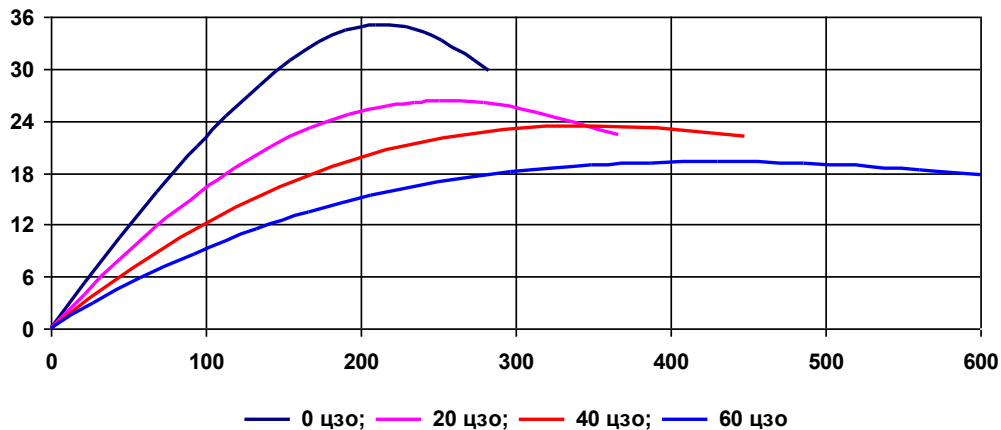


Рисунок 6 – Диаграммы деформирования сжатого бетона ($W=6,4\%$)

Из приведенных результатов видно, что при 60 ЦЗО начальный модуль упругости и призмная бетона соответственно уменьшаются на 10% и 8,6% при влажности 3,64%; на 48,6% и 38% при влажности 5,05%; на 54% и 33% при влажности 6,4%. Предельные деформации в вершине диаграммы ε_{b0} и на нисходящей ветви диаграммы ε_{bu} при $\sigma_b = 0,85R_b$ бетона соответственно увеличиваются на 7% и 10% при влажности 3,64%; на 30% и 34% при влажности 5,05%; на 105% и 142% при влажности 6,4%. Таким образом, при 60 циклов замораживания-оттаивания увеличение влажности бетона с 3,64% до 6,4%

№ 5 (109) 2023

приводит к уменьшению модуля упругости и призмочной прочности соответственно на 60% и 41%; к росту предельных деформаций сжатого бетона ε_{b0} и ε_{bu} на 100% и 119%.

Заклучение

На основании проведенных экспериментальных исследований влияния циклического замораживания и оттаивания на параметрические точки диаграммы деформирования сжатого бетона установлено, что существенное влияние оказывает влажность бетона. Предложена зависимость для вычисления предельных деформаций сжатого бетона в зависимости от количества циклов замораживания-оттаивания и влажностных условий эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРА

1. Бондаренко В.М. Некоторые вопросы нелинейной теории железобетона. Харьков, ХГУ. 1968. 324 с.
2. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. М.: Стройиздат, 1996. 411 с.
3. Карпенко Н.И., Соколов Б.С., Радаикин О.В. Анализ и совершенствование криволинейных диаграмм деформирования бетона для расчета железобетонных конструкций по деформационной модели // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 1. С. 28-30.
4. Байков В.Н., Горбатов С.В., Димитров З.А. Построение зависимости между напряжениями и деформациями сжатого бетона по системе нормируемых показателей // Изв. вузов. Сер.: Стр-во и архитектура. 1977. № 6. С. 15–18.
5. Карпенко Н.И., Мухамендиев Т.А., Петров Н.А. Исходные и трансформированные диаграммы деформирования бетона и арматуры // Сб. тр. «Напряженно-деформированное состояние бетонных и железобетонных конструкций», М. НИИЖБ, 1986. С. 7-25.
6. Михайлов В.В. Расчет прочности нормальных сечений изгибаемых элементов с учетом полной диаграммы деформирования бетона // Бетон и железобетон. 1993. № 3. С. 26.
7. Залесов А.С., Чистяков Е.А., Ларичева И.Ю. Деформационная расчетная модель железобетонных элементов при действии изгибающих моментов и продольных сил // Бетон и железобетон. 1996.
8. Мурашкин Г.В., Мордовский С.С. Применение диаграмм деформирования для расчета несущей способности внецентренно сжатых железобетонных элементов // Жилищное строительство. Москва, 2013. № 3. С. 38–40.
9. Майоров В.И., Рацириниву Де Руссель Ж. Исследование и аналитическое описание диаграммы работы бетона при расчете железобетонных конструкций по деформационной модели // Вестник РУДН, серия Инженерные исследования. 2000. № 3. С. 97-102.
10. Михайлов В.В., Емельянов М.П., Дудолов Л.С., Митасов В.М. Некоторые предложения по описанию диаграммы деформаций бетона при нагружении // Изв. вузов. Сер.: Стр-во и архитектура. 1983. № 2. С. 23-27.
11. Мурашкин Г.В., Мурашкин В.Г. Моделирование диаграммы деформирования бетона и схемы НДС // Изв. вузов. Сер.: Стр-во и архитектура. 1997. № 10. С. 4–6.
12. Бабич Е.М., Крусъ Ю.А., Гарницкий Ю.В. Новые аппроксимации зависимости «напряжения–деформации», учитывающие нелинейность деформирования бетонов // Изв. вузов. Сер.: Стр-во и архитектура. 1996. № 2. С. 39-44.
13. Карпенко Н.И., Ерышев В.А., Латышева Е.В. Методика расчета параметров деформирования бетона при разгрузке с напряжений сжатия // Вестник МГСУ. 2014. № 3. С. 168-178.
14. Совгира В.В. Полные равновесные диаграммы деформирования одноосно сжатого и растянутого бетона // Проблемы современного бетона и железобетона. Минск, 2016. Вып. 8. С. 270–289.
15. Назаренко В.Г., Боровских А.В. Диаграмма деформирования бетонов с учетом ниспадающей ветви // Бетон и железобетон. 1999. № 2. С. 18–22.
16. Дзюба Р.Р. Исследование диаграмм деформирования бетона для расчета железобетонных конструкций // Символ науки. 2016. № 3. С. 42-45.
17. Бондаренко В.М., Римшин В.И. Квазилинейные уравнения силового сопротивления и диаграмма σ – ε бетона // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2014. № 6. С. 40–44.
18. Карпенко С.Н., Карпенко Н.И., Ярмаковский В.Н. Диаграммный метод расчета стержневых железобетонных конструкций, эксплуатируемых при воздействии низких климатических (до -70°C) и технологических (до -150°C) температур // Строительные науки. № 1. 2017. С. 104-108.
19. Алмазов В.О. Проектирование железобетонных конструкций по ЕВРОНОРМАМ. Научное издание. М.: Из-во АСВ. Строительство и архитектура. 2011. 216 с.
20. Струлев В.М., Яркин Р.А. О современных методах обеспечения долговечности железобетонных конструкций // Вестник ТГТУ. 2003. Т. 9. № 2. С. 277-281.

21. Карпенко Н.И., Карпенко С.Н., Ярмаковский В.Н., Ерофеев В.Т. О современных методах обеспечения долговечности железобетонных конструкций // Academia. Архитектура и строительство. 2015. № 1. С. 93-103.
22. Пинус Б.И., Пинус Ж.Н., Хомякова И.В. Изменение конструктивных свойств бетонов при охлаждении и замораживании // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 2(97). С. 111-116.
23. Истомин А.Д., Назаров Т.А. Влияние природных циклов замораживания — оттаивания на прочность и деформативность бетона // Технология текстильной промышленности. 2019. № 3(381). С. 52-56.

REFERENCES

1. Bondarenko V.M. Nekotorye voprosy nelinejnoj teorii zhelezobetona. Xar'kov, XGU. 1968. 324 p.
2. Karpenko N.I. Obshhie modeli mexaniki zhelezobetona. M.: Strojizdat, 1996. 411 p.
3. Karpenko N.I., Sokolov B.S., Radajkin O.V. Analiz i sovershenstvovanie krivolinejnyx diagramm deformirovaniya betona dlya rascheta zhelezobetonnyx konstrukcij po deformacionnoj modeli // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2013. No. 1. Pp. 28-30.
4. Bajkov V.N., Gorbato V.S., Dimitrov Z.A. Postroenie zavisimosti mezhdru napryazheniyami i deformacijami szhatogo betona po sisteme normiruemyx pokazatelej // Izv. vuzov. Ser.: Str-vo i arxitektura. 1977. No. 6. Pp. 15-18.
5. Karpenko N.I., Muxamendiev T.A., Petrov N.A. Isxodnye i transformirovannye diagrammy deformirovaniya betona i armatury // Sb. tr. «Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie betonnyx i zhelezobetonnyx konstrukcij», M. NIIZhB, 1986. Pp. 7-25.
6. Mixajlov V.V. Raschet prochnosti normal'nyx sechenij izgibaemyx elementov s ucheto polnoj diagrammy deformirovaniya betona // Beton i zhelezobeton. 1993. No. 3. Pp. 26.
7. Zalesov A.S., Chistyakov E.A., Laricheva I.Yu. Deformacionnaya raschetnaya model' zhelezobetonnyx elementov pri dejstvii izgibayushhix momentov i prodol'nyx sil // Beton i zhelezobeton, 1996.
8. Murashkin G.V., Mordovskij S.S. Primenenie diagramm deformirovaniya dlya rascheta nesushhej sposobnosti vncentrenno szhatyx zhelezobetonnyx elementov // Zhilishhnoe stroitel'stvo. Moskva, 2013. No. 3. Pp. 38-40.
9. Majorov V.I., Racirinu De Russel' Zh. Issledovanie i analiticheskoe opisanie diagrammy raboty betona pri raschete zhelezobetonnyx konstrukcij po deformacionnoj modeli // Vestnik RUDN, seriya Inzhenernye issledovaniya. 2000. No. 3. Pp. 97-102.
10. Mixajlov V.V., Emel'yanov M.P., Dudoladov L.S., Mitasov V.M. Nekotorye predlozheniya po opisaniyu diagrammy deformacij betona pri zagruzhennii // Izv. vuzov. Ser.: Str-vo i arxitektura. 1983. No. 2. Pp. 23-27.
11. Murashkin G. V., Murashkin V. G. Modelirovanie diagrammy deformirovaniya betona i sxemy NDS // Izv. vuzov. Ser.: Str-vo i arxitektura. 1997. No. 10. Pp. 4-6.
12. Babich E. M., Krus' Yu. A., Garniczkiy Yu. V. Novye approksimacii zavisimosti «napryazheniya-deformacii», uchityvayushhie nelinejnost' deformirovaniya betonov // Izv. vuzov. Ser.: Str-vo i arxitektura. 1996. No. 2. Pp. 39-44.
13. Karpenko N.I., Ery'shev V.A., Laty'sheva E.V. Metodika rascheta parametrov deformirovaniya betona pri razgruzke s napryazhenij szhatiya // Vestnik MGSU. 2014. No. 3. Pp. 168-178.
14. Sovgira V.V. Polnye ravnovesnye diagrammy deformirovaniya odnoosno szhatogo i rastyanutogo betona // Problemy sovremennogo betona i zhelezobetona. Minsk. 2016. V. 8. Pp. 270-289.
15. Nazarenko V. G., Borovskix A.V. Diagramma deformirovaniya betonov s ucheto nispadayushhej vetvi // Beton i zhelezobeton. 1999. No. 2. Pp. 18-22.
16. Dzyuba R.R. Issledovanie diagramm deformirovaniya betona dlya rascheta zhelezobetonnyx konstrukcij // Simvol nauki. 2016. No. 3. Pp. 42-45.
17. Bondarenko V.M., Rimshin V.I. Kvazilinejnye uravneniya silovogo soprotivleniya i diagramma $\sigma-\epsilon$ betona // Stroitel'naya mexanika inzhenernyx konstrukcij i sooruzhenij. 2014. No. 6. Pp. 40-44.
18. Karpenko S.N., Karpenko N.I., Yarmakovskij V.N. Diagrammnyj metod rascheta sterzhnevnyx zhelezobetonnyx konstrukcij, ekspluatiruemyx pri vozdejstvii nizkix klimaticheskix (do -70 °C) i texnologicheskix (do -150 °C) temperatur // Stroitel'nye nauki. 2017. No. 1. Pp. 104-108.
19. Almazov V.O. Proektirovanie zhelezobetonnyx konstrukcij po EVRONORMAM. Nauchnoe izdanie. – M.: Iz-vo ASV. Stroitel'stvo i arxitektura. 2011. 216 p.
20. Strulev V.M., Yarkin R.A. O sovremennyx metodax obespecheniya dolgovechnosti zhelezobetonnyx konstrukcij // Vestnik TGTU. 2003. T. 9. No. 2. Pp. 277-281.
21. Karpenko N.I., Karpenko S.N., Yarmakovskij V.N., Erofeev V.T. O sovremennyx metodax obespecheniya dolgovechnosti zhelezobetonnyx konstrukcij // Academia. Arxitektura i stroitel'stvo. 2015. No. 1. Pp. 93-103.

22. Pinus B.I., Pinus Zh.N., Xomyakova I.V. Izmenenie konstruktivny`x svoystv betonov pri oxlazhdenii i zamorazhivanii // Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta. 2015. No. 2(97). Pp. 111-116.
23. Istomin A.D., Nazarov T.A. Vliyanie prirodny`x ciklov zamorazhivaniya — ottaivaniya na prochnost` i deformativnost` betona // Tekhnologiya tekstil`noj promy`shlennosti. 2019. No. 3(381). Pp. 52-56.

Информация об авторе:

Истомин Андрей Дмитриевич

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

E-mail: nauka.07@mail.ru

Information about author:

Istomin Andrey D.

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia, candidate of technical sciences, associate professor of the department «Reinforced concrete and stone structures».

E-mail: nauka.07@mail.ru

Т.А. МАЦЕЕВИЧ¹, И.Ф. АНДРЕЕВ¹¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

ФУНКЦИЯ НАДЕЖНОСТИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННОЙ КОРРОДИРОВАННОЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ БАЛКИ ПРИ НЕЛИНЕЙНОМ РАСПРОСТРАНЕНИИ КОРРОЗИИ

Аннотация. В статье рассматривается функция предельного состояния в контексте анализа надежности корродированных балок. Обсуждаются методы определения предельной нагрузки для балок, подверженных коррозии. Рассматриваются различные подходы к определению функции предельного состояния, в том числе базирующиеся на статистических данных о коррозии и моделировании напряжений в железобетонной балке. Общая модель оценки надежности железобетонных конструкций должна включать распространение коррозии. Большинство предыдущих исследований были сосредоточены на проблемах одномерной диффузии с предполагаемой постоянной скоростью коррозии. Нелинейная модель скорости коррозии, в отличие от линейных моделей, рассматривает плотность тока коррозии не постоянной в течение срока службы железобетонной конструкции. Разработан подход к анализу надежности вместе с нелинейной моделью роста коррозии. В данной статье рассмотрены основные проблемы, связанные с надежностью при нелинейной модели коррозии преднапряженного арматурного каната железобетонных балок. Представлена функция уменьшения диаметра стержня арматуры от времени. Проведен анализ чувствительности для определения влияния параметров роста коррозии на индекс надежности железобетонной тавровой балки. Нелинейная модель роста коррозии вместе с другими соответствующими вероятностными моделями, используемыми для описания случайных переменных, была применена для анализа надежности железобетонной подкрановой балки. Выражение плотности тока коррозии показывает, что скорость коррозии увеличивается экспоненциально при увеличении значения расчетного параметра модели. Для дальнейшей оценки влияния предложенной модели роста коррозии по времени на надежность железобетонной балки рассматриваются два конкретных случая. Первый - с фиксированной плотностью тока коррозии, второй - с фиксированным ростом коррозии в заданное время.

Ключевые слова: функция надежности, плотность тока, нелинейное распространение коррозии, надежность, предельное состояние.

Т.А. MATSEEVICH¹, I.F. ANDREEV¹¹National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

RELIABILITY FUNCTION OF A PRESTRESSED CORRODED REINFORCED CONCRETE BEAM WITH NONLINEAR CORROSION PROPAGATION

Abstract. The paper considers the limit state function in the context of reliability analysis of corroded beams. Methods for determining the ultimate load limit for corroded beams are discussed. Various approaches to the determination of the limit state function are considered, including those based on statistical data on corrosion and modelling of stresses in a reinforced concrete beam. A general reliability assessment model for reinforced concrete structures should include corrosion propagation. Most previous studies have focused on one-dimensional diffusion problems with an assumed constant corrosion rate. A nonlinear corrosion rate model, unlike linear models, considers the corrosion current density not constant over the service life of a reinforced concrete structure. An approach to reliability analysis together with a nonlinear corrosion growth model is developed. In this paper, the main problems related to reliability under a nonlinear model of prestressed reinforcement rope corrosion of reinforced concrete beams are discussed. A function for the reduction of reinforcing

bar diameter from time is presented. Sensitivity analysis is performed to determine the effect of corrosion growth parameters on the reliability index of reinforced concrete T-beam. The nonlinear corrosion growth model, together with other relevant probabilistic models used to describe random variables, was applied to analyze the reliability of a reinforced concrete crane girder. The expression of corrosion current density shows that the corrosion rate increases exponentially as the value of the design parameter of the model increases. To further evaluate the effect of the proposed time corrosion growth model on the reliability of reinforced concrete beam, two specific cases are considered. The first one is with fixed corrosion current density, and the second one is with fixed corrosion growth at a given time.

Keywords: reliability function, current density, non-linear corrosion propagation, reliability, limit state.

Введение

Надежность и конструктивная безопасность корродированных железобетонных элементов связана со многими параметрами процесса коррозии, с их распределением и является сложной инженерной и научной задачей [1-4].

Коррозия арматурной стали – одно самых распространенных повреждений железобетонных конструкций различных перекрытий в эксплуатационный период. Процесс коррозии арматуры в щелочной среде бетона сразу не возможен и вызван нарушением условий эксплуатации, интенсивностью агрессивной среды, снижением защитных свойств бетона, ошибками проектирования и дефектами изготовления конструкций. При этом существенно снижается и эксплуатационный ресурс конструкций [5-10].

Рост коррозии часто моделируется как линейная функция времени, поскольку плотность тока коррозии принимается постоянной. Такое предположение может быть необоснованным, т.к. было замечено, что плотность тока коррозии может не быть инвариантной величиной во времени [11-15]. Рассматриваемая модель основана на предположении, что плотность тока коррозии является экспоненциальной функцией времени [16-18].

Методы исследования

Предложено оценивать надежность конструкции резервом прочности, выражаемым неравенством (1)

$$S = R - Q > 0, \quad (1)$$

где R и Q случайные величины прочности конструкции и нагрузки.

В общем случае функция предельного состояния S (рисунок 1) может быть функцией от n основных переменных $x_1, x_2, \dots, x_n$ (компоненты нагрузки, факторы влияния, параметры сопротивления, свойства материала, размеры) (2):

$$S(x) = S(x_1, x_2, \dots, x_n) > 0, \quad (2)$$

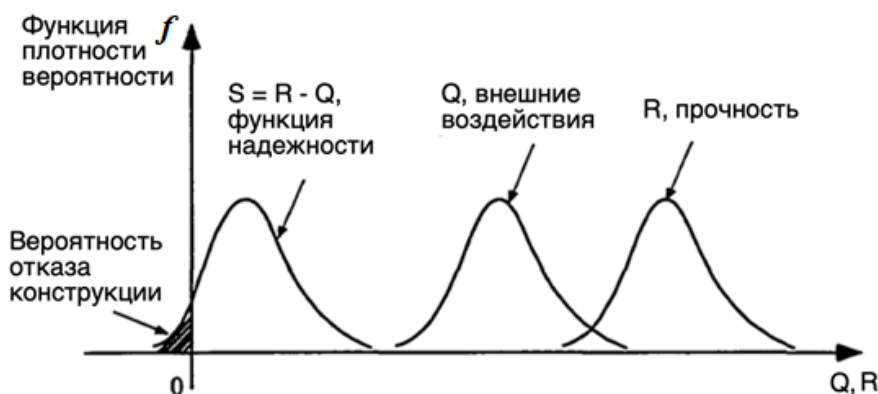


Рисунок 1 - Функция предельного состояния S

Коэффициентом запаса считается детерминированная величина, равная отношению математического ожидания прочности и нагрузки (3):

$$\xi = R/Q. \quad (3)$$

Также индекс надежности находится отношением математического ожидания функции к его стандартному отклонению [5, 18]. Учитывая, что данные функции имеют нормальное распределение, имеем (4):

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_E}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_E^2}} \quad (4)$$

где μ_R – математическое ожидание сопротивления конструкции; μ_E – математическое ожидание нагрузки на конструкцию; σ_R – среднее квадратичное отклонение (СКО) сопротивления конструкции; σ_E – СКО нагрузки на конструкцию.

Распространение или рост коррозии обычно выражается в терминах скорости коррозии r_c , или плотности тока коррозии i_{corr} , в соответствии с соотношением между r_c и i_{corr} . i_{corr} , полученным в [13, 17-19], является измерением общего тока, протекающего в потенциало-статических контролируемых арматурных стержнях, и, следовательно, измеряются только средние значения. Поэтому i_{corr} является измерением равномерной или общей коррозии, которая представляет собой приблизительно равномерную потерю металла по всей открытой поверхности арматурного стержня.

1. Модель сопротивления при изгибе.

Сопротивление изгибу M_r балок с напрягаемой арматурой можно записать следующим образом (5):

$$M_r = A_{sp} \sigma_y (h_0 - A_s \sigma_y / 2 \alpha_1 R_b b), \quad (5)$$

где A_{sp} – площадь напрягаемой арматуры;

σ_y – предел текучести арматуры;

R_b – прочность бетона;

h_0 – рабочая высота сечения;

b – ширина сечения элемента;

α_1 – отношение максимального напряжения к призмочной прочности бетона R_b ($\alpha_1 = 0,85 - 0,0015 R_b \geq 0,67$).

2. Распространение коррозии

На основании исследований [13] диаметр корродирующего арматурного стержня $D(t)$ в момент времени t может быть оценен непосредственно по i_{corr} как (6)

$$D(t) = D_0 - \int r_c dt = D_0 - 0,232 \int i_{corr} dt. \quad (6)$$

Математическое выражение модели плотности тока коррозии, изменяющейся во времени, имеет вид (7)

$$i_{corr} = \alpha (\Delta t)^\gamma = \alpha (t - t_i)^\gamma, \quad t \geq t_i, \quad (7)$$

где α и γ – параметры модели.

Когда значения i_{corr} измеряются в момент времени t_i , $i = 1, \dots, n$, α и γ могут быть определены по этим значениям с помощью нелинейного регрессионного анализа. Эти измеренные данные также могут быть использованы для оценки неопределенности в α и γ .

Получаем функцию уменьшения диаметра стержня арматуры в момент времени t (8)

$$D(t) = \begin{cases} D_0 - \frac{0,0232 \alpha (t - t_i)^{\gamma+1}}{\gamma + 1}, & t \geq t_i; \\ D_0, & t < t_i \end{cases} \quad (8)$$

3. Функция предельного состояния $S(x, q, t)$ для анализа надежности корродированной железобетонной балки по [20] может быть записана как (9)

$$S(x, q, t) = R(t, x) - Q. \quad (9)$$

На основе этой модели можно получить функцию сопротивления изгибающего элемента при действии коррозии:

$$R(t, x) = (\xi_B A_s(t) f_v \left(d(t) - \frac{A_s(t) R_s}{2 \alpha_s R_{pb}} \right) - D) / \zeta, \quad (10)$$

где $d(t)$ - эффективный диаметр напрягаемой арматуры в момент времени t , который уменьшается под действием коррозии.

Площадь напрягаемой арматуры в момент времени t , $A_{sp}(t)$

$$A_{sp}(t) = \sum \pi (D_j(t))^2 / 4, \quad (11)$$

$$D_j(t) = D_{j0} - \frac{0,0232 \alpha (t - t_\mu)^{\gamma+1}}{\gamma + 1} \quad (12)$$

$$t_\mu = \begin{cases} \frac{1}{2D_0} (x / \Phi^{-1}(\frac{C_{cr}}{2C_0}))^2 & \text{для } C_{cr} \leq C_0; \\ \infty & \text{для } C_{cr} > C_0. \end{cases} \quad (13)$$

В уравнениях (10-12) $A_{sp}(t)$ представляет собой суммарную площадь каждого продольного арматурного стержня; D_{j0} - диаметр j -го арматурного стержня не подверженного коррозии; $D_j(t)$ - диаметр j -го арматурного стержня в момент времени t ; t_μ - время начала коррозии j -го арматурного стержня.

Результаты исследования

Используя функции предельного состояния, можно численно оценить вероятности отказа. Вопрос расчета индекса надежности в зависимости от коэффициента вариации прочности подробно рассмотрен в [21, 22].

Как показано в уравнении (12), модель имеет два параметра α и γ . Был проведен анализ чувствительности для определения влияния этих двух параметров роста коррозии на индекс надежности железобетонной тавровой балки.

Влияние среднего значения α на индекс надежности балки показано на рисунке 2. Из рисунка 2 следует, что с увеличением среднего значения α индекс надежности балки в определенный момент времени уменьшается почти пропорционально, поскольку более высокое значение α означает более высокую скорость распространения коррозии, а между α и скоростью коррозии существует линейная зависимость.

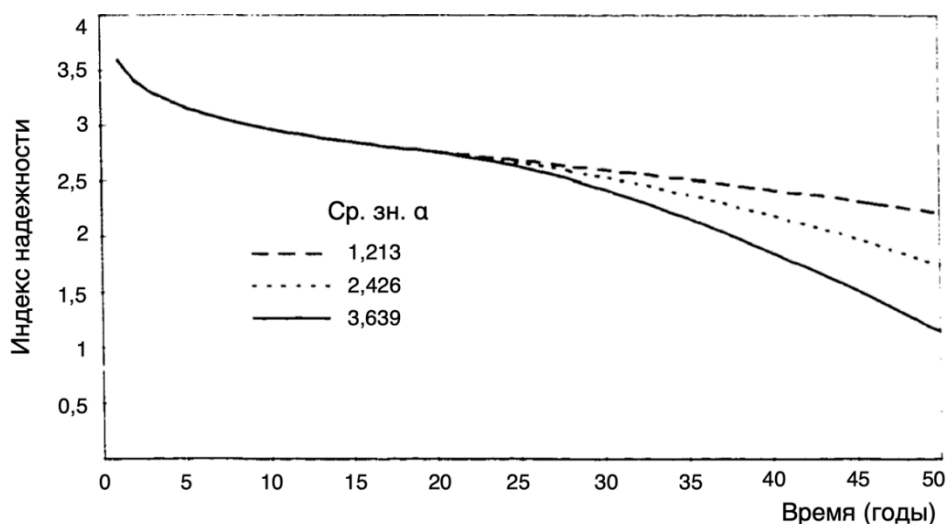


Рисунок 2 - Влияние α на индекс надежности

В данном исследовании γ рассматривается как детерминированная величина. Влияние величины γ на надежность балки показано на рисунке 3. Из рисунка видно, что надежность балки в данный момент времени очень быстро уменьшается с увеличением значения γ . Выражение плотности тока коррозии показывает, что скорость коррозии увеличивается

экспоненциально при увеличении значения γ . Результаты, представленные на рисунке 3, показывают, что γ оказывает наиболее сильное влияние на надежность балки. Однако во многих исследованиях, например в [14], γ была принята равной нулю и, соответственно, использовалась постоянная скорость коррозии, что может серьезно недооценить понижение надежности бетонной конструкции под воздействием коррозии.

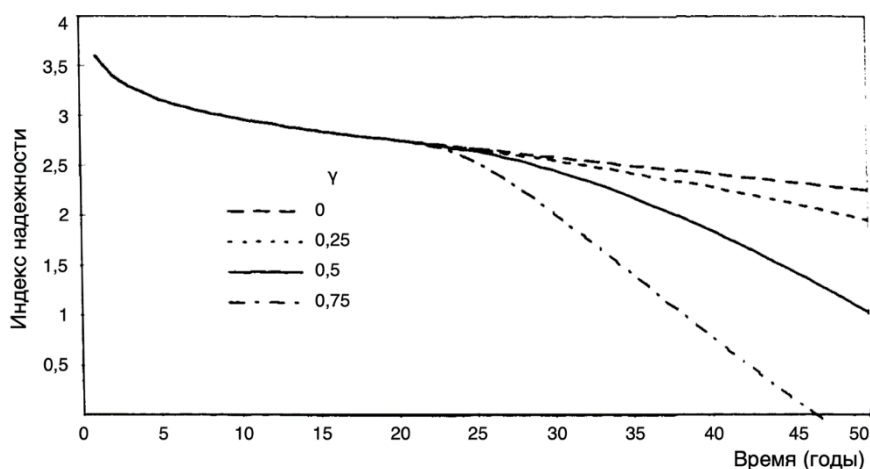


Рисунок 3 - Влияние γ на индекс надежности

Для дальнейшей оценки влияния предложенной модели роста коррозии по времени на надежность железобетонной балки рассматриваются два конкретных случая. Первый - с фиксированной плотностью тока коррозии, второй - с фиксированным ростом коррозии в заданное время (см. уравнение (13)).

Для первого случая выбираются различные наборы значений α и γ таким образом, чтобы использование каждого набора значений в модели приводило к одинаковой плотности тока коррозии $6,36 \text{ } \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Четыре набора значений (α и γ) определены через сочетания $(6,36; 0)$, $(3,09; 0,25)$, $(1,5; 0,5)$ и $(0,73; 0,75)$. Анализ надежности был проведен для периода эксплуатации до 75 лет. Результаты анализа показаны на рисунке 4. Из рисунка видно, что срок службы балки можно разделить на две фазы после начала коррозии. В первой фазе модель коррозии с наименьшим значением γ дает наименьшую надежность, в то время как модель коррозии с наибольшим значением γ дает наибольшую надежность балки. Во второй фазе ситуация прямо противоположная.

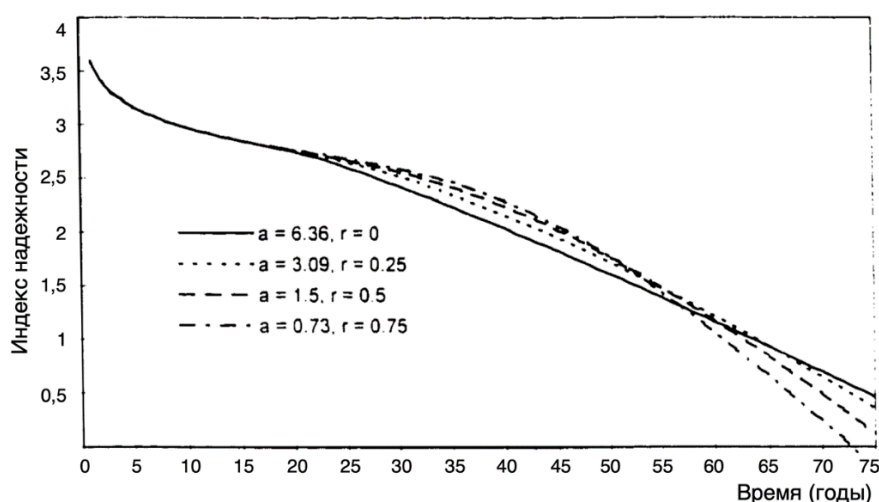


Рисунок 4 - Влияние различных комбинаций α и γ на индекс надежности при одинаковой плотности тока

Для второго случая фиксированный рост коррозии составляет 2 мм потери диаметра при 35-летнем сроке для всех арматурных стержней, подвергающихся коррозии, а защитный

слой составляет 50 мм. Четыре набора (α и γ), выбранные в данном случае, следующие: (4,77; 0), (2,89; 0.25), (1,69; 0.5) и (0,95; 0.75). Результаты анализа показаны на рисунке 5. Рисунок 5 показывает, что индекс надежности балки также может быть разделена на две фазы после начала коррозии и может быть получен аналогичный вывод, как и в вышеприведенном случае. Однако, в отличие от приведенного выше случая, надежность балки с различными моделями коррозии достигает одинакового значения в 35 лет, что означает, что все временные периоды первой фазы находятся между началом коррозии и 35 годами.

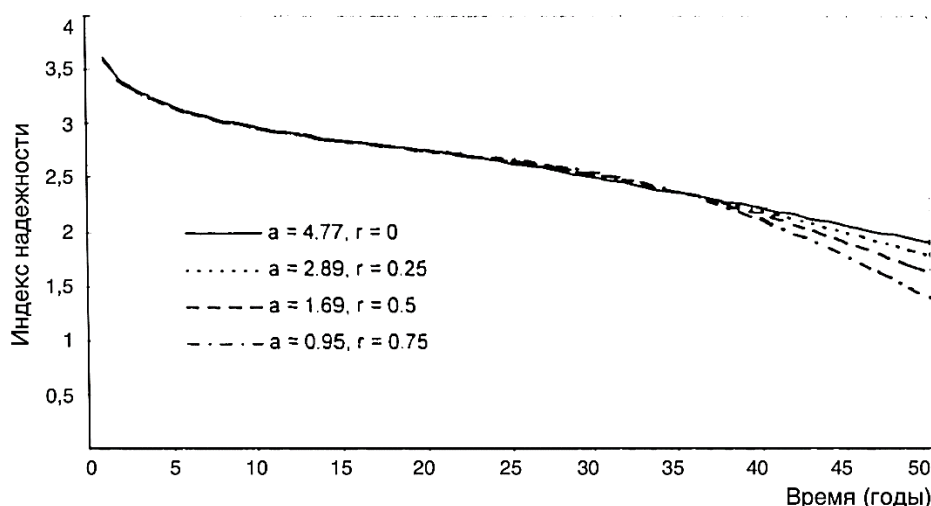


Рисунок 5 - Влияние различных комбинаций α и γ на индекс надежности при фиксированном росте коррозии

Полученные результаты показывают, что надежность балки в зависимости от времени сильно зависит от значений α и γ . Снижение надежности в краткосрочном периоде более чувствительно к значению α , в то время как в долгосрочном периоде оно сильно зависит от значения γ .

Заключение

1. Параметры модели роста коррозии γ и α имеют большое влияние на расчетную надежность.
2. Коэффициент вариации α имеет умеренное влияние на надежность.
3. Коэффициент γ больше влияет на долгосрочную надежность, в то время как α больше влияет на относительно короткий период.
4. Для дальнейшего анализа этих параметров необходимы экспериментальные исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Меркулов С.И. Развитие теории конструктивной безопасности объектов в условиях коррозионных воздействий // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2014. № 3. С. 44-46.
2. Tamrazyan A.G., Koroteev D.D. [Assessment of the durability of corrosion-damaged prefabricated reinforced concrete structures](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1687/1/012009) // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1687. Pp. 012009. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1687/1/012009>.
3. Смоляго Г.А., Дронов В.И., Дронов А.В., Меркулов С.И. Изучение влияния дефектов железобетонных конструкций на развитие коррозионных процессов арматуры // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 12. С. 49-51. https://doi.org/10.12737/article_5c506209065dd6.02007715.
4. Nogueira K.G., Leonel E.D., Coda H.B. Reliability algorithms for assessing the durability of reinforced concrete structures // Journal of IBRACON Structures and Materials. 2012. Vol. 5. No. 4. Pp. 440-450.
5. Тамразян А.Г., Мацеевич Т.А. Анализ надежности железобетонной плиты с корродированной арматурой // Строительство и реконструкция. 2022. № 1 (99). С. 89-98. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2022-99-1-89-98>.

6. Меркулов С.И., Дворников В.М., Пахомова Е.Г. Работоспособность железобетона в условиях воздействия агрессивных сред // Строительные материалы, оборудование и технологии XXI века. 2006. № 10. С. 10.
7. Ягулов Б.А., Мигаль Р.Е. К вопросу оценки несущей способности эксплуатируемых железобетонных конструкций, поврежденных коррозией // Бетон и железобетон. 2007. № 3. С. 28-30.
8. Тамразян А.Г., Попов Д.С. Напряженно-деформированное состояние коррозионно-поврежденных железобетонных элементов при динамическом нагружении // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 2. С. 19-26.
9. Ting S.C., Nowak A.S. Effect of reinforcing steel area loss on flexural behavior of reinforced concrete beams. *ACI Structural Journal*, 88(3), 1991.
10. Lushnikova V.Y., Tamrazyan A.G. The effect of reinforcement corrosion on the adhesion between reinforcement and concrete // *Magazine of Civil Engineering*. 2018. № 4(80). Pp. 128-137. <https://doi.org/10.18720/MCE.80.12>.
11. Browne R.D. Mechanisms of Corrosion of Steel in Relation to Design, Inspection, and Repair of Offshore and Coastal Structure. ACISP-65, U.S. Detroit.
12. Andrade C. Calculation of Chloride Diffusion Coefficients in Concrete from Ionic Migration Measurements. *Cement and Concrete Research*. 1993. Vol. 23. Pp. 724-742. doi:10.1016/0008-8846(93)90023-3.
13. Мацеевич Т.А., Андреев И.Ф. Конечно-элементная модель диффузии хлорида в предварительно напряженной корродированной арматуре железобетонных конструкций // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 11. С. 1462–1470. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2022.11.1462-1470>.
14. Frangopol D.M., Lin K.Y., Estes A.C. Reliability of Reinforced Concrete Girders Under Corrosion Attack // *Journal of Structural Engineering*. 1997. Vol. 123. No. 3. Pp. 286-297.
15. Fu X., Chung D.D.L. Effect of corrosion on the bond between concrete and steel rebar // *Cement and Concrete Research*. 1997. Volume 27. Issue 12. Pp. 1811-1815. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(97\)00172-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(97)00172-5).
16. Tuutti K. Service Life of Structures with Regard to Corrosion of Embedded Steel, Quality Control. *Concrete Structures*. 1980. Vol. 1. Pp. 293-301.
17. Atkinson A., Hearne J.A. Mechanistic Model for the Durability of Concrete Barriers Exposed to Sulphate-Bearing Groundwaters. MRS Online Proceedings Library. 1989. Vol. 176. Art.n. 149. <https://doi.org/10.1557/PROC-176-149>.
18. Stewart M.G., Rosowsky D.V. Time dependent reliability deteriorating reinforced concrete bridge decks // *Structural Safety*. 1998. Vol. 20. Issue 1. Pp. 91-109. [https://doi.org/10.1016/S0167-4730\(97\)00021-0](https://doi.org/10.1016/S0167-4730(97)00021-0).
19. Ting S.-C. The effects of corrosion on the reliability of concrete bridge girders. Dissertation of the University of Michigan, 1989. [https://doi.org/10.1016/0167-4730\(89\)90007-6](https://doi.org/10.1016/0167-4730(89)90007-6).
20. Ржаницын А.Р. Теория длительной прочности при произвольном одноосном и двухосном нагружении // *Строительная механика и расчет сооружений*. 1975. № 4. С. 25-29.
21. Тамразян А.Г., Мацеевич Т.А. Надежностная оптимизация конструкций с учетом неопределенностей при проектировании // Актуальные проблемы строительной отрасли и образования - 2022. Сборник докладов Третьей Национальной научной конференции. Москва, 2023. С. 50-54.
22. Тамразян А.Г. Методология анализа и оценки надежности состояния и прогнозирование срока службы железобетонных конструкций // *Железобетонные конструкции*. 2023. Т. 1. № 1. С. 5-18.

REFERENCES

1. Merkulov S.I. Razvitiye teorii konstruktivnoy bezopasnosti ob"yektov v usloviyakh korrozionnykh vozdeystviy [Development of the theory of constructive safety of objects in the conditions of corrosion impacts]. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova*. 2014. No. 3. Pp. 44-46.
2. Tamrazyan A.G., Koroteev D.D. Assessment of the durability of corrosion-damaged prefabricated reinforced concrete structures // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1687. Pp. 012009. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1687/1/012009>.
3. Smolyago G.A., Dronov V.I., Dronov A.V., Merkulov S.I. Investigation Of Influence Of Defects Of Reinforced Concrete Structures On Corrosion Processes Of Steel Reinforcement. *Proyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2014. No. 12. Pp. 49-51. https://doi.org/10.12737/article_5c506209065dd6.02007715.
4. Nogueira K.G., Leonel E.D., Coda H.B. Reliability algorithms for assessing the durability of reinforced concrete structures. *Journal of IBRACON Structures and Materials*. 2012. Vol. 5. No. 4. Pp. 440-450.
5. Tamrazyan A.G., Matseevich T.A. Reliability analysis of reinforced concrete slabs with corroded reinforcements. *Building and Reconstruction*. 2022. No. 1(99). Pp. 89-98. (in russ.) <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2022-99-1-89-98>
6. Merkulov S.I., Dvornikov V.M., Pakhomova E.G. Performance of reinforced concrete under the influence of aggressive media // *Construction materials, equipment and technologies of the XXI century*. 2006. No. 10. Pp. 10. (in russ.)
7. Yagupov B.A., Migal R.E. On the issue of assessing the bearing capacity of operated reinforced concrete structures damaged by corrosion // *Concrete and reinforced concrete*. 2007. No. 3. Pp. 28-30. (in russ.)

8. Tamrazyan A.G., Popov D.S. Stress-strain state of corrosion-damaged reinforced concrete elements under dynamic loading. *Industrial and civil construction*. 2019. No. 2. Pp. 19-26. (in russ.)
9. Ting S.C., Nowak A.S. Effect of reinforcing steel area loss on flexural behavior of reinforced concrete beams. *ACI Structural Journal*, 88(3), 1991.
10. Lushnikova V.Y., Tamrazyan A.G. The effect of reinforcement corrosion on the adhesion between reinforcement and concrete // *Magazine of Civil Engineering*. 2018. No. 4(80). Pp. 128-137. <https://doi.org/10.18720/MCE.80.12>.
11. Browne R.D. Mechanisms of Corrosion of Steel in Relation to Design, Inspection, and Repair of Offshore and Coastal Structure. ACISP-65, U.S. Detroit.
12. Andrade C. Calculation of Chloride Diffusion Coefficients in Concrete from Ionic Migration Measurements. *Cement and Concrete Research*. 1993. Vol. 23. Pp. 724-742. doi:10.1016/0008-8846(93)90023-3.
13. Matseevich T.A., Andreev I.F. The finite element model of chloride diffusion in pre-stressed corroded reinforcement bars of reinforced concrete structures. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2022. T. 17(11). Pp. 1462-1470. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2022.11.1462-1470> (in russ.)
14. Frangopol D. M., Lin K. Y., Estes A. C. Reliability of Reinforced Concrete Girders Under Corrosion Attack // *Journal of Structural Engineering*. 1997. Vol. 123. No. 3. Pp. 286-297.
15. Fu X., Chung D.D.L. Effect of corrosion on the bond between concrete and steel rebar // *Cement and Concrete Research*. 1997. Volume 27. Issue 12. Pp. 1811-1815. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(97\)00172-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(97)00172-5).
16. Tuutti K. Service Life of Structures with Regard to Corrosion of Embedded Steel, Quality Control. *Concrete Structures*. 1980. Vol. 1. Pp. 293-301.
17. Atkinson A., Hearne J.A. Mechanistic Model for the Durability of Concrete Barriers Exposed to Sulphate-Bearing Groundwaters. *MRS Online Proceedings Library*. 1989. Vol. 176. Art.n. 149. <https://doi.org/10.1557/PROC-176-149>.
18. Stewart M.G., Rosowsky D.V. Time dependent reliability deteriorating reinforced concrete bridge decks. *Structural Safety*. 1998. Vol. 20. Issue 1. Pp. 91-109. [https://doi.org/10.1016/S0167-4730\(97\)00021-0](https://doi.org/10.1016/S0167-4730(97)00021-0).
19. Ting S.-C. The effects of corrosion on the reliability of concrete bridge girders. Dissertation of the University of Michigan, 1989. [https://doi.org/10.1016/0167-4730\(89\)90007-6](https://doi.org/10.1016/0167-4730(89)90007-6)
20. Rzhanytsyn A. R. Teoriya dlitel'noy prochnosti pri proizvol'nom odnoosnom i dvukhosnom zagruzhении [Theory of long-term strength for arbitrary uniaxial and biaxial loading]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy*. 1975. No 4. Pp. 25-29.
21. Tamrazyan A.G., Matseyevich T.A. Nadezhnostnaya optimizatsiya konstruksiy s uchetom neopredelennostey pri proyektirovanii [Reliability optimization of structures taking into account uncertainties in design]. *Aktual'nyye problemy stroitel'noy otrasli i obrazovaniya - 2022. Sbornik dokladov Tret'yey Natsional'noy nauchnoy konferentsii [Actual problems of the construction industry and education - 2022. Collection of reports of the Third National Scientific Conference.]*. Moscow, 2023. Pp. 50-54.
22. Tamrazyan A.G. Methodology for the Analysis and Assessment of the Reliability of the State and Prediction the Service Life of Reinforced Concrete Structures. *Reinforced concrete structures*. 2023. T. 1(1). Pp. 5-18. (in russ.)

Информация об авторах:

Мацевич Татьяна Анатольевна

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,
доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры высшей математики.
E-mail: MatseevichTA@mgsu.ru

Андреев Илья Федорович

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

Information about authors:

Matseevich Tatyana A.

National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Moscow, Russia,
doctor of physical and mathematical sciences, associate professor, professor of the department of Higher Mathematics.
E-mail: MatseevichTA@mgsu.ru

Andreev Ilya F.

National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Moscow, Russia,
postgraduate student of the department of Reinforced Concrete and Stone Structures.
E-mail: yfyf@gmx.com

В.Г. СЕБЕШЕВ¹, Е.К. ЛУКИН¹¹ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)»,
г. Новосибирск, Россия

НАДЕЖНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ТРУБЧАТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ НЕРАВНОМЕРНЫХ КОРРОЗИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЯХ

Аннотация. Современные подходы и требования к проектированию и экспертной оценке состояния зданий и сооружений предписывают определение количественных показателей их надежности. Этим обусловлена актуальность вопросов разработки методик расчетов надежности строительных систем с учетом их свойств и условий работы.

Коррозионные повреждения элементов металлических конструкций могут с течением времени приводить к утрате их работоспособности. Цель исследований, представленных в статье, – выявление и количественные описания изменения во времени характеристик надежности, по критерию прочности, первоначально центрально растягиваемого стального стержневого конструктивного элемента кольцевого сечения с учетом неравномерного коррозионного износа, вызывающего возникновение сложного сопротивления стержня – растяжения с изгибом. На основе предложенной пространственно-временной модели коррозии с использованием методов теории надежности построены расчетный аппарат и алгоритм определения надежности и долговечности элемента. Выполнены расчеты этих характеристик при варьировании стохастических свойств параметров геометрии сечения стержня, его напряженного состояния и модели коррозии при различных степенях агрессивности среды. Нагружение стержня моделировалось стационарной случайной функцией. Результаты расчетов надежности, вероятности отказа, коэффициента коррозии и временной плотности вероятности отказа представлены графиками зависимостей этих величин от времени.

Выполнены оценки влияния на надежность и долговечность конструктивного элемента основных расчетных характеристик стержня и модели коррозионных повреждений. Выявлен эффект значительного увеличения вероятности отказа и снижения долговечности при коррозионном износе, неравномерном по контуру сечения, в сравнении со случаем постоянной толщины слоя коррозии, при сопоставимых значениях коэффициентов коррозии.

Представленные в статье методика и результаты расчетов могут быть использованы для получения решений аналогичных задач в иных постановках (по форме сечения, модели коррозии, при нестационарных режимах нагружения и др.), а также для выполнения инженерных расчетов надежности при проектировании металлических конструкций.

Ключевые слова: надежность, долговечность, трубчатый стержень, неравномерная коррозия, сложное сопротивление, индекс надежности, вероятность отказа, коэффициент коррозии.

V.G. SEBESHEV¹, E.K. LUKIN¹¹Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Novosibirsk, Russia

RELIABILITY AND DURABILITY OF TUBULAR ELEMENTS OF STEEL STRUCTURES UNDER UNUNIFORM CORROSION DAMAGE

Abstract. Modern approaches and requirements for the design and expert assessment of the buildings and structures state require the quantitative determination of their reliability indicators. This determines the relevance of the development of methods for calculating the reliability of building systems, taking into account their properties and operating conditions.

Corrosion damage to elements of metal structures can lead to loss of their functionality over time. The purpose of the research presented in the article is to identify and quantitatively describe changes

over time in the reliability characteristics, according to the strength criterion, of an initially centrally tensile steel rod structural element of an annular section, taking into account uneven corrosive wear, which causes the occurrence of complex resistance of the rod, namely tension with bending. A calculation apparatus and an algorithm for determining the reliability and durability of an element were constructed using methods of reliability theory and the proposed spatio-time corrosion model. Calculations of these characteristics were carried out by varying the stochastic properties of the parameters of the rod's cross section geometry, its stress state and the corrosion model at various degrees of corrosion factor aggressiveness. The loading of the rod was modeled by a stationary random function. The results of calculations of reliability, failure probability, corrosion coefficient and time density of failure probability are presented in graphs of the dependences of these values on time.

The influence of the main design characteristics of the rod and the corrosion damage model on the reliability and durability of the structural element was assessed. The effect of a significant increase in the probability of failure and a decrease in durability with corrosion wear, uneven along the contour of the section, was revealed, in comparison with the case of a constant thickness of the corrosion layer, with comparable values of corrosion coefficients.

The methodology and calculation results presented in the article can be used to obtain solutions to similar problems in other formulations (by cross-sectional shape, corrosion model, under non-stationary loading conditions, etc.), as well as to perform engineering reliability calculations when designing metal structures.

Keywords: reliability, durability, tubular rod, ununiform corrosion, complex resistance, reliability index, probability of failure, corrosion coefficient.

Введение

Явление коррозии конструкционных материалов, в первую очередь стали, представляет собой существенную угрозу работоспособности элементов несущих систем зданий и сооружений. Изучению коррозии посвящены многочисленные исследования – как в отношении физико-химических особенностей процесса [1–7 и др.], так и в оценках влияния коррозионных повреждений на несущую способность конструкций [8–15 и др.]. Но современные требования обеспечения объективной оценки работоспособности сооружений и конструкций, их ресурса на разных этапах жизненного цикла и организации их обслуживания и ремонта, включая антикоррозионную защиту, определяют актуальность развития теории прямых вероятностных расчетов надежности и долговечности стальных строительных конструкций с учетом риска коррозии элементов в сложных условиях эксплуатации.

Цель исследования – решение прямой задачи расчета надежности и долговечности, по критерию прочности в упругой стадии работы материала, стального стержня кольцевого сечения, первоначально (до начала процесса коррозии) центрально растянутого, с учетом неравномерной внешней коррозии (см. рисунок 1), вследствие которой при сохранении исходного направления линии действия растягивающей силы в стержне (например, при его работе в составе фермы) возникает и увеличивается со временем эксцентриситет продольной силы и, соответственно, изгибающий момент в сечении. На рисунке 1 и далее в тексте символ $\tilde{\dots}$ обозначает случайную величину.

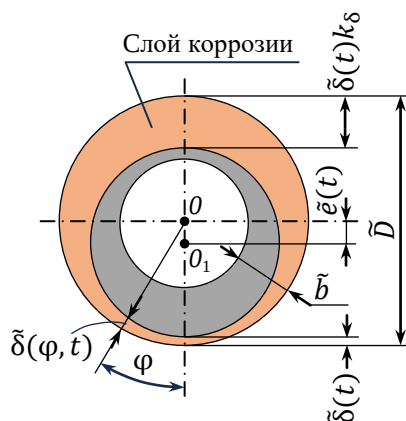


Рисунок 1 – Сечение стержня, пораженного коррозией
 $\tilde{D}$ и $\tilde{b}$ – исходные диаметр и толщина стенки трубы

Основные задачи:

- формирование рабочей модели стержня кольцевого сечения, испытывающего растяжение в исходном (проектном) состоянии и подвергающегося в процессе эксплуатации неравномерной наружной коррозии, инициирующей сложное сопротивление элемента – растяжение с изгибом;
- разработка методики расчета показателей надежности и долговечности конструктивного элемента, с учетом характеристик геометрии его сечения, вида напряженного состояния и параметров модели коррозии; получение количественных результатов;
- анализ и оценка влияния основных расчетных параметров, в том числе неравномерной коррозии, на надежность внецентренно растянутого стержня в сравнении со случаем равномерных по контуру сечения коррозионных повреждений.

Модели и методы

Постановка задачи расчета

Пространственно-временная стохастическая модель слоя металла, уничтоженного внешней коррозией (на рисунке 1 и в тексте для краткости используется термин «слой коррозии»), сформирована с использованием

а) формулы Гульдберга-Ваага [15] применительно к математическому ожиданию (МО) толщины слоя коррозии в точке $\varphi = 0$

$$\tilde{\delta}(t) = \delta_0(1 - e^{-\alpha t}) \quad (1)$$

(параметры δ_0 и α – по статистическим данным о процессах коррозии в различных условиях эксплуатации конструкций); зависимость (1) хорошо согласуется с результатами натурных наблюдений [1, 15];

б) предлагаемого авторами описания случайной толщины слоя:

$$\tilde{\delta}(\varphi, t) = \frac{1}{2} \left\{ \tilde{D} - \sqrt{[\tilde{D} - \tilde{z}(t) - 2\tilde{\delta}(t)]^2 - [\tilde{z}(t) \sin \varphi]^2} - \tilde{z}(t) \cos \varphi \right\}, \quad (2)$$

где $\tilde{z}(t) = \tilde{\delta}(t)(k_\delta - 1)$, что соответствует внутренней границе зоны коррозии в форме окружности диаметром $\tilde{D}(t) = \tilde{D} - \tilde{\delta}(t)(k_\delta + 1)$.

В (2) k_δ – коэффициент неравномерности толщины слоя коррозии (см. рисунок 1); $k_\delta \geq 0$.

Нагрузка, вызывающая внутренние силовые факторы в конструктивном элементе – стержне, представляется как стационарная случайная функция (рисунок 2 а), моделирующая усредненное вероятностное изменение расчетной нагрузки по годам (сезонам) эксплуатации (рисунок 2 б); возможный вариант – с завышением оценки вероятности отказа – по средним значениям частных максимумов (верхняя пунктирная линия на рисунке 2 б).

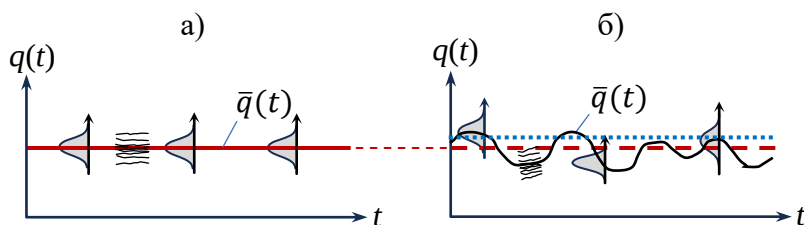


Рисунок 2 – Вероятностные временные модели нагрузки:
а) принятая в расчете, б) для реальных многолетних изменений
 $\bar{q}(t)$ – математическое ожидание нагрузки

Требуется установить зависимости от времени надежности/вероятности отказа, коэффициента коррозии и других стохастических характеристик состояния конструктивного элемента с использованием модели и исходных данных, описанных выше.

Решение

Применяя для расчета надежности метод проф. А.Р. Ржаницына [16–18], используем понятие резерва работоспособности:

$$\tilde{S}(t) = \tilde{R}(t) - \tilde{Q}(t), \quad (3)$$

где $\tilde{R}(t)$ и $\tilde{Q}(t)$ – соответственно обобщенная прочность (сопротивление, resistance) и нагрузочный фактор (load effect), в общем случае зависящие от времени t .

В данном решении входящая в (3) величина $\tilde{R}(t)$ – механическая характеристика материала (в соответствии с обозначенным выше прочностным условием предельного состояния – это предел упругости $\tilde{\sigma}_u(t)$), а роль $\tilde{Q}(t)$ играет наибольшее напряжение $\tilde{\sigma}(t)$ в расчетном сечении стержня, возникающее от заданных воздействий на конструкцию, в состав которой входит рассматриваемый элемент.

Надежность (вероятность безотказной работы по принятому критерию/условию работоспособности) находится как

$$P_s(t) = 1 - P_f(t), \quad (4)$$

где $P_f(t) = \int_{-\infty}^0 p_S[S(t)] dS$ – вероятность отказа;

$p_S[S(t)]$ – плотность вероятности резерва $\tilde{S}(t)$.

В предположении о нормальном распределении плотности $p_S[S(t)]$ вероятность отказа можно вычислять с помощью аппроксимации значений интеграла вероятности (функции Лапласа) [19], в частности, достаточно точной зависимостью [20]:

$$P_f(t) \approx 10^{-\{0,23[\beta(t)]^2 + 0,8\}}, \quad (5)$$

с предварительным определением $\beta(t)$ – индекса надежности (характеристики безопасности):

$$\beta(t) = \frac{\tilde{S}(t)}{\hat{S}(t)} = \frac{1}{A_S(t)} = \frac{1 - \xi(t)}{\sqrt{[A_R(t)]^2 + [\xi(t) A_Q(t)]^2 - 2\xi(t) r_{RQ}(t) A_Q(t) A_R(t)}}, \quad (6)$$

где $\tilde{S}(t)$, $\hat{S}(t)$ и $A_S(t)$ – соответственно математическое ожидание, стандарт и коэффициент вариации резерва $\tilde{S}(t)$;

$\xi(t) = \tilde{Q}(t)/\tilde{R}(t)$ – коэффициент нагруженности (приближения к расчетному предельному состоянию), $0 < \xi(t) < 1$;

$A_R(t)$, $A_Q(t)$, $r_{RQ}(t)$ – коэффициенты вариации (КВ) и корреляции случайных величин $\tilde{R}(t)$ и $\tilde{Q}(t)$.

МО и КВ сопротивления $\tilde{R}(t)$ здесь принимаются независимыми от времени ($\tilde{R}(t) = \bar{\sigma}_u(t) = \text{const}$, $A_R(t) = \text{const}$). Характеристику материала элемента $\bar{\sigma}_u(t)$ подбирают согласно ГОСТ 27772-2015 «Прокат для строительных стальных конструкций».

Случайная величина $\tilde{Q}(t) = \tilde{\sigma}(t)$ зависит от растягивающего усилия, являющегося, как и порождающая его нагрузка (см. выше), стационарной случайной функцией

$$\tilde{N}(t) = \pi \xi(0) \tilde{\sigma}_u \tilde{b} (\tilde{D} - \tilde{b}) \quad (7)$$

с инвариантным времени математическим ожиданием $\bar{N}(t) = \text{const} = \pi \xi(0) \bar{\sigma}_u \bar{b} (\bar{D} - \bar{b})$,

где $\xi(0)$ – начальный (при $t = 0$) коэффициент нагруженности (этим параметром опосредованно задается МО нагрузки – $\bar{q}(t)$).

Необходимые для определения напряжения $\tilde{\sigma}(t)$ геометрические характеристики работоспособной (не корродировавшей) части сечения в момент времени t :

– эффективная площадь:

$$\tilde{A}(t) = \pi \left\{ \tilde{b} (\tilde{D} - \tilde{b}) - \tilde{\sigma}(t) (1 + k_\delta) \left[\frac{\tilde{D}}{2} - \frac{\tilde{\sigma}(t)}{4} (1 + k_\delta) \right] \right\}; \quad (8)$$

– эксцентриситет как результат неравномерной коррозии (расстояние между центрами O и O_1 исходного и ослабленного сечений – см. рисунок 1):

$$\tilde{e}(t) = \frac{\tilde{D}(t)}{2} - \tilde{\delta}(t) - \tilde{y}_c(t), \quad (9)$$

где $\tilde{y}_c(t) = \frac{\tilde{D}(t)}{2} + \frac{\tilde{A}_d}{\tilde{A}(t)} \tilde{\delta}(t)$ - расстояние от центра тяжести эффективной части сечения до нижней (при $k_\delta > 1$) точки внутренней границы слоя коррозии;

$\tilde{A}_d = \frac{\pi}{4} (\tilde{D} - 2\tilde{b})^2$ - площадь сечения отверстия трубы;

- момент сопротивления ослабленного сечения:

$$\tilde{W}(t) = \frac{\tilde{I}(t)}{\tilde{y}_{max}(t)} = \frac{\frac{\pi}{64} \{ [\tilde{D}(t)]^4 - (\tilde{D} - 2\tilde{b})^4 \} - \tilde{A}_d [\tilde{e}(t)]^2}{\frac{\tilde{D}}{2} + \tilde{e}(t) - \tilde{\delta}(t) k_\delta}. \quad (10)$$

Напряжение в расчетной точке сечения трубчатого стержневого элемента, поврежденного коррозией, при внецентренном растяжении:

$$\tilde{\sigma}(t) = \tilde{\sigma}_N(t) + \tilde{\sigma}_M(t) = \frac{\tilde{N}}{\tilde{A}(t)} \left[1 + \frac{\tilde{A}(t) \tilde{e}(t)}{\tilde{W}(t)} \right]. \quad (11)$$

Коэффициент вариации $A_Q(t) \equiv A_\sigma(t)$ вычисляется через вероятностные характеристики напряжения: $A_\sigma(t) = \hat{\sigma}(t) / \bar{\sigma}(t)$, где стандарт $\hat{\sigma}(t)$ и МО $\bar{\sigma}(t)$ определяются методом статистической линеаризации [16, 17]:

$$[\hat{\sigma}(t)]^2 = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial \sigma(\{X(t)\})}{\partial x_i(t)} \Big|_{\{X(t)\}=\{\bar{X}(t)\}} \hat{x}_i(t) \right]^2; \quad \bar{\sigma}(t) = \sigma(\{\bar{X}(t)\}). \quad (12)$$

В (12) вектор случайных параметров $\{\tilde{X}(t)\} = \{\tilde{x}_1 \tilde{x}_2 \tilde{x}_3 \tilde{x}_4\} = \{\tilde{\sigma}_u \tilde{D} \tilde{b} \tilde{\delta}(t)\}$. Его элементы задаются математическими ожиданиями $\{\bar{X}(t)\} = \{\bar{\sigma}_u \bar{D} \bar{b} \bar{\delta}(t)\}$ и стандартами $\{\hat{X}(t)\} = \{\hat{\sigma}_u \hat{D} \hat{b} \hat{\delta}(t)\}$.

По алгоритму, реализующему вышеизложенную методику и расчетный аппарат, включающий зависимости и формулы (4) – (12), выполнены вычисления показателей надежности $\beta(t)$, $P_f(t)$ и $P_s(t)$ при варьировании времени t как параметра. Дополнительно определялся коэффициент, традиционно используемый в инженерных оценках эффекта коррозии:

$$k_{кор}(t) = \bar{A}_{кор}(t) / \bar{A}_0,$$

где $\bar{A}_{кор}(t)$ – МО площади сечения слоя коррозии; $\bar{A}_0$ – МО начальной площади сечения.

Результаты исследования и их анализ

Исходные данные, одинаковые для всех представленных далее разных комбинаций расчетных параметров:

а) $\bar{\sigma}_u = 245$ МПа; $A_{\sigma_u} = 0,06$; $A_D = 0,005$; $A_b = 0,01$; $A_{\delta(t)} = 0,1$; $\xi(0) = 0,7$;

б) параметры модели коррозии (1):

- для сильноагрессивной среды, при начальной скорости коррозии 0,15 мм/год (или среднеагрессивной при относительной влажности более 75 %) [21] –

$$\delta_0 = 0,25 \text{ см}; \alpha = 0,06 \text{ год}^{-1}, \text{ тогда } \bar{\delta}_{cul}(t) = 0,25(1 - e^{-0,06t});$$

- для слабоагрессивной среды, при начальной скорости 0,05 мм/год –

$$\delta_0 = 0,0833 \text{ см}; \alpha = 0,06 \text{ год}^{-1}; \bar{\delta}_{cul}(t) = 0,0833(1 - e^{-0,06t}).$$

Первая комбинация расчетных параметров – начальные геометрические характеристики сечения одинаковые – $\bar{D} = 14$ см, $\bar{b} = 1$ см; варьируется форма слоя коррозии за счет факторов конструктивного и эксплуатационного характера; воздействие окружающей среды на стержень – сильноагрессивное:

- вариант 1: равномерная коррозия ($k_\delta = 1$);

- вариант 2: неравномерная коррозия – сверху больше, чем снизу, разница в толщинах по контуру сечения небольшая ($k_\delta = 1,1$);

– вариант 3: неравномерная коррозия – сверху меньше, чем снизу, значительная разница в толщинах ($k_\delta = 1/3$).

Вариант 3 можно интерпретировать также как случай слабоагрессивной среды, но с эксплуатационным усилением коррозии снизу, например, из-за конденсата, стекающего вниз при горизонтальной ориентации стержня.

Результаты расчетов представлены на рисунке 3 в виде графиков зависимостей от времени надежности $P_s(t)$, вероятности отказа $P_f(t)$, индекса надежности $\beta(t)$ и коэффициента коррозии $k_{кор}(t)$.

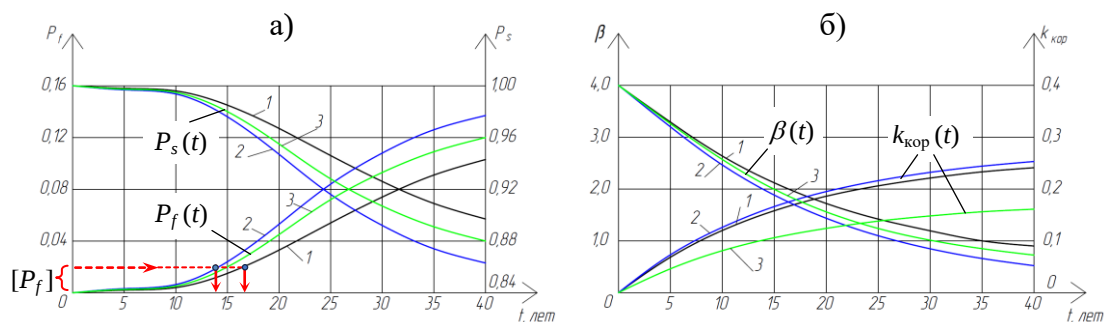


Рисунок 3 – Изменение во времени показателей надежности элемента при $\bar{D}/\bar{b} = 14$ и различных параметрах слоя коррозии (по вариантам 1, 2, 3) в случае сильноагрессивной среды:
 а) вероятность отказа $P_f(t)$ и надежность $P_s(t)$;
 б) индекс надежности $\beta(t)$ и коэффициент коррозии $k_{кор}(t)$

Анализ полученных данных позволяет отметить следующее:

– лучшие из всех показатели надежности дает вариант 1, в котором даже при достаточно высоком коэффициенте коррозии, сопоставимом с вариантом 2 (рисунок 3 б), напряженное состояние стержня – наиболее благоприятное ввиду отсутствия изгиба;

– для срока эксплуатации $t = 40$ лет в варианте 2 коэффициент коррозии на 5 % больше, чем в варианте 1 (из-за $k_\delta = 1,1$), а вероятность отказа на 33 % выше за счет реализующегося сложного сопротивления элемента – его внецентренного растяжения вследствие неравномерной коррозии;

– в варианте 3 наименьшие коррозионные потери металла – на 33 % меньше, чем в варианте 1, но при этом вероятность отказа на 16,5 % больше, так как сильная неравномерность слоя коррозии приводит к значительному увеличению со временем эксцентриситета продольной силы и возрастанию влияния изгиба элемента на напряжения в его сечениях.

Вторая комбинация расчетных параметров – при одном и том же типе воздействия окружающей среды (сильноагрессивном) и форме слоя коррозии со значительной неравномерностью толщины ($k_\delta = 1/3$) варьируются начальные геометрические характеристики сечения (относительная – $\bar{D}/\bar{b}$ и абсолютная $\bar{b}$):

- вариант 4: $\bar{D} = 28$ см, $\bar{b} = 1$ см ($\bar{D}/\bar{b} = 28$);
- вариант 5: $\bar{D} = 28$ см, $\bar{b} = 2$ см ($\bar{D}/\bar{b} = 14$).

Выявленные расчетом для второй комбинации параметров зависимости от времени величин $P_s(t)$, $P_f(t)$, $\beta(t)$ и $k_{кор}(t)$ изображены графически на рисунке 4. Там же для сравнения показан график для варианта 3 с такими же, как в вариантах 4 и 5, значениями k_δ и проектной толщины стенки трубы $\bar{b} = 1$ см.

Замечание: сопоставительные оценки надежности для элементов с разными относительными и абсолютными характеристиками геометрии сечений предполагают одинаковый показатель приближения к предельному состоянию $\gamma_0(0)$ (то есть при соответствующих разных значениях продольных сил).

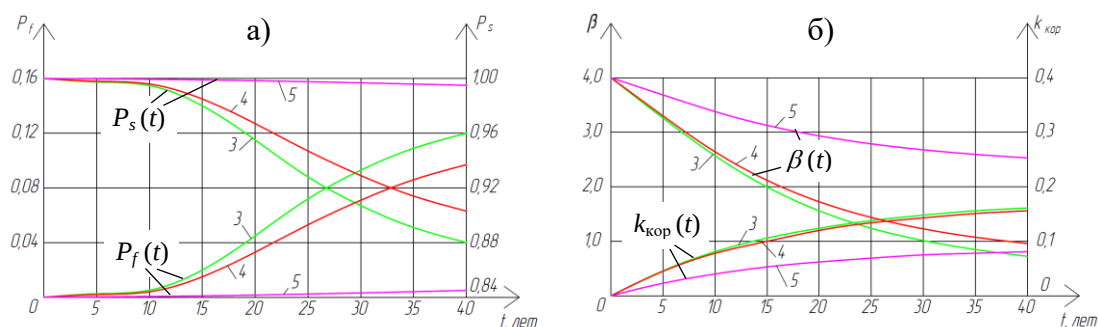


Рисунок 4 – Изменение во времени характеристик надежности элемента при различных параметрах геометрии сечения ($\bar{D}$ и $\bar{b}$) и одинаковых условиях коррозии:
 а) вероятность отказа $P_f(t)$ и надежность $P_s(t)$;
 б) индекс надежности $\beta(t)$ и коэффициент коррозии $k_{kop}(t)$

Сравнение результатов расчетов, показанных на рисунке 4 для вариантов 4 и 5, выявляет доминирующее влияние на надежность толщины стенки в реальном измерении (1 см и 2 см соответственно): коэффициенты коррозии к моменту $t = 40$ лет отличаются в 2 раза, а вероятности отказа в 22 раза. Отношение исходных размеров $\bar{D}/\bar{b}$ также имеет значение: его увеличение при фиксированном $\bar{b}$ повышает надежность, но в меньшей мере, чем увеличение толщины стенки трубы. Например, в вариантах 4 и 3 при прочих равных параметрах двойная разница диаметров (28 см и 14 см) несколько уменьшает коэффициент коррозии (на 3 %) для большего сечения, но вероятность отказа при удвоении расхода материала снижается лишь на 19 %. Тем не менее, этот положительный эффект (согласно замечанию – при почти вдвое большей, чем в варианте 3, продольной силе) имеет место и объясняется уменьшением влияния изгиба, вызванного неравномерной коррозией, с увеличением габарита сечения (в формуле (11) знаменатель отношения $\tilde{A}(t)/\tilde{W}(t)$ при этом растет быстрее числителя).

Используя результаты вычисления вероятности отказа $P_f(t)$, можно определять долговечность конструктивного элемента как продолжительность периода эксплуатации до момента достижения предельно допустимого значения $[P_f]$ (рисунок 3 а). При $[P_f] = 0,02$ для вариантов 1 и 2 расчетная долговечность $T([P_f])$ получается равной соответственно 17 и 14 годам.

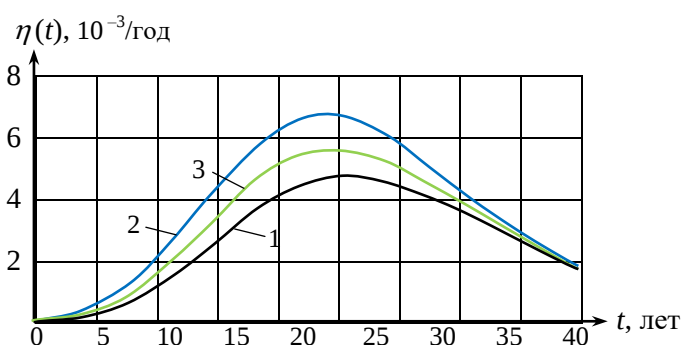


Рисунок 5 – Временная плотность вероятности отказа

Информативным индикатором надежности, кроме $P_s(t)$ и $P_f(t)$, является временная плотность вероятности отказа

$$\eta(t) = -\frac{d}{dt} \ln [P_f(t)] -$$

показатель, характеризующий скорость (нарастающую или убывающую) изменения со временем риска возникновения отказа.

На рисунке 5 – графики $\eta(t)$ для комбинаций расчетных параметров по вариантам 1, 2, 3. С высокой достоверностью по критериям χ^2 и Колмогорова – Смирнова они могут моделироваться распределениями типов Beta, Logistic и Normal.

Представленные выше методика и расчетный аппарат позволяют получить как частный случай при $k_\delta = 1$ решение задачи, рассмотренной в [22].

В выполненных расчетах показателей надежности не учитывается эффект продольно-поперечного изгиба при внецентренном растяжении стержня, претерпевающего неравномерный коррозионный износ – это либо не сказывается на оценке вероятности отказа, либо в некоторых случаях может давать ее завышение (в запас надежности).

Для сжатых стержней необходимо кроме прочности (при наличии конструктивных ослаблений сечений) учитывать требования устойчивости. При этом в случае возникновения, из-за коррозии, продольно-поперечного изгиба должна рассматриваться задача потери устойчивости 2-го рода, а риск бифуркационной потери устойчивости (1-го рода) может игнорироваться.

Выводы

1. Разработаны методика и алгоритм расчета надежности и долговечности по критерию прочности внецентренно растянутых стержней, претерпевающих неравномерный коррозионный износ; с их помощью получены количественные описания зависимостей от времени вероятности отказа и других значимых характеристик состояния стальных стержней кольцевого сечения при различных параметрах пространственно-временной модели процесса коррозии и варьировании геометрии кольца.

2. Сравнительный анализ особенностей изменения во времени показателей надежности трубчатого конструктивного элемента при разных видах коррозии (равномерной и неравномерной) выявил сильную зависимость этих показателей от формы сечения слоя коррозионных повреждений.

3. Полученные в работе результаты могут быть использованы для приближенных оценок надежности и долговечности стальных стержневых элементов, испытывающих коррозию (равномерную и неравномерную), при совместном изгибе с растяжением (или сжатием, без учета риска потери устойчивости), а также имеющих тонкостенные коробчатые, двутавровые и т.п. сечения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розенфельд И.Л. Атмосферная коррозия металлов. М.: Изд-во АН СССР, 1980. 250 с.
2. Каблов Е.Н., Старцев О.В. Фундаментальные и прикладные исследования коррозии и старения материалов в климатических условиях (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 4(37). С. 38–52. doi:10.18577/2071-9140-2015-0-4-38-52.
3. Uhlig H.N., Revie R.W. Corrosion and Corrosion Control: An Introduction to Corrosion Science and Engineering. John Wiley & Sons, Inc., 1985. 441 p.
4. Козлов В.Г., Титова И.В., Коноплин А.Н., Булыгин Н.Н. Методы борьбы с коррозией металлов // Фундаментальные исследования. 2017. № 6. С. 53–57.
5. Виноградов С.С., Никифоров А.А., Демин С.А., Чесноков Д. В. Защита от коррозии углеродистых сталей // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 8. С. 242–263. doi:10.18577/2071-9140-2017-0-S-242-263.
6. Черепашкин С.Е., Латыпов О.Р., Кравцов В.В. Методы исследования коррозии оборудования нефтегазового комплекса. Уфа: ООО "Изд-во науч.-техн. литературы "Монография", 2016. 104 с.
7. Голдобина Л. А. Анализ причин коррозионных разрушений подземных трубопроводов и новые решения повышения стойкости стали к коррозии // Записки Горного института. 2016. Т. 219. С. 459–464.
8. O'Grady II T.J., Hissey D.T., Kiefner J.F. Pressure Calculation for Corroded Pipe Development // Oil & Gas Journal. 1992. Oct. 19. Pp. 84–89.
9. Ибрагимов А.А., Подорожников С.Ю., Шабаров А.Б. Расчетная модель и алгоритм определения остаточного ресурса трубопровода в условиях периодических изменений напряжений и коррозии // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2014. № 4. С. 199–206.
10. Антонов А.В., Острейковский В.А. Ресурс и срок службы оборудования энергоблоков атомных станций. М.: Инновационное машиностроение, 2017. 536 с.

11. Вольберг Ю.Л., Коряков А.С. Учет воздействия агрессивной среды на несущую способность стальных конструкций // Труды МИСИ, 1983. № 183. С. 30–31.
12. Гладштейн Л.И., Лактюшин В.С. Применение атмосферостойких сталей без защитных покрытий в строительных конструкциях. Госстрой СССР. Центральный институт научной информации по строительству и архитектуре, 1979. Вып. 6. 53 с.
13. Голубев А.И. Влияние коррозии металлов на долговечность металлических конструкций // Исследования надежности металлических конструкций: Труды ЦНИИПроектстальконструкция, 1979. С. 85–94.
14. Лашенко М.Н. Повышение надежности металлических конструкций зданий и сооружений при реконструкции. Ленинград: Стройиздат, 1987. 134 с.
15. Бондаренко В.М., Прохоров В.Н. К вопросу об оценке силового сопротивления железобетона повреждению коррозионными воздействиями // Изв. вузов. Строительство, 1998. № 3. С. 30–41.
16. Ржаницын А.Р. Теория расчёта строительных конструкций на надёжность. М.: Стройиздат, 1978. 239 с.
17. Raizer V. Reliability of Structures. Analysis and Applications. Backbone Publishing Company (USA). 2009. 146 p.
18. Ведяков И.И., Райзер В.Д. Надежность строительных конструкций. Теория и расчет: Научное издание. М.: Изд-во АСВ, 2018. 414 с.
19. Vrouwenvelder T. Treatment of risk and reliability in the Euro-codes. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures and Buildings. 2008. Volume 161, issue SB4 (August). Pp. 209–214.
20. Себешев В.Г. Расчеты надежности сооружений и конструкций по поликритериальным и обобщенным условиям безотказности // Известия Петербургского университета путей сообщения, 2017. Т. 14. № 1. С. 165–174.
21. Бирюлев В.В., Кошин И.И., Крылов И.И., Сильвестров А.В. Проектирование металлических конструкций. Спец. курс. Учеб. пособие для вузов. Ленинград: Стройиздат, 1990. 432 с.
22. Себешев В.Г. Надежность и долговечность растянутых элементов стержневых конструкций при коррозионных повреждениях // Изв. вузов. Строительство. 2006. № 11–12. С. 100–107.

REFERENCES

1. Rozenfeld I.L. Atmosfernaya korroziya metallov [Atmospheric corrosion of metals]. Moscow: Izdatel'stvo AN SSSR [Publishing house of the USSR Academia of Sciences]. 1980. 250 p. (rus).
2. Kablov E.N., Startsev O.V. Fundamental'nyye i prikladnyye issledovaniya korrozii i stareniya materialov v klimaticheskikh usloviyakh (obzor) Фундаментальные и прикладные исследования коррозии и старения материалов в климатических условиях (обзор) [Fundamental and applied researches on corrosion and aging of materials under climatic conditions (review)]. Aviatsonnyye materialy i tekhnologii [Aviation materials and technologies]. 2015. No. 4(37). Pp. 38–52. doi:10.18577/2071-9140-2015-0-4-38-52. (rus).
3. Uhlig H.H., Revie R.W. Corrosion and Corrosion Control: An Introduction to Corrosion Science and Engineering. John Wiley & Sons, Inc., 1985. 441 p.
4. Kozlov V.G., Titova I.V., Konoplin A.N., Bulygin N.N. Metody bor'by s korroziyey metallov [Methods of combating metals' corrosion]. Fundamental'nyye issledovaniya [Fundamental researches]. 2017. No. 6. Pp. 53–57. (rus).
5. Vinogradov S.S., Nikiforov A.A., Dyomin S.A., Chesnokov D.V. Zashchita ot korrozii uglerodistykh staley [Corrosion protection for carbon steels]. Aviatsonnyye materialy i tekhnologii [Aviation materials and technologies]. 2017. No. 8. Pp. 242–263. doi:10.18577/2071-9140-2017-0-S-242-263. (rus).
6. Cherepashkin S.E., Latypov O.R., Kravtsov V.V. Metody issledovaniya korrozii oborudovaniya neftegazovogo kompleksa [Methods for studying corrosion of equipment in oil and gas complex]. Ufa: OOO "Izdatel'stvo nauchno-tekhnicheskoy literatury "Monografiya" [Publishing house of scientific and technical literature "Monograph", Ltd.]. 2016. 104 с.
7. Goldobina L.A. Analiz prichin korroziyonnykh razrusheniy podzemnykh truboprovodov i novyye resheniya povysheniya stoykosti stali k korrozii [Analysis of the causes of corrosion damage in underground pipelines and new solutions to improve the resistance of steel to corrosion]. Zapiski Gornogo instituta [Notes of the Mining Institute]. 2016. Vol. 219. Pp. 459–464. (rus).
8. O'Grady II T.J., Hissey D.T., Kiefner J.F. Pressure Calculation for Corroded Pipe Development // Oil & Gas Journal. 1992. Oct. 19. Pp. 84–89.
9. Ibragimov A.A., Podorozhnikov S.Yu., Shabarov A.B. Raschetnaya model' i algoritm opredeleniya ostatochnogo resursa truboprovoda v usloviyakh periodicheskikh izmeneniy napryazheniy i korrozii [Calculation model and algorithm for determining the residual life of the pipeline under conditions of periodic changing stresses and corrosion]. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) [Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)]. 2014. No. 84. Pp. 199–206. (rus).
10. Antonov A.V., Ostreykovskiy V.A. Resurs i srok sluzhby oborudovaniya energoblokov atomnykh stantsiy [Resource and service life of the power units' equipment of nuclear power plants]. Moscow: Innovatsionnoye mashinostroeniye [Innovative engineering]. 2017. 536 p. (rus).
11. Vol'berg Yu.L., Korjakov A.S. Uchët vozdeystviya agressivnoy sredy na nesushchuyu sposobnost' stal'nykh konstruktсий [Taking into consideration the impact of an aggressive environment on the bearing capacity of steel structures]. Trudy MISI [Proceedings of Moscow Institute of Civil Engineering]. 1983. No. 183. Pp. 30–31. (rus).

12. Gladshteyn L.I., Laktyushin V.S. Primeneniye atmosferostoykikh staley bez zashchitnykh pokrytiy v stroitel'nykh konstruktsiyah [The use of atmospheric-resistant steels without protective coatings in building structures]. Gosstroy SSSR. Tsentral'nyy institut nauchnoy informatsii po stroitel'stvu i arkhitekture [Gosstroy of the USSR. Central Institute of Scientific Information on Construction and Architecture]. 1979. Iss. 6. 53 p. (rus).
13. Golubev A.I. Vliyaniye korrozii metallov na dolgovechnost' metallicheskih konstruktсий [Influence of metal corrosion on the durability of metal structures]. Issledovaniya nadëzhnosti metallicheskih konstruktсий. Trudy CNIIProektstal'konstruktсиya [Reliability studies of metal structures: Proceedings of the Central Research Institute of Projectsteelconstruction]. 1979. Pp. 85–94. (rus).
14. Lashchenko M.N. Povysheniye nadëzhnosti metallicheskih konstruktсий zdaniy i sooruzheniy pri rekonstruktsii [Increase the reliability of metal structures of buildings and structures during reconstruction]. Leningrad: Stroyizdat. 1987. 134 p. (rus).
15. Bondarenko V.M., Prokhorov V.N. K voprosu ob otsenke silovogo soprotivleniya zhelezobetona povrezhdeniyu korrozionnymy vozdeystviyamy [On the issue of assessing the force resistance of reinforced concrete to damage by corrosion]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 1998. No. 3. Pp. 30–41. (rus).
16. Rzhantsyn A.R. Teoriya raschëta stroitel'nykh konstruktсий na nadëzhnost' [The theory of building structures' reliability analysis]. Moscow: Stroyizdat. 1978. 239 p. (rus).
17. Raizer V. Reliability of Structures. Analysis and Applications. Backbone Publishing Company (USA). 2009. 146 p.
18. Vedyakov I.I., Raizer V.D. Nadëzhnost' stroitel'nykh konstruktсий. Teoriya i raschët: Nauchnoye izdaniye [Reliability of constructional structures. Theory and analysis: Scientific publication]. Moscow: Izdatel'stvo ASV [Publishing office of the Association of Construction Higher Educational Institutions]. 2018. 414 p. (rus).
19. Vrouwenvelder T. Treatment of risk and reliability in the Euro-codes. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures and Buildings. 2008. Vol. 161, issue SB4 (August). Pp. 209–214.
20. Sebeshev V.G. Raschëty nadëzhnosti sooruzheniy i konstruktсий po polikriterial'nyy i obobshchënnym usloviyam bezotkaznosti [Analysis of the reliability of buildings and structures according to polycriteria and generalized conditions of serviceability]. Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya [Proceedings of the Petersburg State Transport University]. 2017. Vol. 14. No. 1. Pp. 165–174. (rus).
21. Biryulyov V.V., Koshin I.I., Krylov I.I., Sil'vestrov A.V. Proektirovaniye metallicheskih konstruktсий. Spetsial. kurs. Uchebn. posobiye dlya vuzov [Design of metal structures. Special course. Textbook for universities]. Leningrad: Stroyizdat. 1990. 432 p. (rus).
22. Sebeshev V.G. Nadëzhnost' i dolgovechnost' rastyanytykh elementov sterzhnevyykh konstruktсий pri korrozionnykh povrezhdeniyakh [Reliability and durability of tensioned elements of bar structures in case of corrosion damage]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2006. No. 11–12. Pp. 100–107. (rus).

Информация об авторах:

Себешев Владимир Григорьевич

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)»,
г. Новосибирск, Россия,
кандидат технических наук, профессор, почетный член РААСН, профессор кафедры строительной механики.
E-mail: sebeshev@sibstrin.ru

Лукин Егор Константинович

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)»,
г. Новосибирск, Россия,
студент Института строительства.
E-mail: e.lukin@sibstrin.ru

Information about authors:

Sebeshev Vladimir G.

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Novosibirsk, Russia,
candidate of technical science, professor, honorary member of the RAACS, professor of the department of structural mechanics.
E-mail: sebeshev@sibstrin.ru

Lukin Egor K.

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Novosibirsk, Russia,
student of the Institute of Construction.
E-mail: e.lukin@sibstrin.ru

Н.В. ФЕДОРОВА², О.Б. БУШОВА¹, В.И. КОЛЧУНОВ^{1,2}¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия²Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, г. Москва, Россия

РАСЧЕТ КОНСТРУКТИВНО НЕЛИНЕЙНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ РАМ ПРИ ИХ ХРУПКОМ РАЗРУШЕНИИ ПО НАКЛОННОМУ СЕЧЕНИЮ

Аннотация. Построена пространственная расчетная модель сложнапряженного железобетонного элемента при совместном действии поперечной силы и изгибающего момента. Получены аналитические зависимости для расчета поперечного армирования такого элемента наклонными (поперечными) стержнями при рассматриваемом напряженном состоянии. Прямоугольное сечение приводится к эквивалентному коробчатому сечению с двумя случаями положения сжатой зоны. Расчетная модель достаточно полно отражает физические явления силового сопротивления ригелей железобетонных рам в предельных и запредельном состояниях установленные экспериментально. Проведены результаты численных исследований конструкций рам, поперечное армирование которых принято в виде наклонных или перекрестных наклонных стержней при использовании предложенной и других моделей расчета. Сравнительный анализ полученных результатов показал эффективность более строгого учета совместного действия изгибающих моментов и поперечных сил и возможность за счет этого заметного снижения расчетного поперечного армирования железобетонных конструкций при рассматриваемом напряженном состоянии. Предложенные аналитические зависимости могут быть использованы для расчета железобетонных ригелей конструктивно и физически нелинейных рам при их хрупком разрушении по наклонному сечению в запредельных состояниях.

Ключевые слова: железобетонная рама, пространственная расчетная схема, поперечная сила, наклонное сечение, деформирование, особое воздействие, запредельное состояние.

N.V. FEDOROVA², O.B. BUSHOVA¹, V.I. KOLCHUNOV^{1,2}¹Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «National Research Moscow State University of Civil Engineering» (MGSU), Moscow, Russia²Research Institute of Construction Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow, Russia

CALCULATION OF STRUCTURALLY NONLINEAR REINFORCED CONCRETE FRAMES DURING THEIR DESTRUCTION ALONG AN INCLINED SECTION

Abstract. A spatial calculation model of a complexly stressed reinforced concrete element is constructed under the combined action of a transverse force and a bending moment. Analytical dependences are obtained for calculating the transverse reinforcement of such an element with inclined (transverse) rods under the stress state under consideration. The rectangular section is reduced to an equivalent box section with two cases of the compressed zone position. The computational model sufficiently fully reflects the physical phenomena of the force resistance of the crossbars of reinforced concrete frames in the limiting and exorbitant states established experimentally. The results of numerical studies of frame structures, the transverse reinforcement of which is accepted in the form of inclined or cross inclined rods when using the proposed and other calculation models, are carried out. A comparative analysis of the results obtained showed the effectiveness of a stricter account of the

combined action of bending moments and transverse forces and the possibility of a noticeable reduction in the calculated transverse reinforcement of reinforced concrete structures under the stress state under consideration due to this. The proposed analytical dependences can be used to calculate reinforced concrete crossbars of structurally and physically nonlinear frames with their brittle destruction along an inclined section in exorbitant states.

Keywords: reinforced concrete frame, spatial design scheme, transverse force, inclined section, deformation, special impact, beyond condition.

Введение

В последнее время увеличивается опасность возникновения прогрессирующего обрушения зданий и сооружений в виду усиливающихся воздействий природного, техногенного и террористического характера, происходящих в мире. Поэтому проблема защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения находит все более широкое обсуждение в научных публикациях специалистов. В отечественных [1-6] и зарубежных [7-11] исследованиях изучены особенности перераспределения силовых потоков в сооружениях при таких воздействиях и предложены различные способы защиты конструкций зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Однако, эти способы защиты могут быть эффективны для защиты железобетонных рамных конструкций при их разрушении по нормальным сечениям. В то же время, в недавно проведенных экспериментальных исследованиях [12] показано, что применительно к железобетонным каркасам многоэтажных зданий разрушения по наклонным сечениям ригелей могут носить хрупкий динамический характер и, соответственно, стать более опасными. В публикациях [12, 13] предложена схема армирования приопорных зон ригелей железобетонной рамы, повышающая их сопротивление при внезапных изменениях силовых потоков от особого воздействия. Однако вопросы, связанные с изучением особенностей физических явлений деформирования железобетонных рам каркасов зданий в предельном и запредельном состояниях при особых аварийных воздействиях с разрушением по наклонным сечениям ригелей, для рассматриваемых конструктивных систем, остаются неизученными.

Поэтому целью рассматриваемой работы явилось построение расчетной модели деформирования сечений ригелей железобетонных рам каркасов многоэтажных зданий в запредельных состояниях, вызванных особыми воздействиями. В соответствии с сформулированной целью были поставлены и решены следующие задачи:

- построить пространственную расчетную схему сложнапряженного железобетонного элемента при совместном действии изгибающих моментов и поперечных сил;
- провести численный анализ напряженного деформированного состояния в ригелях железобетонной рамы с использованием предложенной модели;
- выполнить оценку достоверности и эффективности предложенной расчетной модели в сопоставлении с расчетом по МКЭ, моделью действующих норм и результатами испытаний рассматриваемых конструкций.

Метод

В качестве объекта исследований рассмотрена железобетонная рама фрагмента каркаса многоэтажного здания результаты испытаний физической модели, которой приведены в работе [12]. Армирование ригелей рамы принято симметричным: продольными стержнями из арматуры класса А500С и поперечной арматуры в виде наклонных стержней из арматурной проволоки, расположенных в одном или в двух взаимно ортогональных направлениях в приопорных зонах ригелей (рисунок 1). Физико-механические характеристики этой проволоки были определены экспериментально и близки к характеристикам арматуры класса А240. К ригелям рамы, на расстояниях a от опор, приложена статическая эксплуатационная нагрузка в виде сосредоточенных сил P_i (рисунок 1 б). Особое воздействие на раму принято в виде внезапного удаления одной из стоек первого этажа рамы. При таком приложении нагрузки, в сечениях приопорной зоны

ригелей рамы совместно действуют изгибающие моменты (M) и поперечная сила (Q). При этом после приложения особого воздействия направления силовых потоков в ряде элементов рамы качественно изменяется.

Для построения расчетной схемы железобетонного элемента при совместном действии изгибающего момента и поперечной силы целесообразно использовать общую модель сложного напряженного железобетонного элемента [14]. В соответствии с этой моделью для ригеля принята пространственная расчетная схема позволяющая определять усилия и деформации в рассматриваемом элементе на всех уровнях нагружения в предельных и запредельных состояниях (рисунок 2). Здесь была принята дополнительная гипотеза об эквивалентности интенсивности потока касательных сил от действия поперечной силы для прямоугольного и коробчатого сечений железобетонного элемента в запредельном состоянии. Поперечная арматура и наклонные стержни, установленные по контуру расчетного сечения и при деформировании растянутых стенок коробчатого сечения с такой арматурой после образования трещин коэффициент ψ_s , учитывающий неравномерность распределения деформаций растянутой арматуры между смежными трещинами может быть достаточно строго определен в запредельном состоянии при нагрузках близких к разрушению по методике [15].

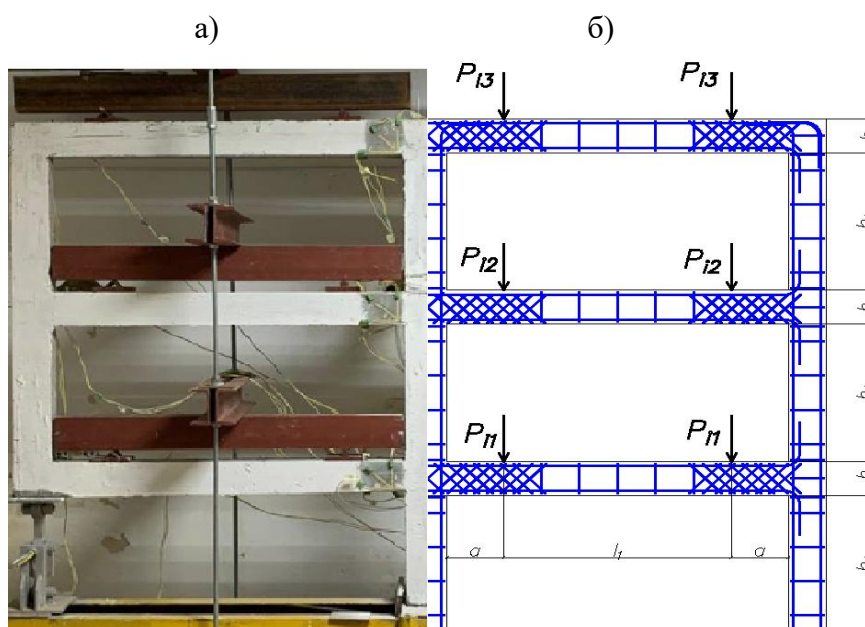


Рисунок 1 – Общий вид испытанной конструкции железобетонной рамы (а), схема армирования и приложения нагрузок (б)

Расчетная модель. Схема расчетного сечения конструкции ригеля с двух срезными хомутами представлена на рисунке 3 а. Сечение армировано стержнями продольной арматуры в растянутой зоне общей площадью $2A_s$ и в сжатой зоне общей площадью $2A'_s$. Расстояние между стержнями рабочей арматуры обозначено h_1 и b_1 . Поперечная арматура в общем случае представлена двух срезными замкнутыми наклонными хомутами с площадью стержней $A_{s,ins}$ и шагом $U_{s,ins0}$, и длинами вертикальных и горизонтальных участков стержней $h_2/\cos\alpha_1$ и b_2 . С целью упрощения расчетной модели и практически без заметного влияния на напряженное состояние в хомутах в расчетной схеме наклонные стержни переносятся на уровень продольной арматуры с уменьшенным шагом $U_{s,ins}$ по формуле (1).

$$U_{s,ins} = U_{s,ins0} \frac{(b_1 + h_1)}{b_2 + h_2/\cos\alpha_1}. \quad (1)$$

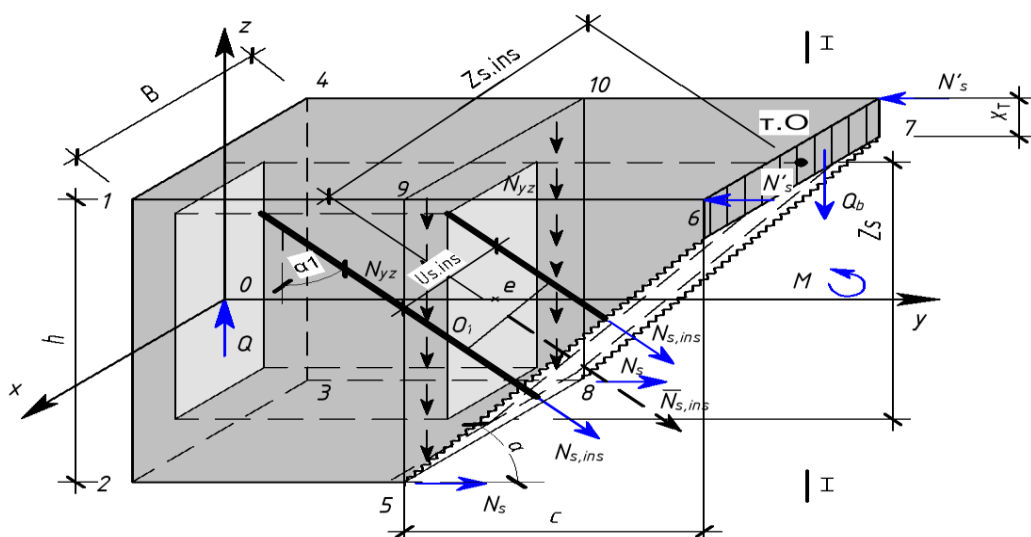


Рисунок 2 – Пространственная расчетная схема эквивалентного железобетонного элемента при совместном действии изгибающего момента и поперечной силы

Высоту сжатой зоны в расчетном сечении будем определять для двух возможных расчетных случаев:

- первый случай, когда $X_T = 2\alpha'$, где α' – расстояние от верхней поверхности сечения до центра тяжести арматуры сжатой зоны. При этом высота расчетного сечения равна h_1 .

- второй случай, когда $X_T > 2\alpha'$. При этом высота расчетного сечения равна Z_1 .

При определении потоков касательных сил рассмотрим, как более общий, второй случай положения высоты сжатой зоны. Переход к первому случаю осуществляется простой заменой Z_1 на h_1 . К прямоугольному контуру балочного элемента с центром в точке O приложены: M – изгибающий момент и Q – поперечная сила (см. рисунок 2).

Выделим из сечения балки пространственных расчетный элемент коробчатого сечения размерами $b_1 \times Z_1$ (рисунок 3 в), где Z_1 – расстояние от растянутой арматуры $2A_s$ до центра тяжести бетона сжатой зоны, рассчитываемая по формуле (2).

$$Z_1 = h_1 + \alpha' - 0,5X_T \quad (2)$$

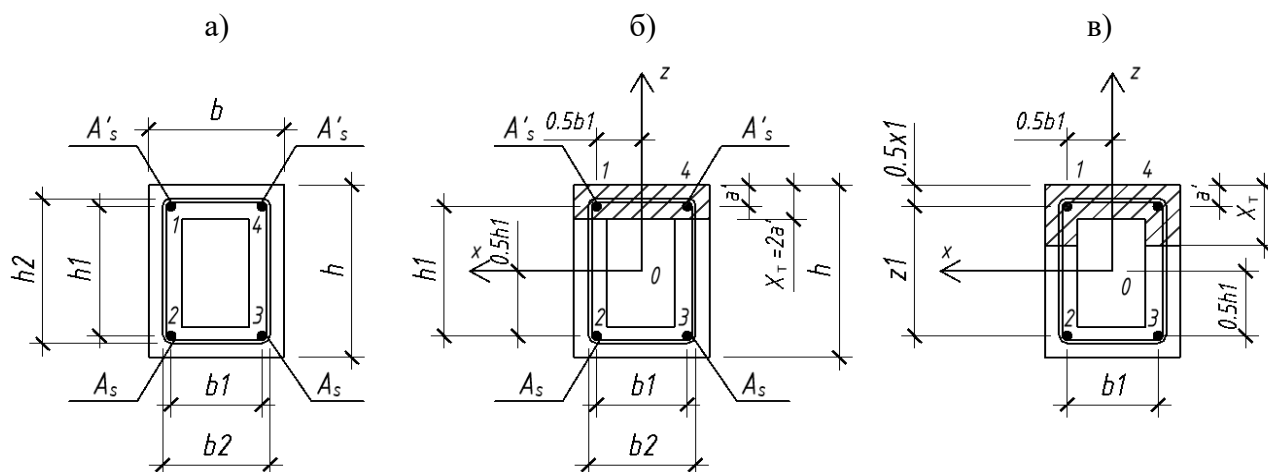


Рисунок 3 - Схема расчетного поперечного сечения: а) сечение с двух срезными хомутами с выделением расчетных контуров 1-2-3-4; б) по частной схеме, в) по общей схеме

Далее здесь рассматривается общий расчетный случай положения сжатой зоны. В частном случае во всех формулах Z_1 заменяется на h_1 .

Систему исходных уравнений (3), (4) равновесия в наклонном сечении для рассматриваемого коробчатого элемента запишем в виде:

$$M_s + M_{s,ins} \geq M \quad (3)$$

$$Q_b + Q_{s,ins} \geq Q \quad (4)$$

Здесь M_s и $M_{s,ins}$ – соответственно, момент равнодействующей в продольной и наклонной арматуре, пересекаемый наклонным сечением относительно центра тяжести сжатой зоны бетона (т. О на рисунке 2).

Раскрывая выражение моментов через напряжения в арматуре, можно записать:

$$M_{s,ins} = \overline{N}_{s,ins} \omega z_{s,ins} = q_{s,ins} \frac{c}{\cos \alpha} \gamma_s \omega z_{s,ins} = \frac{\sigma_{s,ins} A_{s,ins}}{U_{s,ins}} \cdot \frac{c}{\cos \alpha} \gamma_s \omega z_{s,ins} \quad (5)$$

$$M_s = N_s z_s = \gamma_s \sigma_s A_s z_s \quad (6)$$

$$Q_b + Q_{s,ins} = Q \quad (7)$$

где $\overline{N}_{s,ins}$, $z_{s,ins}$ соответственно, равнодействующая в наклонных стержнях и ее плечо относительно центра тяжести сжатой зоны бетона;

ω – коэффициент полноты интенсивности напряжений в наклонных стержнях;

$Q_{s,ins}$ – поперечная сила, воспринимаемая наклонными стержнями;

Q_b – поперечная сила, воспринимаемая бетоном сжатой зоны.

Значение поперечной силы, воспринимаемой бетоном сжатой зоны в предельном состоянии, определяется по формуле действующих норм [16]:

$$Q_b = \frac{\phi_{b2} R_{bt} b h_0^2}{c} = \frac{B}{c}, \quad (8)$$

с ограничениями

$$0,5 R_{bt} b h_0 < \frac{\phi_{b2} R_{bt} b h_0^2}{c} \leq 2,5 \cdot R_{bt} b h_0, \quad \phi_{b2} - \text{коэффициент, принимаемый равным } 1,5.$$

Значения поперечной силы, воспринимаемой наклонными стержнями:

$$Q_{s,ins} = \omega q_{s,ins} \frac{c}{\cos \alpha}, \quad (9)$$

где $q_{s,ins}$ – интенсивность армирования наклонными стержнями.

При других уровнях нагружения расчетного сечения в зоне наклонной трещины после ее образования, значения поперечной силы, воспринимаемой бетоном, определяется по зависимости (8), в которой вместо R_{bt} принимаются напряжения σ_{bt} . Значения этих напряжений определяются через коэффициент, равный отношению поперечной силы, при которой образуются наклонные трещины (Q_{crc}), к текущему значению поперечной силы (Q). Подставив (5) и (6), (8) и (9) соответственно в уравнения (3) и (7), получим:

$$Q = \frac{B}{c} + \omega q_{s,ins} \frac{c}{\cos \alpha} \quad (10)$$

$$\gamma_s \sigma_s A_s z_s + \frac{\sigma_{s,ins} A_{s,ins}}{U_{s,ins}} \cdot \frac{c}{\cos \alpha} \gamma_s \omega z_{s,ins} = M \quad (11)$$

Недостающее уравнение для определения неизвестных в рассматриваемом расчетном наклонном сечении можно записать, используя принцип Лагранжа, в виде производной от функции поперечной силы (Q) по переменной c :

$$-\frac{B}{c^2} + \omega q_{s,ins} \frac{1}{\cos \alpha} = 0 \quad (12)$$

В итоге получим систему трех взаимосвязанных уравнений с неизвестными $q_{s,ins}$, c , $\sigma_{s,ins}$, σ_s .

Положив на первом шаге значения напряжений в продольных стержнях напряжениям вычисленным по изгибающему моменту в нормальном сечении I-I, проходящем вертикально по сжатой зоне бетона, методом итераций, используя уравнения (10-12), определяем значения трех остальных неизвестных $q_{s,ins}$, c , $\sigma_{s,ins}$. При этом вычисленные значения длины проекции расчетного сечения c должны удовлетворять критериальным ограничениям действующих норм.

Определение продольных напряжений в сжатой арматуре и сжатом бетоне находятся из дополнительно записанной системы уравнений статики в сечении I-I (М относительно центра тяжести сжатой зоны и сумма проекций на продольную ось У).

Средние относительные деформации в наклонных арматурных стержнях A_{si} на участке между наклонными трещинами и средние деформации в продольной арматуре в зоне наклонных трещин определяются по формулам:

$$\varepsilon_{s.ins} = \frac{\sigma_{s.ins}\psi_{s.ins}}{E_s}; \varepsilon_s = \frac{\sigma_s\psi_s}{E_s}, \quad (13)$$

где $\psi_s, \psi_{s.ins}$ – коэффициент, учитывающий сопротивление растянутого бетона между трещинами, введенный в теорию железобетона В.И. Мурашевым, соответственно для наклонных и продольных трещин.

Учитывая то, что в рассматриваемой задаче коэффициент ψ_s необходимо вычислять на всем диапазоне деформирования элемента с трещинами, включая и деформирование в запредельном состоянии, а также деформирование арматуры при наличии одиночных трещин, значение этого коэффициента будем определять по уточненной зависимости, предложенной в исследованиях [17]. Согласно этой работе, характерные эпюры напряжений (деформаций) арматур между трещинами на уровне оси растянутой арматуры имеют вид, представленной на рисунке 4.

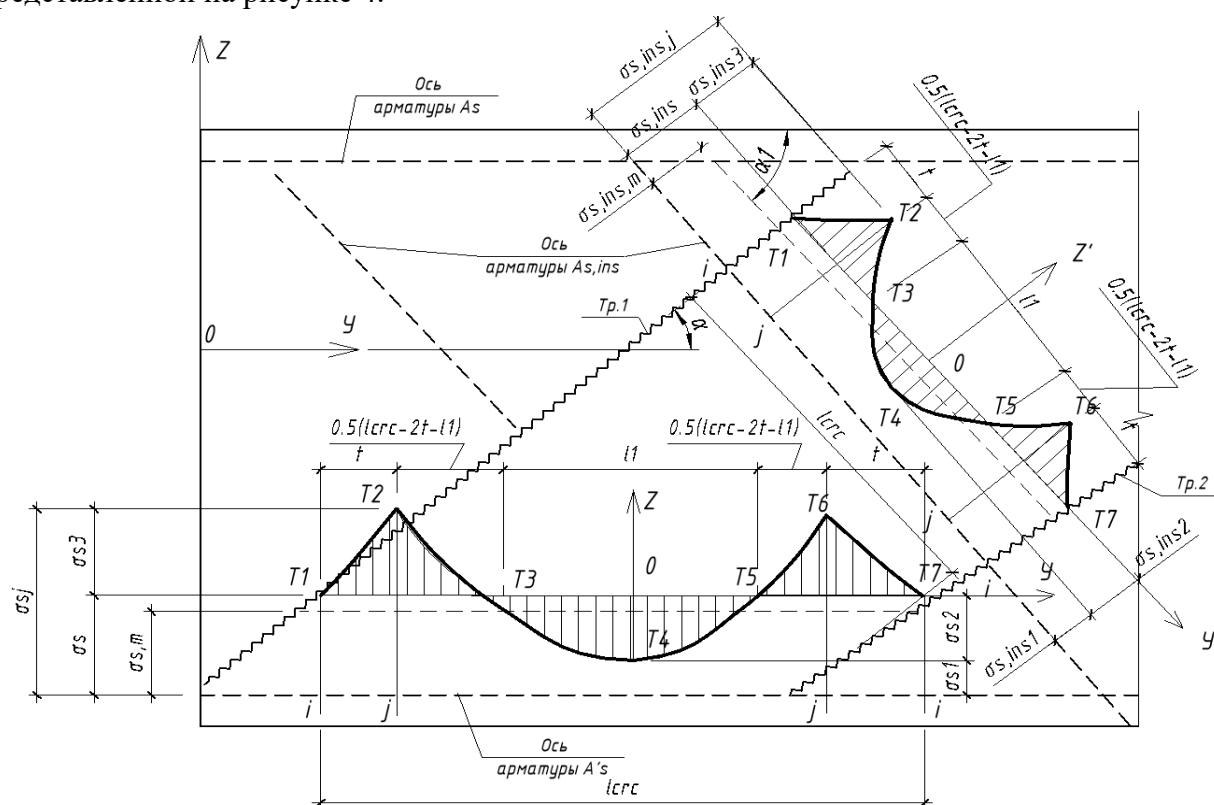


Рисунок 4 - Характерные опытные эпюры напряжений в наклонных арматурных стержнях, полученные с помощью непрерывных цепочек тензорезисторов

В соответствии со схемой этого рисунка, в рамках традиционной трактовки рассчитываемого коэффициента, его значение может быть вычислено по формуле (14):

$$\psi_s = 1 - \frac{2}{3} \cdot \frac{\chi R_{bt}}{\mu \sigma_s} \cdot \left(1 - \frac{A_b}{A}\right) \cdot \left(1 - \frac{2t}{l_{crc}}\right) + \left(\frac{\sigma_{s,j}}{\sigma_s} - 1\right) \left[\frac{1}{3} \cdot \left(1 - \frac{2t}{l_{crc}} - \frac{l_1}{l_{crc}}\right) + \frac{t}{l_{crc}}\right], \quad (14)$$

где, l_1 находится из условия, в соответствии с которым, изменение напряжений в растянутой арматуре между точками 2-6 (см. рисунок 4) принято по зависимости квадратной параболы по формуле (15):

$$l_1 = 2 \left[\frac{0.25 \sigma_{s2} (l_{crc} - 2t)^2}{\sigma_{s,j} - \sigma_s + \sigma_{s2}} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (15)$$

Напряжения $\sigma_{s,j}$ определяются из зависимостей механики разрушения, полученных в [17] применительно к железобетону; t – в первом приближении принимаются равными $1.5d$, где d – диаметр рабочей растянутой арматуры. При этом, если $d < 10$ мм, то для тяжелого бетона из щебня фракции 5-10 мм параметр t принимается равным $1.5 \cdot 10 = 15$ мм. Для бетона из щебня фракции 10-20 мм при $d < 20$ мм, параметр t принимается равным $1.5 \cdot 20 = 30$ мм.

χ – коэффициент, определяемый из зависимости механики разрушения. В первом приближении, его можно вычислить по формуле (16) [17]:

$$\chi = \frac{M_{crc}}{M}, \quad (16)$$

где M_{crc} – момент образования наклонной трещины.

Внося в (13) значения напряжений σ_s и $\sigma_{s,ins}$, полученные из решений системы уравнений (10) – (12), получим значения деформаций ε_s , $\varepsilon_{s,ins}$ в функции от момента (M) и поперечной силы (Q) (формулы (17)–(19)).

$$Q = \frac{B}{C} + \omega \frac{\varepsilon_{s,ins} E_s A_{s,ins}}{\psi_{s,ins} U_{s,ins}} \frac{C}{\cos \alpha}; \quad (17)$$

$$M = \frac{\varepsilon_s E_s A_s}{\psi_s} \gamma_s z_s + \frac{\varepsilon_{s,ins} E_s A_{s,ins}}{\psi_{s,ins} U_{s,ins}} \cdot \frac{C}{\cos \alpha} \gamma_s \omega z_{s,ins}; \quad (18)$$

$$-\frac{B}{C^2} + \omega \frac{\varepsilon_{s,ins} E_s A_{s,ins}}{\psi_s U_{s,ins}} \frac{1}{\cos \alpha} = 0. \quad (19)$$

Пример расчета

В качестве примера численной реализации методики расчета рассмотрим двухпролетную железобетонную раму, физическая модель которой была испытана сосредоточенной нагрузкой, приложенной в приопорных зонах ригелей и особым воздействием в виде внезапного удаления крайней или средней колонны первого этажа [12]. Конструкции рам выполнены из бетона В30 с сечением ригелей 50х100 мм. Продольное армирование ригелей было рассчитано по методике норм и принято симметричным из стержней диаметром ф8А500С. Поперечное армирование приопорной зоны рассчитано по рассматриваемой методике на совместное действие поперечной силы и момента и принято в виде наклонных (Рама РЖ-1) или перекрестных (Рама РЖ-2) наклонных стержней из арматурной проволоки диаметром 2 мм, шагом 35 мм (рисунок 5). Физико-механические характеристики этой проволоки были определены экспериментально и оказались близки к характеристикам мягкой арматуры класса А240. Армирование перекрестными наклонными стержнями выполнено с целью повышения сопротивляемости приопорных зон ригелей, изменяющимся при особом воздействии силовым потокам в зоне наклонных трещин. Проектная нагрузка на раму в виде сосредоточенных сил, была приложена к ригелям на расстоянии 150 мм от опор.

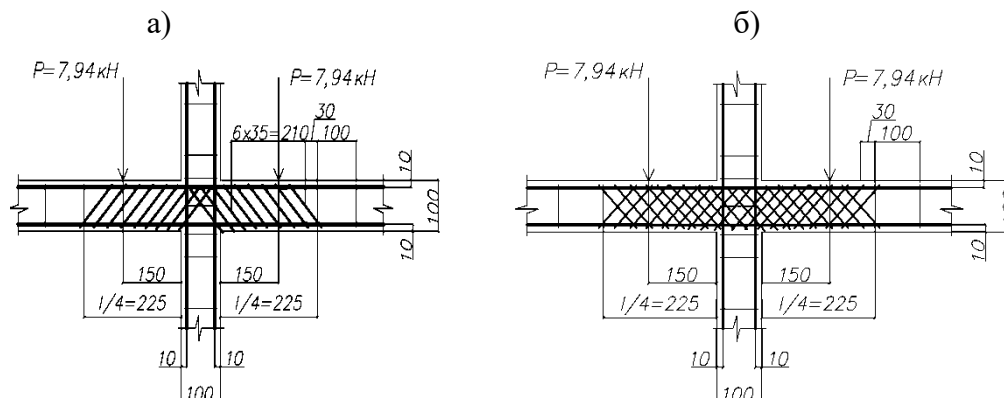


Рисунок 5 – Схема приопорного узла, армированного наклонными стержнями, рама РЖ-1 (а) и с перекрестной схемой армирования, Рама РЖ-2 (б)

Расчет ригеля в зоне возможного локального разрушения по наклонному сечению в зоне наклонных трещин производился также с использованием ПК Лири-Сапр. При этом образование наклонных трещин в приопорной зоне моделировалось их «расшивкой» по методике [18, 19].

Результаты расчета в виде изменения деформаций в продольной и поперечной арматуре в зависимости от внутренних усилий (поперечной силы и момента) в расчетном наклонном сечении в исходной п-раз статически неопределимой рамной системе до запроектного воздействия (Q_n) и после запроектного динамического воздействия в п-раз статически неопределимой системе (Q_{n-1}^d) представлены на рисунке 6 и 7.

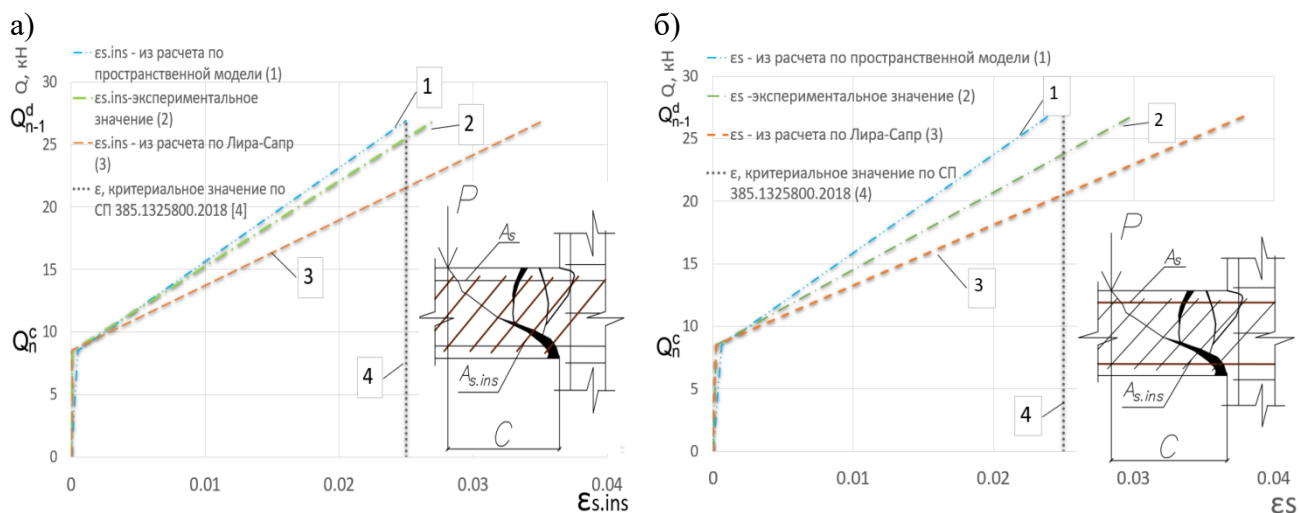


Рисунок 6 – График зависимости изменения деформаций в арматуре от внутренних усилий в расчетном наклонном сечении рамы, армированной наклонными стержнями одного направления, до и после запроектного воздействия: (а) наклонные стержни, (б) продольные стержни

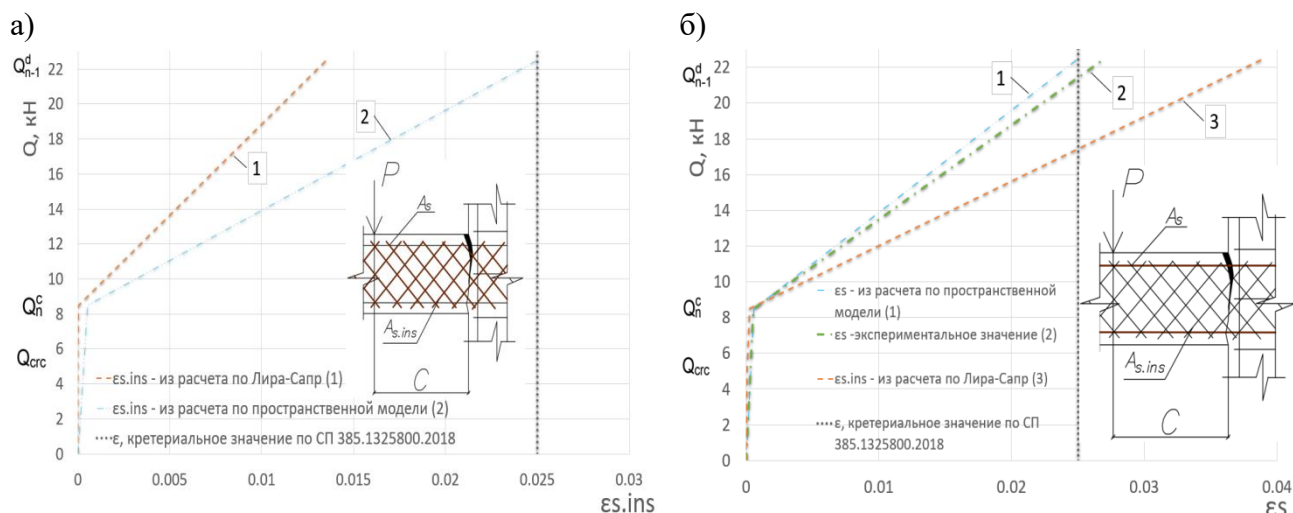


Рисунок 7 – График зависимости изменения деформаций в арматуре от внутренних усилий в расчетном наклонном сечении рамы, армированной наклонными стержнями, расположенными в двух взаимно ортогональных направлениях, до и после запроектного воздействия: (а) наклонные стержни, (б) продольные стержни

Здесь же для сравнения приведены графики экспериментально полученных значений деформаций [12], графики деформаций из расчета по ПК Лира-Сапр. Из анализа этих графиков можно видеть, что значения деформаций в наклонной и продольной арматуре при статическом нагружении ригеля рамы сосредоточенными силами на первом этапе испытаний удовлетворительно описываются расчетом по предложенной методике с пространственной моделью коробчатого сечения и согласуются с их значениями полученными экспериментально.

На рисунке 8 представлены схемы разрушения конструкций опытных рам с различными схемами армирования и картины разрушения приопорных средних узлов рамы А и Б при удалении крайней колонны.

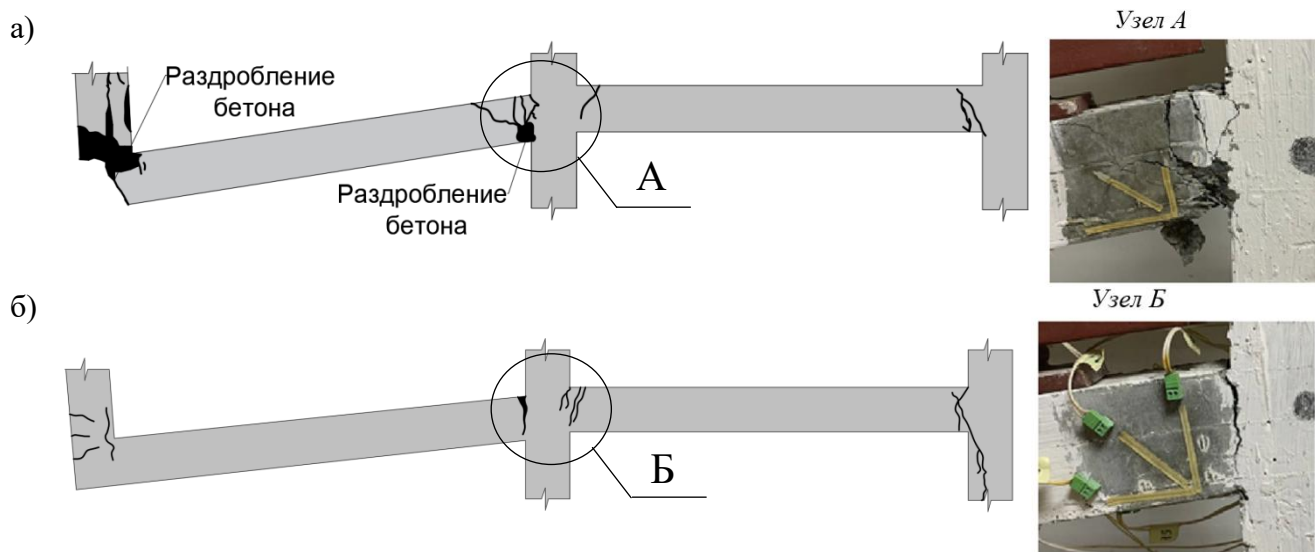


Рисунок 8 – Картина разрушения ригелей над первым этажом опытных рам, армированных наклонными РЖ-1(а) и перекрестными РЖ-2 (б) стержнями

Из анализа этих картин можно видеть, что применение двусторонних наклонных стержней снижает деформативность рассматриваемой приопорной зоны, повышает ее трещиностойкость и сопротивляемость внезапному изменению силовых потоков в рассматриваемой приопорной зоне. В ригелях, армированных перекрестными стержнями в приопорных зонах, первоначально образовывались нормальные трещины, затем, после приложения особого наклонные, образовывались наклонные трещины, но разрушение рассматриваемого узла не произошло. Из сопоставления графиков деформаций конструкций обеих рам можно также отметить, что расчет по предложенной пространственной расчетной схеме с учетом совместного действия поперечной силы и момента заметно снижает значения деформаций в наклонных стержнях по сравнению с расчетом по методике действующих норм (расчет по ПК Лира-Сапр) и эта разница значительно увеличивается после приложения к раме запроектного динамического воздействия в п-раз статически неопределимой системе.

Динамика развития наклонных и нормальных трещин в рассматриваемом приопорном узле (рисунок 9) подтвердила хрупкий характер разрушения ригеля рамы, армированной наклонными стержнями. Скорость раскрытия наклонной трещины в узле А после особого динамического воздействия более чем в три раза превысила скорость раскрытия нормальной трещины рамы с ригелями, армированных перекрестными стержнями.

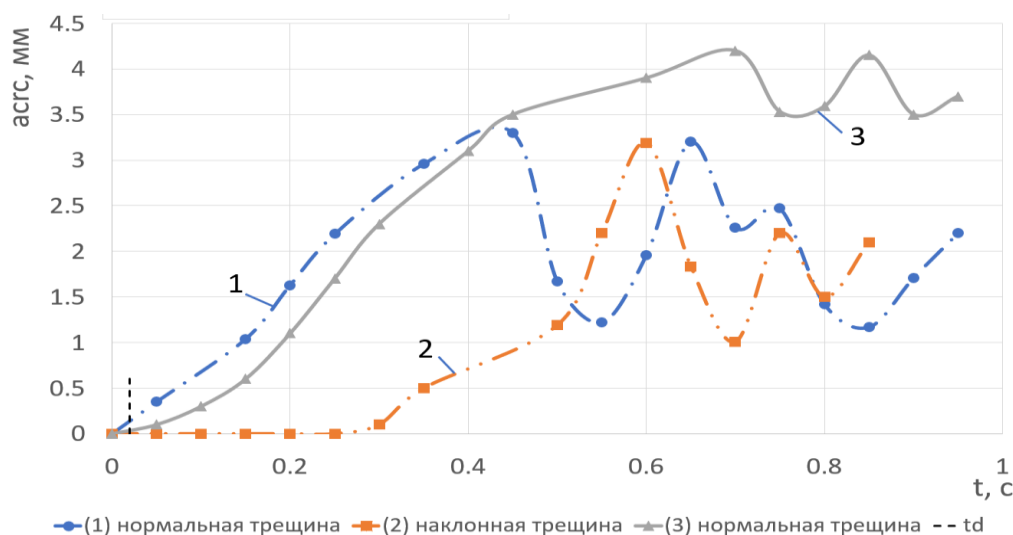


Рисунок 9 – График опытных зависимостей изменения ширины раскрытия трещины от времени приложения запроектного воздействия: (1) рама, армированная односторонними наклонными стержнями, (2) рама, армированная наклонными стержнями, расположенными в двух взаимно ортогональных направлениях

В целом, сопоставление значений деформаций, ширины раскрытия трещин и картин разрушения ригелей, армированных наклонными стержнями и с перекрестной схемой армирования после особого воздействия дает возможность сделать вывод об эффективности замены односторонних наклонных стержней двусторонними наклонными стержнями в качестве одного из возможных способов защиты от прогрессирующего обрушения.

Выводы

1. Построен вариант деформационной модели для расчета напряженно деформированного состояния железобетонного элемента при совместном действии поперечных сил и изгибающих моментов, позволяющая определять деформации в сжатом бетоне, поперечной и продольной арматуре на всех уровнях нагружения конструкции, включая предельное и особое запредельное состояние.

2. Численным анализом расчетных параметров деформирования приопорных зон ригелей железобетонных рам при разрушении по наклонному сечению выявлены характерные особенности силового сопротивления и разрушения этих зон при различных схемах установки поперечной арматуры и различных режимах нагружения.

3. Показано влияние учета изгибающего момента на предельные деформации в наклонных арматурных стержнях при различных режимах статико-динамического нагружения конструкций железобетонных рам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алмазов В.О., Као Зуй Кхой. Динамика прогрессирующего разрушения монолитных многоэтажных каркасов. М.: АСВ, 2013. 128 с.
2. Еремеев П.Г. Методы проектирования на прогрессирующее обрушение: гармонизация российских и международных нормативных документов // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 4. С. 23-28.
3. Федорова Н.В., Фан Динь Гуок, Нгуен Тхи Чанг. Экспериментальные исследования живучести железобетонных рам с ригелями, усиленными косвенным армированием // Строительство и реконструкция. 2020. № 1. С. 92-100.
4. Ильющенко Т.А., Колчунов В.И., Федоров С.С. Трещиностойкость преднапряженных железобетонных рамно-стержневых конструкций при особых воздействиях // Строительство и реконструкция. 2021. № 1. С. 74-84.

5. Ву Нгок Туен Исследование живучести железобетонной конструктивно нелинейной рамно-стержневой системы каркаса многоэтажного здания в динамической постановке // Строительство и реконструкция. 2020. № 4. С.73–84.
6. Федорова Н. В., Халина Т.А. Исследование динамических догрузений в железобетонных конструктивных системах при внезапных структурных перестройках// Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 8. С. 32-36.
7. Alogla K., Weekes L., Augusthus-Nelson L. A new mitigation scheme to resist progressive collapse of RC structures // Construction and Building Materials. 2016. No. 125. Pp. 533–545.
8. Alshaikh I. M. H. [и др.]. Progressive collapse of reinforced rubberised concrete: Experimental study // Construction and Building Materials. 2019. No. 226. Pp. 307–316.
9. Li J., Hao H. Numerical study of structural progressive collapse using substructure technique // Engineering Structures. 2013. No. 52. Pp.101–113.
10. Xuan W., Wang L., Liu C., Xing G., Zhang L., Chen H. Experimental and theoretical investigations on progressive collapse resistance of the concrete-filled square steel tubular column and steel beam frame under the middle column failure scenario // Shock and Vibration. 2019. Vol. 2019. Pp. 1–12.
11. Lin K., Lu X., Li Y., Guan H. Experimental study of a novel multi-hazard resistant prefabricated concrete frame structure // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2019. Vol. 119. Pp. 390–407
12. Колчунов В.И., Бушова О.Б., Кореньков П.А. Деформирование и разрушение железобетонных рам с ригелями, армированными наклонными стержнями, при особых воздействиях // Строительство и реконструкция. 2022. № 1. С. 18–28.
13. Колчунов В.И., Бушова О.Б. Деформирование железобетонных каркасов многоэтажных зданий в запредельных состояниях при особых воздействиях// Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2022. № 4. С. 297-306.
14. Карпенко Н.И., Колчунов В.И., Колчунов В.И., Травуш В.И., Демьянов А.И. Деформирование железобетонных конструкций при изгибе с кручением/ / Строительные материалы. 2021. № 6. С. 47-56.
15. Федоров В.С., Фам Фук Тунг, Колчунов В.И. Расчет ширины раскрытия трещин в железобетонных конструкциях при центральном растяжении с учетом эффекта нарушения сплошности /Известия Орловского государственного технического университета. 2007. № 1(13). С. 29-34.
16. СП 63.13330.2018 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. СНиП 52-01-2003 (с Изменением N 1). Официальное издание. М.: Стандартинформ, 2019 г.
17. Колчунов В.И., Пимочкин В.Н. деформационный эффект при сопротивлении растянутого бетона между трещинами в железобетонном элементе (или вскрытие истинных причин расхождения внешних и внутренних усилий в поперечном сечении железобетонного элемента, рассчитываемого по теории В.И. Мурашева) // Известия орловского государственного технического университета. 2005. № 3-4. С. 49-55.
18. Колчунов В.И., Колчунов В.И., Федорова Н.В. Деформационные модели железобетона при особых воздействиях // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 8. С. 54-60.
19. Демьянов А.И., Наумов Н.В., Колчунов В.И. Методика определения параметров деформирования и трещиностойкости железобетонных составных конструкций, испытывающих кручение с изгибом // Известия вузов. 2018. № 7. С. 5-16.

REFERENCES

1. Almazov V.O., Kao Zui Khoi. Dynamics of progressive destruction of monolithic multi-storey frames. M.: DIA, 2013. 128 p.
2. Ereemeev P.G. Design methods for progressive collapse: harmonization of Russian and international regulatory documents // Industrial and civil construction. 2022. No. 4. Pp. 23-28.
3. Fedorova N.V., Fan Dinh Guok, Nguyen Thi Chang. Experimental studies of the survivability of reinforced concrete frames with crossbars reinforced with indirect reinforcement // Construction and reconstruction. 2020. No. 1. Pp. 92-100.
4. Ilyushenko T.A., Kolchunov V.I., Fedorov S.S. Crack resistance of prestressed reinforced concrete frame-rod structures under special influences // Construction and reconstruction. 2021. No. 1. Pp. 74-84.
5. Wu Ngoc Tuen Study of the survivability of a reinforced concrete structurally nonlinear frame-rod system of a multi-storey building frame in a dynamic formulation // Construction and Reconstruction. 2020. No. 4. Pp.73-84.
6. Fedorova N.V., Khalina T.A. Investigation of dynamic overloads in reinforced concrete structural systems during sudden structural rearrangements// Industrial and civil construction. 2017. No. 8. Pp. 32-36.
7. Alogla K., Weekes L., Augusthus-Nelson L. A new mitigation scheme to resist progressive collapse of RC structures // Construction and Building Materials. 2016. No. 125. Pp. 533-545.

8. Alshaikh I. M. H. [et al.]. Progressive collapse of reinforced rubberized concrete: Experimental study // Construction and Building Materials. 2019. No. 226. Pp. 307-316.
9. Li J., Hao H. Numerical study of structural progressive collapse using substructure technique // Engineering Structures. 2013. No. 52. Pp.101–113.
10. Xuan W., Wang L., Liu C., Xing G., Zhang L., Chen H. Experimental and theoretical investigations on progressive collapse resistance of the concrete-filled square steel tubular column and steel beam frame under the middle column failure scenario // Shock and Vibration. 2019. Vol. 2019. Pp. 1–12.
11. Lin K., Lu X., Li Y., Guan H. Experimental study of a novel multi-hazard resistant prefabricated concrete frame structure // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2019. Vol. 119. Pp. 390-407.
12. Kolchunov V.I., Bushova O.B., Korenkov P.A. Deformation and destruction of reinforced concrete frames with crossbars reinforced with inclined rods, under special influences // Construction and reconstruction. 2022. No. 1. Pp. 18-28.
13. Kolchunov V.I., Bushova O.B. Deformation of reinforced concrete frames of multi-storey buildings in extreme conditions under special influences// Construction mechanics of engineering structures and structures. 2022. No. 4. Pp. 297-306.
14. Karpenko N.I., Kolchunov V.I., Kolchunov V.I., Travush V.I., Demyanov A.I. Deformation of reinforced concrete structures during bending with torsion// Building materials. 2021. No. 6. Pp. 47-56
15. Fedorov V.S., Pham Fuk Tung, Kolchunov V.I. Calculation of crack opening width in reinforced concrete structures at central tension taking into account the effect of continuity violation // Izvestiya Orel State Technical University. 2007. No. 1(13). Pp. 29-34.
16. SP 63.13330.2018 Concrete and reinforced concrete structures. The main provisions. SNiP 52-01-2003 (with Change N 1). Official publication. Moscow: Standartinform, 2019
17. Kolchunov V.I., Pimochkin V.N. deformation effect in the resistance of stretched concrete between cracks in a reinforced concrete element (or the disclosure of the true causes of the divergence of external and internal forces in the cross section of a reinforced concrete element calculated according to the theory of V.I. Murashev) // Izvestiya Orel State Technical University. 2005. No. 3-4. Pp. 49-55.
18. Kolchunov V.I., Kolchunov V.I., Fedorova N.V. Deformation models of reinforced concrete under special influences // Industrial and civil construction. 2018. No. 8. Pp. 54-60.
19. Demyanov A.I., Naumov N.V., Kolchunov V.I. Methodology for determining the parameters of deformation and crack resistance of reinforced concrete composite structures experiencing torsion with bending // Izvestiya vuzov. 2018. No. 7. Pp. 5-16.

Информация об авторах:

Федорова Наталия Витальевна

Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, г. Москва, Россия,
ведущий научный сотрудник НИИСФ РААСН.
E-mail: fenavit@mail.ru

Бушова Олеся Борисовна

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия, аспирант кафедры железобетонных и каменных конструкций НИУ МГСУ.
E-mail: bushova96@mail.ru

Колчунов Виталий Иванович

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия, профессор кафедры железобетонных и каменных конструкций.
Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, г. Москва, Россия
член-корреспондент НИИСФ РААСН.
E-mail: asiorel@mail.ru

Information about authors:

Fedorova Natalia V.

Research Institute of Construction Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences,
Moscow, Russia,
leading researcher of the NIISF RAASN.
E-mail: fenavit@mail.ru

Bushova Olesya B.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «National Research Moscow State University of
Civil Engineering» (MGSU), Moscow, Russia,
postgraduate student of the department of Reinforced Concrete and Stone Structures of the MGSU.
E-mail: bushova96@mail.ru

Kolchunov Vitaly Iv.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «National Research Moscow State University of
Civil Engineering» (MGSU), Moscow, Russia,
professor of the department of Reinforced Concrete and Stone Structures.
Research Institute of Construction Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences,
Moscow, Russia,
corresponding member of NIISF RAASN.
E-mail: asiorel@mail.ru

Л.А. АЛБОРОВА¹, И.А. МАМИЕВА²

¹Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений (ЦНИИПромзданий), г. Москва, Россия

²Российский университет дружбы народов им. П. Лумумбы, г. Москва, Россия

КРИВОЛИНЕЙНЫЕ ФОРМЫ В АРХИТЕКТУРЕ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ В НАЧАЛЕ XXI-го ВЕКА

Аннотация. До настоящего времени систематизированы существующие архитектурные стили со своими модификациями, подвидами и стилевыми течениями применительно к тонким оболочкам и оболочечным структурам. Имеются несколько хронологий развития архитектурных стилей. Установлено, что интенсивность и разнообразие применения аналитических и аналитически незадаваемых поверхностей в архитектуре оболочечных структур, тонких оболочек и во внешних формах разнообразных сооружений поддаются разбиению на пять временных периодов. Последний пятый период было решено назвать «Возрождение интереса к оболочкам и сооружениям криволинейной формы, возникновение новых архитектурных стилей». Согласно материалам исследования он начался в начале XXI-го века. В данной статье показано, что до сегодняшнего времени нашли применение 37 аналитических поверхностей из более шести сотен известных поверхностей. Авторы констатируют реальное положение в архитектуре криволинейных форм и показывают возрастающий интерес архитекторов и строителей к таким объектам. Показано, что с 2000-го года использованы 16 основных архитектурных стилей, не считая новейшие стили, заявленные архитекторами, но обозначенные одним-двумя сооружениями. Перечислены с конкретными примерами аналитические и аналитически незадаваемые поверхности нашедшие применение в реальных сооружениях. Указаны архитекторы, участвовавшие в проектировании наиболее значимых зданий и сооружений.

Ключевые слова: архитектура оболочек, аналитические поверхности, этапы строительства оболочек.

L.A. ALBOROVA¹, I.A. MAMIEVA²

¹Central Scientific Research Institute for Industrial Buildings and Structure, Moscow, Russia

²RUDN University, Moscow, Russia

CURVILINEAR FORMS IN ARCHITECTURE OF BUILDINGS AND ERECTIONS

Abstract. To date, the existing architectural styles have been systematized with their modifications, subspecies and style trends in relation to thin shells and shell structures. There are several chronologies of the development of architectural styles. It has been established that the intensity and variety of the use of analytical and analytically non-assignable surfaces in the architecture of shell structures, thin shells and in the external forms of various structures can be divided into five time periods. The last fifth period was decided to be called "The revival of interest in shells and curvilinear structures, the emergence of new architectural styles." According to the research materials, it began at the beginning of the XXI century. This article shows that up to now 37 analytical surfaces out of more than six hundred known surfaces have been used. The authors constate the real situation in the architecture of curvilinear forms and show the increasing interest of architects and builders in such objects. It is shown that since 2000, 16 main architectural styles have been used, not counting the latest styles declared by architects, but designated by one or two structures. Analytical and analytically undetectable surfaces that have found

© Алборова Л.А., Мамиева И.А., 2023

application in real structures are listed with specific examples. The architects who participated in the design of the most significant buildings and structures of curvilinear forms at the beginning of the XXI century are indicated. The literature used contains 32 titles.

Keywords: *shell architecture, analytical surfaces, shell construction stages.*

Введение

Согласно ранее проведенным исследованиям авторов хронологию применения криволинейных поверхностей в архитектуре и строительстве пространственных структур, тонких оболочек и новаторских сооружений можно разделить на пять периодов:

1. Начальный этап строительства оболочек (I – XVIII вв.),
2. Стремление к уменьшению толщин пространственных конструкций, возникновение теории расчета тонких оболочек (начало XIX века – 1920-е годы),
3. Эпоха «Золотого века тонких оболочек» (1922 – 1965 гг.),
4. Эпоха затухания интереса к строительству оболочек (1966 г. – конец XX века),
5. Возрождение интереса к оболочкам и сооружениям криволинейной формы, возникновение новых архитектурных стилей (начало XXI в.).

Первые четыре периода освещены в научно-технической литературе [1, 2, 3, 4], а вот пятому, на данный момент времени, уделено недостаточно внимания [5, 6].

Современные архитекторы, инженеры-строители, ученые-механики и геометры стараются осмыслить достигнутые ранее результаты в различных отраслях науки и практики проектирования и строительства зданий и сооружений оболочечного типа или в форме криволинейных поверхностей ввиду увеличения интереса к таким сооружениям с начала XXI века после предыдущей эпохи затухания интереса к строительству оболочек.

Систематизированы существующие архитектурные стили, их модификации, подвиды, стилевые течения [7] и составлена хронология их появления [8].

Е.В. Сысоева [9] определила 4 этапа создания и развития теории тонких оболочек, где выделила четвертый этап с начала XXI века – до наших дней. Он характеризуется уточнением математического прикладного аппарата в проектировании конструкций, новыми вычислительными комплексами для персональных ЭВМ, расчетами с учетом физической, геометрической и конструктивной нелинейностей. Как видно, этот этап совпадает с пятым периодом предложенной авторами хронологии развития и строительства криволинейных большепролетных структур, тонких оболочек и сооружений криволинейных форм.

Цель исследования

В исследовании сделана попытка объяснить выделение отдельного периода в проектировании и строительстве криволинейных большепролетных структур, тонких оболочек и сооружений криволинейных форм, названного «Возрождение интереса к оболочкам и сооружениям криволинейной формы, возникновение новых архитектурных стилей», и показать, что эпоха затухания интереса к строительству оболочек закончилась в конце XX-го века.

Одной из целей статьи является выяснение количества канонических и неканонических алгебраических поверхностей, нашедших применение в формах зданий и сооружений, а также установление архитектурных стилей, их подвидов и архитектурных течений, использованных архитекторами в рассматриваемый период.

Возрождение интереса к оболочкам и сооружениям криволинейной формы, возникновение новых архитектурных стилей (начало XXI в.)

Теоретические исследования, практика строительства и новые конструкционные материалы [10] способствовали появлению разнообразных форм тонкостенных пространственных конструкций для организации необходимого пространства. Архитектор Мис ван дер Роз утверждал, что архитектура зависит от своего времени. На основе уже

познанных или вновь открытых законов природы архитектура через конструкции посредством техники материализует свои формы.

В начале рассматриваемого периода возможностями тонких оболочек применительно к архитектуре и строительству заинтересовались молодые студенты-архитекторы и строители. На ВДНХ (Москва), на различных выставочных площадках, например на МАКСе (г. Жуковский), на вузовских студенческих научных конференциях практически ежегодно проводились всероссийские и городские конкурсы инновационных проектов, например УМНИК, где молодежь могла продемонстрировать свои разработки, посвященные тонкостенным структурам и оболочкам (рисунок 1). В возрождении интереса к оболочечным структурам молодежь внесла весомый вклад [11].

Самое широкое применение продолжают находить сферические поверхности, на основе которых появились геодезические купола Фулера, послужившие прообразами новых стержневых структур (рисунок 2). В 2012 г. был построен самый большой деревянный купол в С.-Петербурге.



Рисунок 1 – Студенты РУДН демонстрируют своё видение перспектив расширения применения оболочек на конкурсе молодежных инновационных проектов «Лидер в области высоких технологий», МАКС-2007, г. Жуковский.
Автор фото Кривошапко С.Н.



Рисунок 2 – Трамвайное депо, Москва (сферическая поверхность).
Автор фото Мамиева И.А.

В настоящее время *торсовые поверхности* применяют в рамках архитектуры свободных форм. Эти формы получают методом параболического изгибания тонких плоских металлических листов. Полученные изделия используют в качестве составной части покрытий общественных зданий, как это сделано арх. Фр. Гери (Frank Gehry) для отеля Marques de Riscal, Испания [12]. *Торсовые поверхности одинакового ската* обладают целым рядом полезных для строителей свойств, однако реальных объектов в форме этих поверхностей не найдено. Существуют только наброски и эскизы [13].

Имеется много образцов применения полных и усеченных *коноидных поверхностей* в промышленных зданиях (шедовые покрытия), в храмовых сооружениях и в мечетях, в качестве стен складов и церкви, навесов перед входом, для перекрытия сцен летних театров, в скульптурных композициях и для украшения художественного музея и др. Их используют для крыш элитных коттеджей. Следовательно, можно заявить, что рассматриваемая линейчатая форма пользуется популярностью в настоящее время благодаря архитектурной выразительности и с точки зрения заявленной функциональности [14].

Появляются здания и сооружения в форме поверхностей, ранее неиспользовавшихся. *Бочкообразная или яйцевидная поверхность* стала привлекать внимание инженеров и архитекторов [15]. В Москве в 2000-2002 годах был построен «Дом-яйцо» на ул. Машкова (арх. С. Ткаченко).



Рисунок 3 – Дворец спорта И. Винер-Усмановой в Лужниках, г. Москва (волнообразная поверхность).
Автор фото Алборова Л.А.



Рисунок 4 – Офисное здание, Москва-Сити (винтовая коробчатая поверхность). Автор фото Иванов В.Н.

Находят применение поверхности из класса «Волнообразные, волнистые и гофрированные поверхности». Можно указать на покрытие Дворца спорта И. Винер-Усмановой в Лужниках, Москва (рисунок 3). Неоднократно повторяется форма винтовой поверхности коробчатого поперечного сечения (рисунок 4) [16]. Винтовые циклические и винтовые линейчатые поверхности применяются, в основном, в машиностроении в качестве змеевиков, закрученных пластинок и лопастей судов [17]. Их можно видеть в формах трубчатых спусков горок на детских площадках и в аттракционах. В больших сооружениях общественного назначения они пока не использовались, кроме ленточного винтового ограждения автомобильных геликоидальных пандусов.

Не угасает интерес архитекторов к цилиндрическим формам различных поперечных сечений (рисунок 5). Например, самая высокая в Европе светопрозрачная фондовая оранжерея в Главном ботаническом саду им. Н.В. Цицина РАН (Москва) высотой 33,6 м выполнена в форме цилиндрической поверхности с образующей кривой знакопеременной кривизны. Музей азербайджанского ковра имеет форму цилиндрической поверхности в виде свернутого ковра с горизонтальной осью. Построен в Баку (Азербайджан) по проекту арх. Франца Янца.

Часто используется круговая коническая поверхность (рисунок 6), благодаря ее способности разворачиваться на плоскость без разрывов и складок.

В архитектуре малых форм, в садовой архитектуре, в образовательных целях для объяснения принципов формообразования поверхностей часто используются *псевдосферические и минимальные* [18, 19] *поверхности, поверхности Клейна* [20], *Боя, кольцо Мебиуса, катеноиды* [21]. Однако эти привлекательные поверхности не находят применения в архитектуре и строительстве объектов промышленного и культурно-бытового назначения. Из минимальных поверхностей часто используется только *прямой геликоид* (рисунок 7). Павильон в г. Queretaro (Мексика) и катеноиды Национального театра Тайваня - первые примеры реального применения катеноидов в архитектуре.

Трубчатые спиралевидные и винтообразные поверхности широко используются при проектировании спусков в водных аттракционах. Есть несколько примеров применения спиралевидной поверхности для крыш одноэтажных экологических домов [22].



Рисунок 5 – Фондовая оранжерея Главного ботанического сада им. Н. В. Цицина РАН, Москва.
Автор фото Мамиева И.А.



Рисунок 6 – Ледовый дворец «Синяя птица», Отрадное, Москва, 2006 г. (усеченная круговая коническая поверхность). Автор фото Кривошапко С.Н.



Рисунок 7 – Винтовая лестница, гостиница Seven Visions the Dvin, Ереван, Армения, 2022 г. (прямой геликоид). Автор фото Кривошапко Н.С.

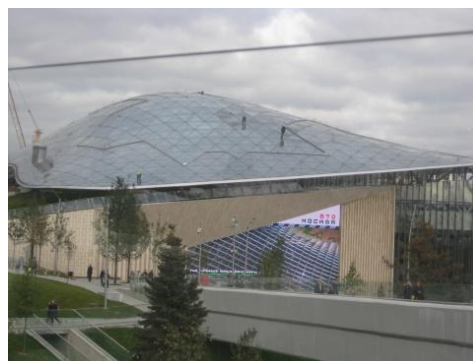


Рисунок 8 – «Стеклянная кора», Зарядье, Москва (аналитически не задаваемая поверхность). Автор фото Мамиева И.А.

Но именно в этот период широкое применение получили *аналитически не задаваемые поверхности*. Это связывают с появлением компьютерного моделирования, развитием числовых методов расчета на прочность, появлением типовых компьютерных программных комплексов. В конце XX-го – начале XXI-го века были построены покрытие из стекла и стали над двумя зданиями гостиницы Yas Marina в Абу-Даби, ОАЭ; торговый центр «Золотые террасы» (1998 г.), Варшава, Польша; «Стеклянная кора», Москва (рисунок 8), музей современного искусства в Казлиари, Италия; покрытие ликероводочного завода Massalan (Англия, 2018 г.) с использованием природного ландшафта; покрытие Московского молодёжного театра «Планета КВН» (2013 г.) и др.

Применение аналитически не задаваемых поверхностей в качестве геометрических моделей внешней формы сооружений можно продемонстрировать на примере трех высотных офисных Пламенных башен (Flame Towers) высотой 182, 165 и 161 м, построенных в 2007 – 2012 гг. в Баку (Азербайджан). Все три небоскреба напоминают факелы из огня.

Практически все аналитические поверхности, которые были использованы до 2000-го года, воплощены в формах реальных строительных конструкций и сооружений в начале XXI-го века. За последние четверть века были использованы прямые и наклонные цилиндрические [22] конические, торсовые [12], обыкновенные винтовые коробчатые (рисунок 4), сферические (ТРЦ «PITERLAND», С.-Петербург, 2012 г.), зонтичные, каплевидные, трубчатые [23], ротативные (покрытие водно-спортивного комплекса в Ростове-на-Дону), велароидальные, волнообразные и волнистые (Дворец спорта И. Винер-Усмановой в Лужниках, Москва) поверхности, спиральные и спиралевидные поверхности [22], цилиндрическая винтовая полоса (ограждение автомобильного винтового пандуса, ТЦ «Калужский», Москва), коноиды и цилиндриды [14], прямые геликоиды (винтовые

автомобильные пандусы), нодоиды, гипары [22], поверхности прямого переноса [24], поверхности вращения, в том числе, эллипсоиды (чайхана, г. Гиссар, Таджикистан), параболоиды, однополостные гиперболоиды (градирни) вращения, поверхность вращения «Яйцо» [15], круговой тор (проект «Ковчег» - биоклиматическое здание с автономной системой жизнеобеспечения, 2010 г.), винтообразные поверхности [22], трехосные эллипсоиды (смотровая площадка «Живописного моста», Москва, 2007 г.) и эллиптические параболоиды (стержневое покрытие стадиона «Шахтер», До нецк, Украина, 2009 г.). Очевидно, что криволинейная архитектура стремительно развивается во многих странах мира [5].

Именно в этот период применительно к сооружениям криволинейной формы возникло несколько архитектурных стилей и архитектурных течений. Например, стиль «Деконструктивизм» дал предпосылки к возникновению архитектурного стиля «Архитектура свободных форм» (с 2002 г.), который положил начало архитектурному направлению «В.Л.О.В.» (пузырьковая архитектура, с 2003 г., рисунок 9). Из «Деконструктивизма» в 2010 г. отделился архитектурный стиль «Параметризм» [25].

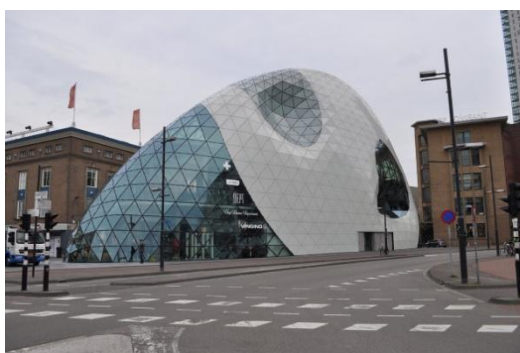


Рисунок 9 – Вход в торговый центр, Эйндховен, Нидерланды, арх. М. Фуксас

На основе «Промышленной архитектуры» возникло архитектурное направление «Продуктивизм» (с 2015 г.).

Архитектурное направление «Цифровая архитектура» стало иметь самостоятельное отдельное ответвление (архитектурное течение) – «Архитектура минимальных форм» (с 2005 г.).

В XXI-ом веке в рамках архитектурной группы «Новейшие стили» появилась «Параметрическая архитектура» (с 2008 г.) [22], которая дала начало стилю «Генеративная архитектура» (с 2008 г.). Из «Нелинейной архитектуры» возникло архитектурное направление «Фрактальная архитектура» (1995–2002 гг.) [13, 26], рисунок 10.

Хронология становления этих новейших стилей в архитектуре с соответствующими иллюстрациями приведена в работе [27].



*Рисунок 10 – Жилой комплекс Вайле, Дания, 2006-2018 гг.
(фрактальная архитектура), арх. бюро "Henning Larsen Architects"*

Результаты исследования

Авторы соглашаются с теми исследователями, которые утверждают, что в XXI веке интерес к проектированию и строительству тонких оболочек и оболочечных структур возрождается, особенно у молодых архитекторов и инженеров. Ведутся исследования по изучению положительного эмоционального воздействия криволинейных форм сооружений, что стимулирует отход от прямолинейности и способствует развитию криволинейности в архитектуре [28] (рисунок 11).



Рисунок 11 – Часовня Bosjes Capony, Western Cape, ЮАР, из литого бетона, 2016 г., (волнистая поверхность), арх. К. Стейн



Рисунок 12 – Концертный зал «Sage Gateshead», Гейтсхед, Англия; стекло, нержавеющая сталь, 2004 г., (аналитически не задаваемая поверхность), арх. Н. Фостер

На данный момент остались невостребованными в строительстве и архитектуре такие интересные с архитектурной и функциональной точки зрения поверхности как поверхности зонтичного типа, поверхности диагонального переноса велагоидального типа, поверхности плоскопараллельного переноса конгруэнтных кривых [24], циклические поверхности [29], в частности, циклиды Дюпена [30]. Не в полной мере используются спиралевидные и винтообразные поверхности.

Установлено, что наиболее интересные реализованные в натуре проекты предоставили Подгорнов Е.В. (ТРЦ «PITERLAND», РФ, 2012 г., сфера), финская фирма «Фексима» с главным архитектором проекта Л.А. Ильчик (Фондовая оранжерея ГБС РАН, 2016, цилиндрическая поверхность), Гельмут Ян (один из символов Берлина - центр SONY, ФРГ, 2000 г.), С. Калатрава (Дворец искусства королевы Софии и планетарий комплекса «Город искусства и науки», Валенсия, Испания, 2005 г., сфера), Н. Фостер (центр музыкального образования, концертов и конференций «Sage Gateshead», Англия, выполненный из стекла и нержавеющей стали, 2004 г., аналитически не задаваемая поверхность, рисунок 12), Поль Андре (Большой Народный театр, Китай, 2007 г.; Osaka Maritime Museum, Япония, 2000 г.), Заха Хадид (культурный центр Г. Алиева в Баку, Азербайджан, 2012 г.), F.O. Gehry (Marques De Riscal Hotel, Elciego, 2006 г.), Pei I.M. (Немецкий исторический музей, Берлин, 2001 г.), Хироши Накамура (Hiroshi Nakamura, футуристическая свадебная часовня в виде двух спиральных лестниц со стальным каркасом, обшитом деревянными панелями, Ономити, Япония, 2013 г.), О. Нимейри (Museu Nacional Honestino Guimarães By Oscar Niemeyer, 2006, сфера), Су Фудзимото (дом венгерской музыки в Будапеште с отверстиями в покрытии для деревьев, образцовая экология по стандартам BREEAM, 2021 г.), Халили Надер («Эко купол» из глины и соломы, экологически чистое жилье для Африки), Крамаренко В. (стеклянный купол зала Победы музея Истории ВОВ, Минск, 2014 г. сфера), Видечник Ш. («Борисов-Арена» - стадион змея, 70 км от Минска, Белоруссия, 2014 г.), Саймон Велес (Simon Vélez, бамбуковая архитектура оболочечных структур, Колумбия).

В 21-м веке архитекторами были использованы 16 архитектурных стилей, а именно [5]:

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., рисунок 13), *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* (2018 г.), *Брутализм* [31] (рисунок 14), *Ноосферная архитектура* (купола В.И. Грибнева), *Параметрическая архитектура, Архитектура свободных форм* (числовая архитектура), *Продуктивизм* [5].



Рисунок 13 - Терминал № 5 аэропорта им. Дж. Кеннеди, 2008 г.
(американский модернизм, зонтичная поверхность),
арх. Э. Сааринен [avia.wikisort.org]

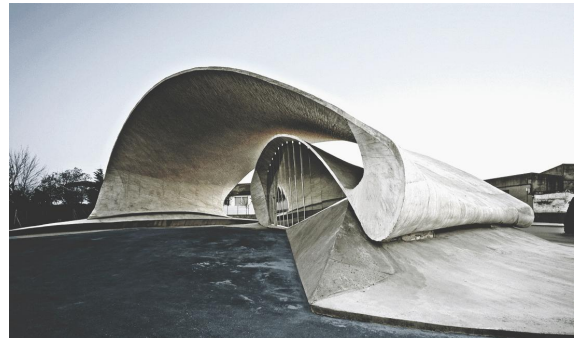


Рисунок 14 - Автостанция Касар-де-Касерес, Испания, 2003 г.
(новый брутализм, аналитически задаваемая поверхность, бетон), арх. Х.Г. Рубио

Заключение

Появление новых архитектурных стилей и направлений в рамках архитектурной группы «Новейшие стили», возникшей в 1995 году, и архитектурных подгрупп и течений в рамках уже существовавших стилей показывает большую заинтересованность архитекторов в создании новых криволинейных сооружений, проектировании оболочечных структур, жестких тонких оболочек со срединными аналитическими поверхностями, тентовых покрытий, пневматических сооружений, вантовых и висячих структур. Но И.А. Бондаренко [32] предупреждает, «что при этом нельзя скатываться к популизму. Необходимо во всём соблюдать чувство меры. К сожалению, сегодня все успехи и неудачи архитекторов основаны, главным образом, на их персональных деловых и человеческих качествах. Слишком поощряется индивидуализм и гипертрофированная – «прорывная» – творческая креативность. ... Это приводит к тому, что за профессиональное достижение может выдаваться нечто несостоятельное, за архитектурную новацию – бессмысленное дизайнерское оригинальничание».

Таким образом, последнее слово остаётся за архитектором, работающим непосредственно над конкретным проектом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Krivoschapko 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. 2014. Vol. 18. Iss. 2. Pp. 95-108.
2. Krsić S. Geometrijske površi u arhitekturi. Građevinsko-arhitektonski fakultet Univerzitet u Nišu. Štampa Galaksija, Niš. 2012. 238 p.
3. Butelski K. The Architecture of Curved Shapes // Nexus Network Journal. January. 2000. Vol. 2. No. 1. Pp. 19-23. doi:10.1007/s00004-999-0004-x.

4. Encyclopedia of 20-th Century Architecture. R. Stephen Sennot, Editor. Taylor & Francis Group. NY. 2003. doi:4324/9780203483886
5. Krivoshapko S.N. Shell structures and shells at the beginning of the 21st century // Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings. 2021. Vol. 17. No. 6. Pp. 553-561. doi:10.22363/1815-5235-2021-17-6-553-561
6. Adnan F., Yunus R.M. The influence of curvilinear architectural forms on environment behaviour // Procedia - Social and Behavioral Sciences. December 2012. Vol. 49. Pp. 341-349. doi:10.1016/j.sbspro.2012.07.032
7. 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. № 4(102). С. 112-131. doi:10.33979/2073-7416-2022-102-4-112-131
8. 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
9. Сысоева Е.В. Научные подходы к расчету и проектированию большепролетных конструкций // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. № 2(101). С. 131-141. doi:10.22227/1997-0935.2017.2.131-141
10. Братухин А.Г., Сироткин О.С., Сабодаш П.Ф., Егоров В.Н. Материалы будущего и их удивительные свойства. М. : Машиностроение, 1995. 128 с.
11. Киселева И.А. Применение кривых поверхностей в строительстве и инженерной практике / В сб.: Дни студенческой науки. Сб. докладов научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ студентов института строительства и архитектуры. Министерство образования и науки Российской Федерации. МГСУ. 2018. С. 319-321.
12. Gil-oulbe Mathieu. Reserve of analytical surfaces for architecture and construction // Building and Reconstruction. 2021. No. 6 (98). Pp. 63-72. doi:10.33979/2073-7416-2021-98-6-63-72
13. Zhou F.-X. A constant slope surface and its application / 3rd International Conference on Geology, Mapping and Remote Sensing (ICGMRS), 2022. Pp. 78-81. doi:10.1109/ICGMRS55602.2022.9849334
14. Иванов В.Н., Алешина О.О. Геометрия прямых коноидов с ортогональной системой координат // Строительная механика и расчет сооружений. 2023. № 2 (307). С. 53-62. doi:10.37538/0039-2383.2023.2.53.62
15. Zhang J., Wang M., Wang W., Tang W. Buckling of egg-shaped shells subjected to external pressure // Thin-Walled Structures. 2017. Vol. 113. Pp. 122-128
16. Иванов В.Н. Геометрия и формообразование многогранных коробчатых криволинейных поверхностей на базовой циклической поверхности // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2012. № 2. С. 3-10.
17. Krivoshapko S.N. Geometry and strength of general helicoidal shells // Applied Mechanics Reviews. May 1999. Vol. 52. No. 5. Pp. 161-175. doi:10.1115/1.3098932
18. Velimirović L.S., Radivojević G., Stanković M.S., Kostić D. Minimal surfaces for architectural constructions // Facta Universitatis. Series: Architecture and Civil Engineering. 2008. Vol. 6. No 1. Pp. 89-96. doi:10.2298/FUACE0801089V
19. 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
20. Чешкова М.А. Тор Клиффорда и бутылка Клейна // Известия Алтайского государственного университета. 2017. № 1 (93). С. 144-14. doi:10.14258/izvasu(2017)1-29
21. Ганеева М.С., Скворцова З.В. Напряженно-деформированное состояние катеноидной оболочки вращения из ортотропного материала // Актуальные проблемы механики сплошной среды. К 20-летию ИММ КазНЦ РАН: сб. статей. Том II. Казань: ИММ КазНЦ РАН, 2011. С. 153-160.
22. 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>.
23. Иванов В.Н., Рынкoвская М.И. Применение циклических поверхностей в архитектуре зданий, конструкций и изделий // Вестник РУДН. Инженерные исследования. 2015. № 3. С. 111-119.
24. Гринько Е.А. Поверхности плоскопараллельного переноса конгруэнтных кривых // Строительная механика и расчет сооружений. 2021. № 3. С. 71-77. doi:10.37538/0039-2383.2021.3.71.77
25. Барчугова Е.В. Параметризм как направление современной проектной деятельности // Архитектура и современные информационные технологии. 2013. № 4(25). 4 с. EDN: RRETSJ
26. Маяцкая И.А., Беловолов М.Г. Применение фрактальных поверхностей при проектировании сооружений // Актуальные проблемы науки и техники: Материалы Национ. науч.-практ. конф. Ростов-на-Дону, Дон. гос. техн. ун-т (ДГТУ). Ростов-на-Дону, 2020. С. 1695-1697.
27. 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. Т. 18. № 3. С. 255-268. doi:10.22363/1815-5235-2022-18-3-255-268
28. Марченко Л.А., Негай Г.А. Анализ криволинейности в архитектуре // Новые идеи нового века: Материалы Международной научной конференции. ФАД ТОГУ. 2013. Т. 1. С. 191-197. [EDN: PZAIAB].

29. Hyeng Christian A. Bock, Yamb Emmanuel B. Application of cyclic shells in architecture, machine design, and bionics // *Int. J. of Modern Engineering Research*. 2012. Vol. 2. No. 3. Pp. 799-806.
30. Бойков И.К. Геометрия циклид Дюпена и их применение в строительных объектах // *Расчет оболочек строительных конструкций*. М.: УДН. 1982. С. 116-129.
31. Иващенко Н.А. Архитектура брутализма в зарубежном и российском искусствознании после Рейнера Бэнэма // *Артикульт*. 2022. №4(48). С. 6-16. doi:10.28995/2227-6165-2022-4-6-16
32. Бондаренко И.А. Об уместности и умеренности архитектурных новаций // *Academia // Архитектура и строительство*. 2020. № 1. С. 13-18. <http://aac.raasn.ru/index.php/aac/article/view/185>. (дата обращения: 24.03.2023).

REFERENCES

1. 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*. 2014. Vol. 18. No. 2. Pp. 95-108.
2. Krsić Sonja. Geometrijske površi u arhitekturi. *Gradevinsko- arhitektonski fakultet Univerzitet u Nišu. Štampa Galaksija, Niš*, 2012. 238 p.
3. Butelski K. The Architecture of Curved Shapes. *Nexus Network Journal*. January 2000. Vol. 2(1). Pp. 19-23. doi:10.1007/s00004-999-0004-x.
4. Encyclopedia of 20-th Century Architecture. R. Stephen Sennot, Editor. Taylor & Francis Group. NY. 2003. doi:4324/9780203483886
5. Krivoshapko S.N. Shell structures and shells at the beginning of the 21st century. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2021. Vol. 17. No. 6. Pp. 553-561. doi:10.22363/1815-5235-2021-17-6-553-561
6. Adnan F., Yunus R.M. The influence of curvilinear architectural forms on environment behavior. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. December 2012. No. 49. Pp. 341-349. doi:10.1016/j.sbspro.2012.07.032
7. 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
8. 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)
9. Sysoeva E.V. Nauchnye podkhody k raschetu i proektirovaniyu bol'sheproletnykh konstruksiy [Scientific Approaches to Calculation and Design of Large-Span Structures]. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2017. Vol. 12. No. 2(101). Pp. 131-141. doi:10.22227/1997-0935.2017.2.131-141 (rus.)
10. Bratukhin A.G., Sirotkin O.S., Sabodash P.F., Egorov V.N. Materials of Future and their Wonderful Properties. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1995. 128 p. (rus)
11. Kiseleva I.A. The application of curvilinear surfaces in building and engineering practice. In book: *Dni Studencheskoy Nauki [Days of Student Science]*. Proc.: Reports of Scientific-and-Technical Conference under the Final Results of Scientific-and-Research Works of Students of Institute of Building and Architecture of MONRF, MGSU, 2018. Pp. 319-321.
12. Gil-oulbe Mathieu. Reserve of analytical surfaces for architecture and construction // *Building and Reconstruction*. 2021. No. 6 (98). Pp. 63-72. doi:10.33979/2073-7416-2021-98-6-63-72
13. Zhou F.-X. A constant slope surface and its application. *2022 3rd International Conference on Geology, Mapping and Remote Sensing (ICGMRS)*. 2022. Pp. 78-81. doi:10.1109/ICGMRS55602.2022.9849334
14. Ivanov V.N., Aleshina O.O. Geometry of right conoids with an orthogonal coordinate system. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2023. No. 2(307). Pp. 53-62. doi:10.37538/0039-2383.2023.2. 53.62 (rus)
15. Zhang J., Wang M., Wang W., Tang W. Buckling of egg-shaped shells subjected to external pressure. *Thin-Walled Structures*. 2017. Vol. 113. Pp. 122-128.
16. Ivanov V.N. Geometry and forming of the polyhedral box type surfaces on base cyclic surface. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2012. No. 2. Pp. 3-10. (rus)
17. Krivoshapko S.N. Geometry and strength of general helicoidal shells. *Applied Mechanics Reviews*. May 1999. Vol. 52. No. 5. Pp. 161-175. doi:10.1115/1.3098932
18. Velimirović L.S., Radivojević G., Stanković M.S., Kostić D. Minimal surfaces for architectural constructions. *Facta Universitatis. Series: Architecture and Civil Engineering*. 2008. Vol. 6. No 1. Pp. 89-96. doi:10.2298/FUACE0801089V
19. 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. doi:10.21869/2311-1518-2021-33-1-3-11 (rus)

20. Cheshkova M.A. Clifford torus and Klein bottle. *Izvestiya Altaiskogo Gosudarstvennogo Universiteta*. 2017. No. 1 (93). Pp. 144-147. doi:10.14258/izvasu(2017)1-29 (rus)
21. Ganeyeva M.S., Skvortzova Z.V. Stress-strain state of catenoid shell of revolution from orthotropic material. *Aktualnie Problemi Mehaniki Sploshnoy Sredy [Actual Problems of Mechanics of Solid Body]*. IMM KazNTz RAN. Vol. II. Kazan, 2011. Pp. 153-160. (rus)
22. Mamieva I.A. Analytical surfaces for parametrical architecture in contemporary buildings and structures. *Academia. Architecture and Construction*. 2020. No. 1. Pp. 150-165. <http://aac.raasn.ru/index.php/aac/article/view/201> (date of application: 24.03.2023). (rus)
23. Ivanov V.N., Rynkovskaya M.I. Application of circular surfaces to the architecture of the buildings, structures and products. *RUDN journal of engineering research*. 2015. No. 3. Pp. 111-119. (rus)
24. Grinko E.A. Surfaces of plane-parallel transfer of congruent curves. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2021. No. 3. Pp. 71-77. doi:10.37538/0039-2383.2021.3.71.77 (rus)
25. Barchugova E.V. Parametrisation as direction of the modern project. *Architecture and modern information technologies*. 2013. No. 4(25). 4 p. EDN: RRETSJ. (rus)
26. Mayatzkaya I.A., Belovolov M.G. Application of fractal surfaces in design of erections. *Aktualnie Problemi Nauki i Tekhniki [Actual Problems of Science and Engineering]*. DGTU, Rostov-na-Donu. 2020. Pp. 1695-1697. (rus)
27. Krivoschapko S.N. On the basic architectural styles, directions, and style flows for shells and shell structures. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2022. Vol. 18. No. 3. Pp. 255-268. doi:10.22363/1815-5235-2022-18-3-255-268. (rus)
28. Marchenko L.A., Negay G.A. Curvilinear analysis in architecture. *Novie Idei Novogo Veka [New Ideas of New Century]*. Proc. of International Scientific Conference FAD TOGU. 2013. Vol. 1. Pp. 191-197. (rus)
29. Hyeng Christian A. Bock, Yamb Emmanuel B. Application of cyclic shells in architecture, machine design, and bionics. *Int. J. of Modern Engineering Research*. 2012. Vol. 2. No. 3. Pp. 799-806.
30. Boikov I.K. Geometry of Dupin cyclides and their application for building structures. *Raschet Obolochek Stroitel'nykh Konstruktsiy [Analysis of Shells of Building Structures]*. Moscow: UDN, 1982. Pp. 116-129. (rus)
31. Ivaschenko N.A. Brutalist architecture in Russian and foreign art history after Reyner Banham. *Articult*. 2022. No. 4(48). Pp. 6-16. doi:10.28995/2227-6165-2022-4-6-16. (rus)
32. Bondarenko I.A. On the appropriateness and moderation of architectural innovation. *Academia. Arkhitektura i Stroitel'stvo. Academia. Architecture and Construction*. 2020. Vol. 1. Pp. 13-18. <http://aac.raasn.ru/index.php/aac/article/view/185>. (date of application: 24.03.2023). (rus)

Информация об авторах:

Алборова Лана Анатольевна

Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений (ЦНИИПромзданий), г. Москва, Россия, архитектор отдела архитектурно-строительной мастерской -1.

E-mail: dikko@yandex.ru

Мамиева Ираида Ахсарбеговна

Российский университет дружбы народов им. П. Лумумбы, г. Москва, Россия, ведущий специалист инженерной академии РУДН.

E-mail: i_mamieva@mail.ru

Information about authors:

Alborova Lana A.

Central Scientific Research Institute for Industrial Buildings and Structure, Moscow, Russia, architect of the department of architectural and construction workshop -1.

E-mail: dikko@yandex.ru

Mamieva Iraida A.

RUDN University, Moscow, Russia, lead specialist at the Engineering Academy.

E-mail: i_mamieva@mail.ru

А.Е. ЕНИН¹, А.Э. ЗАПЛАВНАЯ¹¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж, Россия

СПЕЦИФИКА ПОСЛЕВОЕННОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ КВАРТАЛЬНОЙ ЗАСТРОЙКИ ИСТОРИЧЕСКОГО ЦЕНТРА Г. ВОРОНЕЖА В XX В.

Аннотация. В настоящей статье рассматриваются аспекты формирования и модернизации исторических морфотипов квартальной застройки центральной части г. Воронежа в период послевоенной реконструкции (1945–1950-е гг.). Выдвигается гипотеза о значимости в современных архитектурно-градостроительных исследованиях онтологического познания основных этапов модернизации архитектурно-планировочной структуры современного исторического городского центра, в том числе в процессе создания принципов ее функционально-пространственной организации. Объектом настоящего исследования является сложившаяся к моменту периода послевоенного восстановления архитектурно-градостроительная среда исторического центра г. Воронежа. Проводится системный ретроспективный анализ архитектурно-планировочной структуры г. Воронежа в период послевоенного восстановления: системным подходом выявляются внешние и внутренние факторы, определяющие принципы реконструкции исторического городского центра в период послевоенного восстановления СССР как сложного многоуровневого объекта; определяются и фиксируются в соответствии с выявленными факторами границы исследования; систематизируются параметры исследуемой территории в определенный временной период на различных иерархических уровнях, а также определяется фонд преемственных историко-градостроительных ценностей, выраженных в материально-пространственном и функциональном эквиваленте.

В результате настоящего исследования определяются устойчивые архитектурно-градостроительные тенденции пространственного и функционального преобразования исследуемой территории в период послевоенного восстановления г. Воронежа, необходимые для организации корректного процесса реконструкции в настоящее время. Историко-архитектурный и градостроительный анализ, проведенный на основе историко-архивных и библиографических исследований, позволил сформировать типологию исторических морфотипов застройки г. Воронежа в период послевоенного восстановления, а также определить крайние преобразования, несущие в себе историко-культурный код. Сформированы системные принципы послевоенной реконструкции архитектурно-планировочной структуры по двум направлениям, дифференцированные на основе выявленных в результате системного подхода типологических групп планировочных элементов функционально-пространственной организации городского центра в рассматриваемый период.

Ключевые слова: реконструкция, ретроспективный анализ, конструктивизм, советский неоклассицизм, послевоенное восстановление, исторический городской центр.

А.Е. ENIN¹, А.Е. ZAPLAVNAYA¹¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

THE SPECIFICS OF THE POST-WAR RECONSTRUCTION OF THE HISTORICAL CENTER OF VORONEZH (1943-1959)

Abstract. This article discusses the aspects of the formation and modernization of historical morphotypes of the block development of the central part of Voronezh during the post-war reconstruction (1945-1950-ies). The hypothesis is put forward about the importance in the present architectural and urban studies of ontological knowledge of the main stages of modernization of the architectural and planning structure of the modern historical urban center, including in the process of creating the principles of its functional and spatial organization.

The object of this study is the architectural and urban planning environment of the historical center of Voronezh that has developed by the time of the post-war reconstruction period. A systematic retrospective analysis of the architectural and planning structure of Voronezh is carried out: the external and internal factors determining the principles of reconstruction of the historical urban center during the post-war restoration of the USSR as a complex multilevel object of the "population and environment" type are identified and fixed in accordance with the identified factors of the boundaries of the study; the parameters of the studied territory are systematized in a certain time period at various hierarchical levels, and the fund of successive historical and urban values expressed in material, spatial and functional equivalents is determined.

As a result of this study, the stable architectural and urban planning trends of spatial and functional modernization of the studied territory during the post-war reconstruction of Voronezh are determined, which are necessary for the organization of a correct reconstruction process at the present time. The historical-architectural and urban planning analysis carried out on the basis of historical-archival and bibliographic studies allowed us to form a typology of historical morphotypes of the city's buildings. Voronezh in the period of post-war reconstruction, as well as to identify extreme modernizations that carry a historical and cultural code. The system principles of the post-war reconstruction of the architectural and planning structure in two directions have been formed, differentiated on the basis of typological groups of planning elements of the functional and spatial organization of the urban center identified as a result of the systematic approach in the period under consideration.

Keywords: reconstruction, retrospective analysis, constructivism, Soviet neoclassicism, post-war reconstruction, historical city center.

Введение

В настоящее время архитектурно-градостроительная среда современного исторического российского города дифференцирована как по материально-пространственным показателям, так и по функциональным. Проблемы некорректной модернизации архитектурно-планировочной структуры приводят к понижению индекса качества жизни. Определяющим критерием в создании феномена функционально-пространственной дифференциации в современном историческом городском центре является историко-культурная городская среда, находящаяся под государственной охранной. Она ограничивает своими материальными параметрами качественно и количественно потенциальную или проектируемую искусственную городскую среду. Авторами настоящей статьи выдвигается гипотеза о том, что формирование принципов, а, следовательно, и корректных методов модернизации архитектурно-градостроительных систем невозможно без определения основных формаций предшествующего эволюционного этапа их развития.

В настоящем исследовании крайняя эволюционная волна формирования историко-культурной городской среды определяется периодом послевоенного восстановления исторических городских центров СССР (1945–1950-е гг.), идеологические принципы которой были сформированы под влиянием определенных внешних факторов, выраженных в архитектурном стиле советского неоклассицизма. Данный период обусловлен современной политикой по охране объектов культурного наследия: здания, построенные в данный период в соответствующем стилистическом направлении, являются самыми «молодыми» в реестре объектов культурного наследия городов РФ, что означает наличие их историко-архитектурной ценности. Таким образом, целью настоящего исследования является выявление и систематизация результатов системного ретроспективного эксперимента принципов преобразования архитектурно-планировочной структуры современного российского города под влиянием крайней исторически-ценной идеологической волны периода советского неоклассицизма на примере г. Воронежа.

Степень научной разработанности темы исследования

Настоящая статья основывается на историко-архивных и библиографических исследованиях. Одними из значительных фактологических источников являются архивные материалы Государственного архива Воронежской области (ГАВО)¹, в которых рассмотрены отчеты Управления главного архитектора г. Воронежа в период послевоенного восстановления (1945-1950-е гг.) под руководством Н.В. Троицкого. Были изучены периодические издания 1920-1990-х гг., характеризующие образование, быт и городскую среду г. Воронежа на протяжении XX в.: в газетах «Коммуна»² и «Известия»³ 1920-1950-е гг. и «Воронежский курьер» 1990-е гг.⁴ Наиболее ранним трудом в области исследования архитектурно-планировочной структуры г. Воронежа, в т. ч. в период послевоенного восстановления, является монография «Облик будущего Воронежа» (Н. В. Троицкий, 1953 г.) В 2000-2010-х гг. изданы историко-краеведческие работы, в которых раскрыты основные этапы формирования города – В.А. Митин П.А. Попов, Г.А. Чесноков, и др.

Общие аспекты реконструкции на примерах послевоенного восстановления российских городских центров рассмотрены в монографиях А.В. Иконникова, А.А. Кедринского, Т.Г. Малининой, И.А. Москаленко Г.А. Птичниковой, И.Г. Федченко, Ю.В. Янушкиной. Социально-экономические и политические факторы, определяющие процесс преобразования архитектурно-планировочной структуры в период послевоенного восстановления отражены в работах Р.Г. Аракеяна, И.Н. Вельможко, С.О. Хан-Магомедова, Д.С. Хмельницкого и др.

Методика исследования

Системный ретроспективный анализ становления и развития архитектурно-планировочной структуры г. Воронежа в период 1940-1950-х гг. проводится с целью определения критериев модернизации системных принципов организации архитектурно-градостроительной среды в настоящее время. Точность и достоверность предвидения, прежде всего, определяются насколько глубоко и всесторонне изучены как предшествующее и современное состояние предмета исследования, так и закономерности его изменения. Рассматривая архитектурно-планировочную структуру г. Воронежа с позиций системного подхода, т.е. как самодостаточную систему, на которую воздействуют факторы внешней среды, в данном случае архитектурно-градостроительной политики СССР, необходимо определить характер и степень действия внутренних факторов, так как в отличие от

1 Архивные материалы Государственного архива Воронежской области (ГАВО):

1) Государственный архив Воронежской области. Ф.Р. 3138. Оп. 1. Д. 11. Л. 18. [Личный фонд Н.В. Троицкого. Отчет о работе Н.В. Троицкого за 1945 год].

2) Государственный архив Воронежской области. Ф. Р - 3138. Оп. 1. Д. 14. [Личный фонд Троицкого Н.В. Отчет о работе Управления главного архитектора г. Воронежа за 1947 год].

3) Государственный архив Воронежской области. Ф. Р - 3138. Оп. 1. Д. 20. Л. 7. [Личный фонд Троицкого Н.В. Отчет о работе Управления главного архитектора г. Воронежа за 1950 год].

4) Государственный архив Воронежской области. Ф. Р - 3138. Оп. 1. Д. 54. Л. 1-13. [Фотографии административных и жилых зданий в г. Воронеже. 1943-1952 гг.].

5) Государственный архив Воронежской области. Ф. Р - 3138. Оп. 1. Д. 50. Л. 1-9. [Фотографии проектов административных и жилых зданий, построенных в г. Воронеже по проектам Н.В. Троицкого 1928-40 гг.].

6) Государственный архив Воронежской области. Ф. Р - 3138. Оп. 1. Д. 56. Л. 1-8. [Фотографии проектов административных и жилых зданий, построенных в городе Воронеже по проектам Н.В. Троицкого. 1938-1952 гг.].

7) Государственный архив Воронежской области. Ф. Р - 3138. Оп. 1. Д. 59. Л. 1-6. [Эскизы фасадов жилых 5-этажных домов для г. Воронежа].

2 Послевоенное восстановление дома // Коммуна. 1950. 29 окт.

3 Воронежский горкоммунотдел // Известия. 1929. 3 февр.

4 Попов П. А. Свой среди своих, чужой среди чужих // Воронежский курьер. 1999. 29 июл.

столичных и других крупных городов СССР, г. Воронеж не обладал схожими по степени и характеру действия экономическими и архитектурно-градостроительными ресурсами. Так как аспекты послевоенной реконструкции определяются также зданиями периода конструктивизма и пост конструктивизма, принято решение в настоящей статье рассмотреть аспекты архитектурно-градостроительной политики в г. Воронеже в период 1920-1930-х гг.

Таким образом, предложенный анализ изменений в архитектурно-планировочной структуре историко-культурной среды г. Воронежа обусловлен временными границами, определенные этапами развития градостроительной деятельности в СССР (1920–1980-е гг.)

Анализ трансформаций разбит на три этапа: идеология конструктивизма в 1920 – 1930 гг., этап пост конструктивизма 1935-1940-е гг., послевоенный период 1940–1950-х гг. Территориальные границы исследования устанавливаются в процессе настоящего исследования и обусловлены квартальной застройкой исторического центра г. Воронежа. С целью определения более точной информационной модели архитектурно-планировочной структуры исторического центра г. Воронежа предлагается дифференциация полученных данных системного ретроспективного эксперимента на материально-пространственные, а именно планировочные (иерархический уровень: городской центр) и архитектурные (иерархический уровень: здание), и функциональные параметры. Для выполнения данной задачи используются положения из ранее проведенных исследований авторов настоящей статьи [5-7]. Во-первых, это “типология разделения структур жилой среды по культурным включениям в рамках анализа системных принципов реконструкции историко-культурной среды центральной части г. Воронежа” [5]; во-вторых, это “исторические морфотипы квартальной жилой застройки и этапы их модернизации” [5] в г. Воронеже; в-третьих, это определенная на примере исторического центра г. Воронежа “степень и периоды влияния идеологических постулатов государственных органов на формирование архитектурно-планировочной структуры” [6].

Реконструкция исторических городских центров в XX в.

Реконструкция исторических городских центров в СССР в XX в. была направлена на реабилитацию архитектурно-планировочной структуры (далее по тексту: АПС) с целью адаптации под новые социально-функциональные потребности общества. Главная цель реконструкции – создание материально-технической базы и архитектурно-пространственной среды, обеспечивающей наиболее благоприятные условия для жизни населения – труда, быта и отдыха. В связи с этим “реконструкция связана с планомерной перестройкой города, с обновлением и развитием его планировочной структуры, увеличением объемов общественной застройки и озеленения, модернизацией старого и созданием нового жилищного фонда, с постоянным совершенствованием благоустройства и повышением архитектурно-художественной выразительности облика города” [1]. Степень и концептуальная составляющая реконструктивных вмешательств была выражена в соответствующей определенному временному периоду архитектурной стилистике и обусловлена различными факторами внешней среды: политическими, идеологическими, социальными, экономическими и историко-культурными. В настоящем исследовании выделяются следующие эволюционные этапы формирования и модернизации архитектурно-градостроительной среды в исторических городских центрах СССР в XX в.: идеология коммунизма (1920-е гг.), переходный период (1930-е гг.) и советский неоклассицизм 1935-1950-е гг.

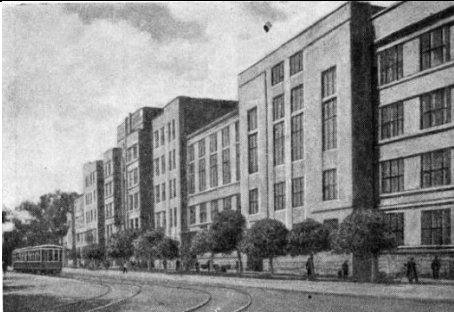
В XX в. градостроительная деятельность в СССР была определена выявленными факторами внешней среды, комплексно решающими следующие вопросы: создания новых принципов организации социальной основы жизни людей в стране (политический и идеологический факторы); повышения качества городской среды, за счет реконструкции и нового строительства (социальный фактор); совершенствования функциональности городского центра в процессе его модернизации, в т.ч. улучшения транспортной доступности (экономический фактор); сохранения историко-культурного архитектурного и градостроительного наследия, а также создание эстетического образа города (культурный фактор).

Архитектурно-стилистический и функциональный анализ исторического центра г. Воронежа в 1920-1950-е гг.

Определяющим фактором формирования как архитектурно-стилистических особенностей, так и планировочных на различных иерархических уровнях в период конструктивизма, является идеологический: “конструктивизм оказался элитарно-авангардным явлением и в силу этого не мог претендовать на признание широкими народными массами как своего” [19]. Архитектурный стиль конструктивизм, возникший в 1920-е гг. в столичных городах, нашел свое развитие в конце 1920-х гг. в г. Воронеже: “...«индустриальность», лежащая в основе концепции конструктивизма, не воплотилась в г. Воронеже в полной мере в силу специфики на этом этапе развития строительного комплекса города и поэтому стиль конструктивизма не был реализован в «чистом» виде” [7]. В виду данной специфики материально-пространственного аспекта формирования облика г. Воронежа архитектурно-стилистическое направление зданий, сооруженных в период конструктивизма, в настоящей статье определяются термином «стилетика конструктивизма». В отношении материально-пространственной среды, в отличие от столичных и крупных городов СССР, в г. Воронеже постройки стилистики конструктивизма интегрировались в сложившуюся АПС посредством метода докомпоновки, т.е. не диссонировали по объемно-пространственным параметрам со сложившейся исторической застройкой, в связи с отсутствием действующего генерального плана.

В функциональном аспекте реконструкции исторического городского центра в рассматриваемый период отличительным явлением в г. Воронеже являлось строительство жилых зданий, которое пришлось на «закат» идеологии коммунизма в СССР, предполагающего полное обобществление быта. Первое жилое многоквартирное здание стилистики конструктивизма (таблица 1, проект жилого многоквартирного дома по ул. Карла Маркса, 94) по проекту Н.В. Троицкого предполагалось как дом-коммуна, об этом свидетельствуют архивные источники², а также натурное обследование планировочной структуры здания, проведенное в 2020 г. [7]. Несмотря на это, накануне ввода здания в эксплуатацию, планировочную структуру переформировали под индивидуальные, а не коммунальные, жилые квартиры. Таким образом, данный многоквартирный жилой дом является единственным, содержащим в себе признаки «чистого» в функциональном аспекте конструктивизма. Так, несмотря на выдержанную ложную архитектурную стилистику конструктивизма, ни одно жилое здание в г. Воронеже не было реализовано как дом-коммуна. Функционально-пространственный и архитектурно-стилистический анализ зданий стилистики конструктивизма приведен в таблице 1 и на сводной схеме (рисунок 1).

Таблица 1 – Архитектурно-стилистический анализ зданий стилистики конструктивизма г. Воронежа 1920-1930-х гг.

Общественные здания	Жилые здания
 1 - Здание управление ЮВЖД (пр. Революции, 18). Архивное фото 1930-х гг. Экспликация к схеме: № 1	 2 - Проект жилого многоквартирного дома (ул. Карла Маркса, 94). Архивное фото 1929 г. Экспликация к схеме: № 2
 3 - Корпус ЮВЖД (ул. Фр. Энгельса, 7). Архивное фото 1930-х гг. Экспликация к схеме: № 3	 4 - Жилой многоквартирный дом (Пл. Ленина, 6). Архивное фото 1930-х гг. Экспликация к схеме: № 4
 5 - Здание управления НКВД (ул. Володарского, 39). Архивное фото 1930-х гг. Экспликация к схеме: № 5	 6 - Жилой дом на улице ИТР (ул. Чайковского 4) Архивное фото 1930-х гг. Экспликация к схеме: № 6

Источники изображений таблицы 1 приведены в примечании⁵

В начале 1930-х гг. полное обобществление быта людей (социальный фактор) не состоялось как средство достижения идеологических целей коммунизма, постепенно возникла тенденция экономического развития страны (экономический фактор) в рамках идеологии социализма. В отличие от периода конструктивизма, в г. Воронеже пост конструктивизм как новая идеологическая волна пришел вовремя. Появившиеся здания в стилистике пост конструктивизма отражают в своем конструктивистом каркасе элементы неоклассицизма: "...до тех пор, пока во второй половине 30-х годов не определился новый

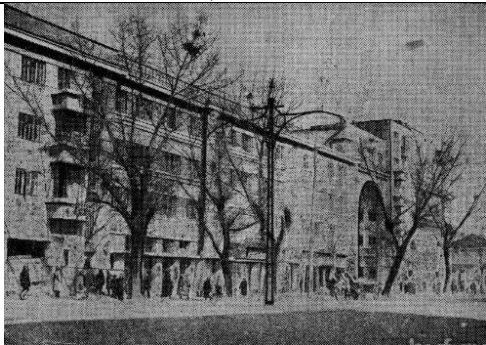
⁵ Источники изображений к таблице 1-4:

PastVu [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pastvu.com/>, свободный – (25.06.2023).

мощный вектор (стремление к классике), все эти поиски имели родимые пятна рационализма и конструктивизма” [17].

Именно под влиянием экономического фактора внешней среды (градостроительная политика СССР) здания стилистики конструктивизма не были возведены в «классических» принципах своих стилистических направлений, что отличает г. Воронеж, от других более крупных городов. По характеру интеграции в сложившуюся АПС объекты конструктивизма и пост конструктивизма поддерживали сложившийся периметральный исторический морфотип застройки на территории квартальной исторической застройки (Регулярный город) [5, 6]. Недостаточная стилистическая идентификация определяет здания, построенные в период 1920–1930-х гг. в г. Воронеже, как объекты стилистики конструктивизма и пост конструктивизма. Функционально-пространственный и архитектурно-стилистический анализ зданий стилистики пост конструктивизма приведен в таблице 2 и на сводной схеме (рисунок 1).

Таблица 2 – Архитектурно-стилистический анализ зданий стилистики пост конструктивизма г. Воронежа 1930-х гг.

<i>Общественные здания</i>	<i>Жилые здания</i>
 1 - Дом книги 1935 год (Пр. Революции, 33). Архивное фото 1930-х гг. Экспликация к схеме: № 7	 2 - Жилой дом (ул. Чайковского, 1). Архивное фото 1930-х гг. Экспликация к схеме: № 8
 3 - Дом связи (Пр. Революции, 35). Архивное фото 1930-х гг. Экспликация к схеме: № 9	 4 - Жилой дом (Пр. Революции, 7). Архивное фото 1940-х гг. Экспликация к схеме: № 10

Источники изображений таблицы 2 приведены в примечании⁵

В послевоенный период начинается восстановление города и происходит процесс реконструкции сложившейся архитектурно-планировочной структуры под усилением влияния архитектурных стилей советского неоклассицизма и сталинского ампира, господствующих в то время в СССР. Определяющими факторами формирования городской

среды является политический и идеологический: стилистика зданий и сооружений этого времени определялась духом и пафосом патриотизма победившего народа.

Согласно архивным материалам Государственного архива Воронежской области (ГАВО)¹, принципы реконструкции АПС г. Воронежа на стратегическом уровне в этот период определялись согласно утвержденному в 1946 г. генеральному плану, разработанного архитекторами Л.В. Рудневым и Н.В. Троицким. В результате проведенных историко-архивных и библиографических исследований, выявлено два направления в послевоенной реконструкции г. Воронежа: рециклинг и модернизация. Дифференциация выявленных направлений обуславливается целевыми функциональными показателями: в зависимости от иерархического уровня, а также характера действия внутренних факторов, выраженных через мероприятия по реконструкции, какого-либо планировочного элемента городской среды, его возможная модернизация определяется выявленными материально-пространственными и функциональными параметрами, которые в различной степени имеют аспекты целевой функции. Так, целевые функциональные показатели являются определяющими системными элементами в функционально-пространственном формировании городской среды.

Рециклинг (1945-1950-е гг.) – мероприятия по реконструкции архитектурно-планировочной структуры ограничивались отдельными зданиями стилистики конструктивизма, в том числе изменившие архитектурную стилистику на советский неоклассицизм, пост конструктивизма, а также разнопериодной исторической застройкой XVII - нач. XX вв., и предусматривали сохранение исходных объемно-пространственных характеристик. Целевым показателем выявления планировочных элементов послевоенного восстановления АПС г. Воронежа в направлении рециклинга является изменение архитектурно-стилистической составляющей (иерархический уровень: здание): “Рассмотрение экономической определяющей в процессе принятия решения о стилевой направленности восстановления зданий стилистики конструктивизма: удорожании (стилистика неоклассицизма) или удешевлении (стилистика конструктивизма) – не может учитываться в полной мере, так как зданий, восстановленных в 1940–1950-х гг. в стилистике советского неоклассицизма в несколько раз больше чем зданий, сохранивших стилистику конструктивизма” [7]. Мероприятия по реконструкции АПС в рамках рециклинга были предусмотрены в первую очередь согласно архивным отчетам УГА (Управление Главного Архитектора)¹ за 1945 г. Так, вышеперечисленные здания либо восстанавливались в исходном архитектурно-стилистическом направлении (не целевой функциональный показатель), либо, в случае некоторых зданий периода конструктивизма, в стилистике советского неоклассицизма (целевой функциональный показатель).

Последний специфический аспект послевоенной реконструкции относится к уникальной типологической группе в рамках направления рециклинга и определяется частью зданий стилистики конструктивизма. Являясь объектами реконструкции сложившейся историко-культурной городской среды в контексте анализа архитектурной стилистики, здания рассматриваемого периода определялись диссонирующими и искажающими исторический облик центра города, но проанализировав их роль в усилении действия заложенных принципов планировочной структуры Регулярного города, можно сделать вывод о непосредственном поддержании сложившегося периметрального морфотипа застройки (рисунок 1). Архитектурный анализ зданий, изменивших архитектурную стилистику конструктивизма на советский неоклассицизм, приведен в таблице 3.

Таблица 3 – Архитектурно-стилистический анализ зданий, изменивших архитектурную стилистику конструктивизма на советский неоклассицизм г. Воронежа 1950-х гг.

<i>Общественные здания</i>	<i>Жилые здания</i>
 1 - Здание управление ЮВЖД (пр. Революции, 18). Рециклинг конструктивизма. Архивное фото 1950-х гг. Экспликация к схеме: № 1	 2 - Жилой многоквартирный дом (ул. Карла Маркса, 94). Рециклинг конструктивизма. Архивное фото 1950-х гг. Экспликация к схеме: № 2
 3 - Здание дома торговли «Утюжок» (пр. Революции, 58). Рециклинг конструктивизма. Архивное фото 1970-х гг. Экспликация к схеме: № 11	 4 - Жилой многоквартирный дом (Пл. Ленина, 6). Рециклинг конструктивизма. Архивное фото 1950-х гг. Экспликация к схеме: № 4
 5 - Здание Госбанка (ул. Театральная, 36). Рециклинг конструктивизма. Архивное фото 1960-х гг. Экспликация к схеме: № 12	 6 - Жилой дом на улице ИТР (ул. Чайковского, 4). Рециклинг конструктивизма. Архивное фото 1930-х гг. Экспликация к схеме: № 6

Источники изображений таблицы 3 приведены в примечании⁵

Модернизация (1950-е гг.) – принципы советского неоклассицизма определялись не только обязательной модернизацией исходной архитектурной стилистики планировочного элемента, но и предусматривали иную функционально-планировочную структуру, как отдельного здания, так и фрагмента городской застройки. Именно в этот период

модернизация архитектурно-планировочной структуры переходит на другой уровень иерархии: от отдельного здания к фрагменту городской планировки.

В рамках настоящего исследования выделяются две типологические группы планировочных элементов согласно заданным историческим этапам формирования архитектурно-градостроительной среды по направлению модернизация, а именно: здания стилистики конструктивизма и пост конструктивизма, изменивших не только архитектурный облик, но и планировочную структуру за счет функциональной трансформации, а также здания стилистики советского неоклассицизма, изменившие принципы организации планировочной структуры генерального плана Регулярного города 1774 г. Целевыми показателями выявления планировочных элементов послевоенного восстановления АПС г. Воронежа в направлении модернизации являются изменение как архитектурно-стилистической составляющей (иерархический уровень: здание), так и функционально-планировочные (иерархический уровень: городской центр).

В виду того, что под влиянием социального и экономического факторов, обусловленных периодом послевоенного восстановления СССР, мероприятия по реконструкции в рамках модернизации, в отличие от рециклинга были дорогостоящие, так как предусматривали зачастую функциональное перепрофилирование здания, касались только жилых зданий, что также является уникальным специфическим аспектом функционально-пространственной организации исторического центра г. Воронежа в период послевоенного восстановления. Архитектурно-стилистический анализ зданий советского неоклассицизма приведен в таблице 4 и сводной схеме (рисунок 1).

Таблица 4 – Архитектурно-стилистический анализ жилых зданий стилистики советского неоклассицизма г. Воронежа 1950-х гг.

Архивное фото	Описание
	1 - Жилой многоквартирный дом (ул. Фр. Энгельса, 7). Модернизация конструктивизма. Архивное фото 1930-х гг. Экспликация к схеме: № 3
	2 - Жилой многоквартирный дом (Пр. Революции, 7). Модернизация постконструктивизма. Архивное фото 1973 г. Экспликация к схеме: № 10
	3 - Жилые многоквартирные дома по ул. Мира. Модернизация (советский неоклассицизм). Архивное фото 1970-х гг. Экспликация к схеме: № 13

Источники изображений таблицы 4 приведены в примечании⁵

Согласно выявленным специфическим аспектам, стилистическая идентификация не в достаточной мере определяет здания, как построенные, так и реконструируемые в период 1950-х гг. в г. Воронеже, как объекты стиля советского неоклассицизма или сталинского ампира, поэтому в настоящем исследовании используется термин «стилистика советского неоклассицизма».

Функционально-пространственный анализ исторического центра г. Воронежа в 1920-1950-е гг.

Границы исследования определены Регулярным и Древним городом, так как их планировочная структура была сформирована преимущественно дискретным образом (квартальная застройка). Значимость корректного и системного восстановления планировочной структуры подтверждает также «Схема размещения строительства города в 1945 г.»¹, которая являлась официальным документом по восстановлению г. Воронежа. Согласно архивным материалам, все кварталы исследуемой территории (общее количество: 38), подлежали обязательному государственному контролю в период послевоенного восстановления, а, следовательно, и финансированию, и включала в себя 62 здания под реконструкцию, что определяет положение из ранее проведенных исследований о том, что “контроль и регламентация градостроительной деятельности государством при отмене частной собственности на землю определяет действие принципов гармоничной организации реконструкции архитектурной среды как с позиции интеграции новых функций, так и сохранения стилистического единства и культурного контекста в историческом архитектурном облике города” [6]. В своих отчетах за 1945–1949-е гг.¹ главный архитектор г. Воронежа Н. В. Троицкий описывает, каким образом бюро УГА распоряжается денежными и иными средствами, выделенными государством на восстановление зданий.

В результате выявления архитектурно-градостроительных аспектов послевоенной реконструкции исторического центра г. Воронежа, а также проведенные историко-архивные и библиографические исследования позволили прийти к выводу о том, что направление рециклинга определялось только разрушенными зданиями и осуществлялось согласно «Схеме размещения строительства города в 1945 г.»¹, а направление модернизации по генеральному плану 1946 г. (рисунок 2), который включал также утвержденные мероприятия по схеме восстановления города 1945 г. Сводные данные по выявленным направлениям послевоенного восстановления г. Воронежа представлено на плане детальной планировки 1959 года г. (рисунок 1).

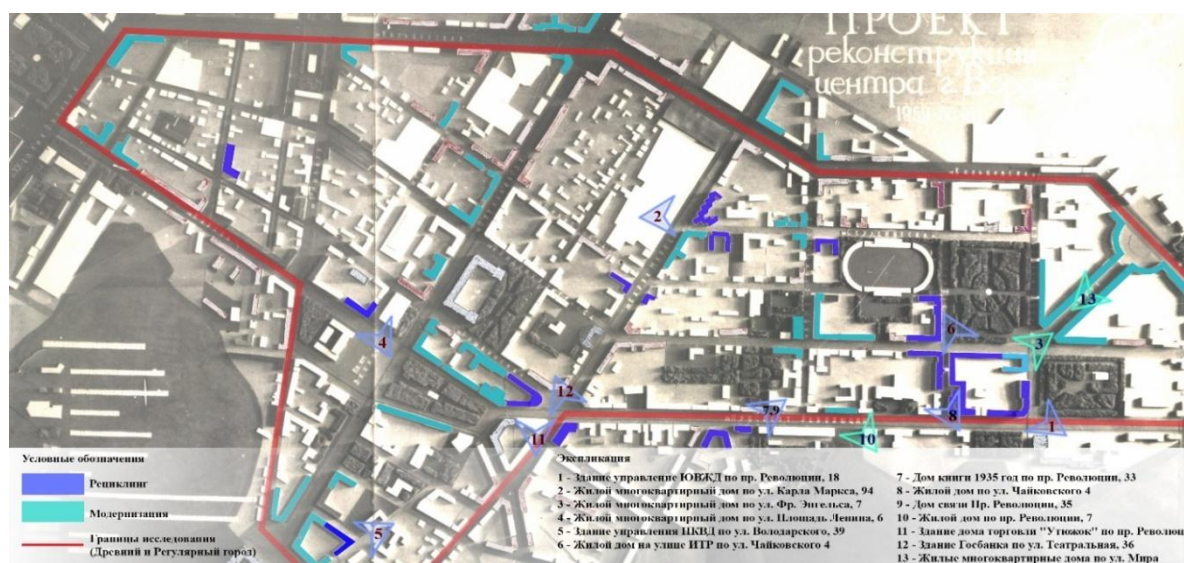


Рисунок 1 - Направления в послевоенном восстановлении исторического центра г. Воронежа

Красным цветом отмечены здания, определяющие процесс рециклинга.

Синим цветом, отмечены здания, определяющие процесс модернизации.

Информация об экспликации дана в табл. 1-4. Схема сделана авторами статьи в 2023 г., публикуется впервые.

Реконструкция архитектурно-планировочной структуры г. Воронежа в 1960-е гг.

К нейтральной застройке, существующей внутри историко-культурной городской среды (далее по тексту: объекты ИКС) согласно проекту детальной планировки (далее по тексту: ПДП) 1959 г. (рисунок 1) относится здания 1960–1980-х гг. «Нейтральная застройка» – определение, данное рассматриваемой типологической группе, было выбрано авторами настоящей статьи в ранее проведенных исследованиях, так как составленный архитектурно-стилистический анализ не выявил в зданиях периода «Хрущевской оттепели» какой-либо историко-культурной ценности. “Анализ состояния пространственно-планировочной структуры городов последних десятилетий XX века показал, что в 1980-е годы начался постепенный процесс уплотнения городской ткани и усиления каркаса, сопровождавшийся активным строительством общественной и жилой застройки. Реформирование социально-экономических основ государства и переход с социалистических на новые рыночные отношения затормозили процессы городского развития” [12].

Таким образом, можно сделать вывод о том, что советский неоклассицизм в г. Воронеже являлся крайней идеологической волной, которая внесла исторически-ценные аспекты в архитектурно-планировочную структуру как со стороны организации материальной, так и функциональной городской среды.

Исторические морфотипы квартальной застройки г. Воронежа XX в.

Планировочная структура, сложившаяся в период послевоенного восстановления 1950-х гг. включала разнотипную историческую и, на тот момент, современную застройку. В определенных территориальных границах выявлены две типологические группы зданий по планировочному целевому показателю. Помимо исторической застройки конца XVII по 1918 г., также относящейся к объектам ИКС: здания стилистики конструктивизма и пост конструктивизма 1920-1930-х гг. и здания периода послевоенного восстановления 1950-х гг. На ПДП г. Воронежа 1959 года г. (рисунок 1) можно отметить единую сложившуюся композиционную структуру архитектурно-планировочного центра г. Воронежа из объектов выявленных типологических групп. Несмотря на различную стилистическую направленность, высотные, конструктивные и иные характеристики, все объекты планировочного каркаса формировали гармоничную и положительную для восприятия человеком композиционную структуру. Более подробно рассмотрим каждую типологическую группу планировочных элементов.

Здания стилистики конструктивизма и пост конструктивизма, появившиеся в 1920-1930-х гг. (таблицы 1, 2), частично сохранившие свою стилистическую направленность (таблица 1, рисунок 5; таблица 2, рисунок 1-3) и изменившие на стилистику советского неоклассицизма (таблица 3) поддерживают принципы организации архитектурно-планировочной структуры Регулярного города (периметральный морфотип застройки), а также модернизируют блокированный морфотип застройки Древнего города в новый – комбинированный (таблица 5).

Здания стилистики советского неоклассицизма 1945-1950-е гг. определяют новые принципы организации ансамблевой застройки как на территории Регулярного, так и Древнего города (таблица 4, рисунок 6). Согласно ПДП центра г. Воронежа 1959 г., (рисунок 1) можно отметить композиционные связи в размещении планировочных элементов центра города под влиянием идеологии советского неоклассицизма, формирующих новый тип пространства – ансамблевая застройка. Так, предполагалось, что новые объекты не только будут усиливать принципы регулярности и дискретности, сложившейся планировочной структуры, но и создавать новые пространства, согласно принятым принципам классицизма: симметрия, комплексность, стилистическое единство, монументальность и др.

Данные о принципах определения направления в послевоенной реконструкции исторического центра г. Воронежа, а также исторических морфотипов квартальной застройки приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Онтологическая модель планировочных элементов реконструкции АПС г. Воронежа в 1950-х гг.

Архитектурная стилистика	Направления послевоенного восстановления		Исторические морфотипы	Примеры зданий (экспликация к рис. 1)
	Рециклинг	Модернизация		
Конструктивизм нач. 1930-х гг.	■	■	Комбинированный и периметральный	5 – рециклинг с нецелевым показателем 1-2, 4, 6, 11-12 – рециклинг с целевым показателем 3 – модернизация
Пост конструктивизм 1930-х гг.	□	■	Комбинированный и периметральный	7-9 – рециклинг 10 – модернизация
Советский неоклассицизм 1950-х гг.	—	■	Ансамблевый	13

Условные обозначения к таблице 5:

- – Здания, модернизированные по целевому показателю направления послевоенной реконструкции;
- – Здания, восстановленные в рамках одного направления послевоенной реконструкции по различным показателям;
- – Здания, восстановленные не по целевому показателю направления послевоенной реконструкции;
- – Отсутствие типологической группы по направлению послевоенной реконструкции.

В результате системного ретроспективного анализа АПС исследуемой территории в четырех временных периодах (архивные материалы 1852 г., 1900 г., 1943 г. и 1959 г.), а также натурного обследования АПС, проведенного в 2022 г., авторами выделяются три исторических морфотипа застройки, сформированные в период послевоенного восстановления исторического центра г. Воронежа: комбинированный, периметральный и ансамблевый. Данные сведены в таблицу 5 и сводную схему (рисунок 2).

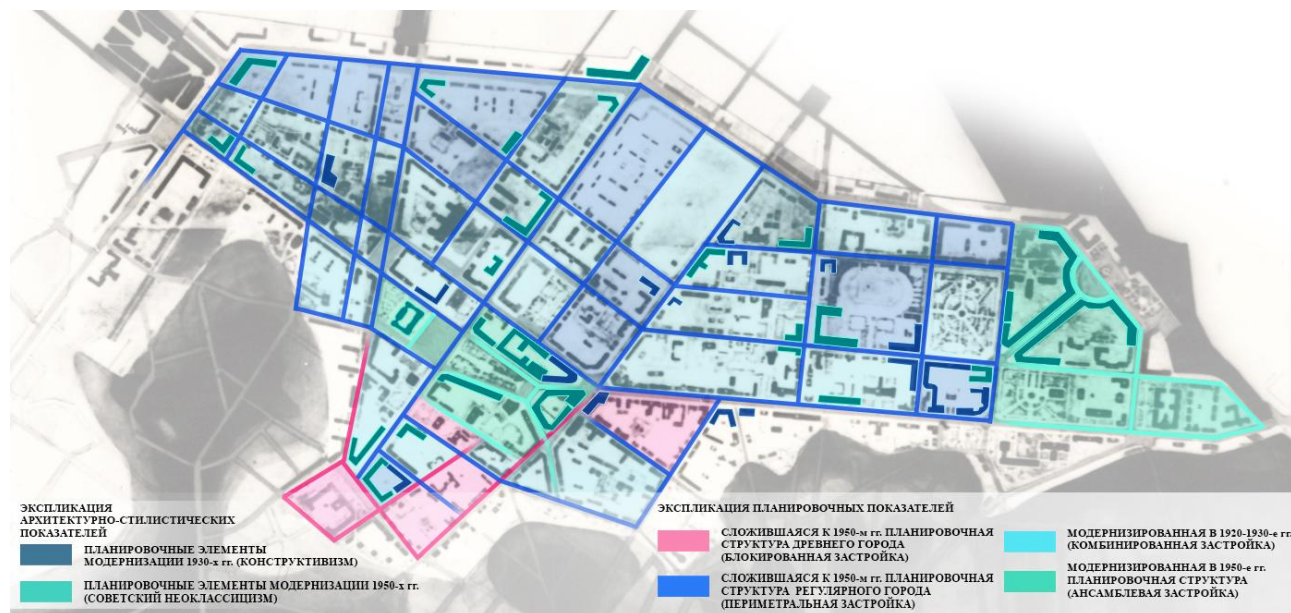


Рисунок 2 - Схема исторических морфотипов квартальной застройки г. Воронежа на 1950-е гг.

Красным цветом отмечена планировочная структура Древнего города и соответствующий ей блокированный морфотип застройки. Синим цветом отмечена планировочная структура Регулярного города и соответствующий ей периметральный морфотип застройки. Зеленым цветом отмечена планировочная структура, сложившаяся под влиянием направления модернизации в 1950-е гг., и соответствующий ей ансамблевый морфотип застройки. Схема сделана авторами статьи в 2023 г., публикуется впервые.

Выводы

В результате проведенного системного ретроспективного эксперимента архитектурно-планировочной структуры исторического центра г. Воронежа в период послевоенного восстановления (1945-1950-е гг.) была доказана важность признания аспекта историко-культурной преемственности в контексте модернизации архитектурно-градостроительной среды как значимого ресурса по регулированию современных процессов жизнедеятельности города как самодостаточной, саморазвивающейся системы, а также:

1. Проведен системный ретроспективный эксперимент трансформаций архитектурно-планировочной структуры в рассмотренный период с учетом характера влияния внешних и внутренних факторов;
2. Сформированы специфические аспекты послевоенной реконструкции архитектурно-планировочной структуры по двум направлениям: рециклинг (1945-1950-е гг.) и модернизация (1950-е гг.), основанные на фактологических нормативно-правовых материалах, а также определенным типологическим группам планировочных элементов функционально-пространственной организации городского центра в рассматриваемый период;
3. Определены конечные материально-пространственные и функциональные параметры исторических морфотипов квартальной застройки исторического центра г. Воронежа, а также специфика их модернизации в рассмотренный период.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белоусов В.Н., Шабо Ж. и др. Реконструкция центров исторических городов: Сов.-фр. науч.-техн. сотрудничество. Центр. н.-и. и проект. ин-т по градостроительству, М-во градостроительства, жилища и трансп. Франции, Техн. упр. по градостроительству. М. : Стройиздат, 1987. 223 с.
2. Вельможко И.Н. Социальные трансформации в период "хрущевской оттепели" // Вестник Удмуртского университета. Серия История и филология. 2016. Т. 26. № 4. С. 93-100.
3. Гафурова С.В. Морфотипы многоквартирной жилой застройки и их размещение в планировочной структуре крупных городов Татарстана // Архитектура и строительство России. 2022. № 2(242). С. 26-33. EDN MJFGFU.
4. Гутнов А.Э. Эволюция градостроительства. Москва : Стройиздат, 1984. 256 с.
5. Енин А.Е., Заплавная А.Э. Режимы градостроительной реконструкции квартальной жилой застройки исторического центра города Воронежа // Архитектурные исследования. 2022. № 4(32). С. 82-92. EDN BIWZMK.
6. Енин А.Е., Танкеев А.С., Заплавная А.Э. Проблемы сохранения и оптимального обновления архитектурно-планировочной структуры исторического центра г. Воронежа // Известия вузов. Строительство. 2021. № 12. С. 77-87.
7. Заплавная А.Э., Танкеев А.С. Эволюция архитектурной стилистики конструктивизма в городе Воронеже в 1920-1950-е гг. // Архитектон: известия вузов. 2020. № 4(72). http://archvuz.ru/2020_4/15/ doi:10.47055/1990-4126-2020-4(72)-15
8. Зиятдинов З.З., Михалчева С.Г., Херувимова И.А., Зиятдинов Т.З. Морфотипы жилой застройки в структуре крупного города // Архитектон: известия вузов. 2020. № 2(70). С. 10. doi:10.47055/1990-4126-2020-2(70)-10
9. Москаленко И.А. Особенности послевоенного восстановления фасадов зданий исторического центра города Ростова-на-Дону // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2020. № 8. С. 18-31. doi:10.34031/2071-7318-2020-5-8-18-31 EDN TWUSEU.
10. Пасхина М. В. Выявление, типология и оценка городских морфотипов (на примере г. Ярославля) // Ярославский педагогический вестник. 2012. Т. 3. № 4. С. 245-250. EDN PXMNIX.
11. Попов П.А. Воронеж: История города в названиях улиц. Воронеж: Кварта, 2003. 235 с.
12. Птичникова Г.А. Трансформации пространственной структуры крупнейших городов России в постсоветский период // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2020. № 1(29). С. 42-56. doi:10.21869/2311-1518-2020-29-1-42-56. – EDN IYQGNH.
13. Сосновский В.А., Русакова Н.С. Прикладные методы градостроительных исследований : учебное пособие по направлению 630100 "Архитектура". Москва : Архитектура-С, 2006 (Ульяновск : Ульяновский Дом печати). 110 с.
14. Стадников В.Э. Исторические территории. Нормативные и ненормативные подходы к обновлению (hard & soft) // Архитектон: известия вузов. 2019. № 2(66). С. 13.

15. Троицкий Н.В. Облик будущего Воронежа. Воронеж: Воронежское книжное издательство, 1953. 63 с.
16. Федченко И.Г. Современные морфотипы жилой среды, сложившиеся под влиянием динамических процессов жизнедеятельности в начале XXI века // Современная архитектура мира. 2019. № 1(12). С. 178-192. doi: 10.25995/NIITIAG.2019.12.1.026
17. Хан-Магомедов С.О. Архитектура советского авангарда. В 2-х кн. Кн. 1: Проблемы формообразования. Мастера и течения. М.: Стройиздат. 1996. 709 с.
18. Хмельницкий Д.С. Предисловие. Архитектура Сталина: Психология и стиль. Под общей ред. Е.П. Крюкова. М.: Прогресс-Традиция, 2007. 376 с.
19. Чесноков Г.А. Архитектура Воронежа: история и современность. Воронеж: Воронеж. гос. арх.-строит. академия, 1999. 394 с.
20. Biddau G.M., Marotta A., Sanna G. Abandoned landscape project design // City Territ Archit. 2020. Vol. 7. Iss. 10. Pp. 1–17. doi:10.1186/s40410-020-00118-7.
21. Kropf K. Urbanism, politics and language: the role of urban morphology. Urban Morphology. 2011. No. 15. Pp. 157–161.
22. Pittaluga P. Pioneering urban practices in transition spaces // City Territ Archit, 2020. Vol. 7. Iss. 18. Pp. 1–10. doi:10.1186/s40410-020-00127-6
23. Whitehand J.W.R. British urban morphology: the Conzenian tradition. Urban Morphology. 2001. No. 5(2). Pp. 32-35.

REFERENCES

1. Belousov V.N., Shabo J. and others Reconstruction of the centers of historical cities : Soviet-French scientific-technical cooperation. Center. n.-I. and the project. in-t on urban planning, M-in urban planning, housing and transport. France, Technical Department of Urban Planning. M.: Stroyizdat, 1987. 223 p.
2. Velmozshko I.N. Social transformations during the "Khrushchev thaw" // Bulletin of the Udmurt University. History and Philology series. 2016. Vol. 26. No. 4. Pp. 93-100.
3. Gafurova S.V. Morphotypes of multi-apartment residential buildings and their placement in the planning structure of large cities of Tatarstan // Architecture and construction of Russia. 2022. No. 2(242). Pp. 26-33. EDN MJFGFU.
4. Gutnov A.E. Evolution of urban planning. Moscow : Stroyizdat, 1984. 256 p.
5. Enin A.E., Zaplavnaya A.E. Modes of urban-planning reconstruction of the residential quarter of the historical center of the city of Voronezh // Architectural studies. 2022. No. 4(32). Pp. 82-92. EDN BIWZMK.
6. Enin A.E., Tankeev A.S., Zaplavnaya A.E. Problems of preservation and optimal renewal of the architectural and planning structure of the historical center of Voronezh // News of universities. Construction. 2021. No. 12. Pp. 7-87.
7. Zaplavnaya A.E., Tankeev A.S. Evolution of architectural stylistics of constructivism in the city of Voronezh in the 1920s-1950s // Architecton: izvestiya vuzov. 2020. No. 4(72). http://archvuz.ru/2020_4/15/ / doi:10.47055/1990-4126-2020-4(72)-15.
8. Ziyatdinov Z.Z., Mikhacheva S.G., Cheruvimova I.A., Ziyatdinov T.Z. Morphotypes of residential development in the structure of a large city // Architecton: izvestiya vuzov. 2020. № 2(70). Pp. 10. doi:10.47055/1990-4126-2020-2(70)-10
9. Moskalenko I.A. Features of the consistent restoration of facades of the common sense of the city of Rostov-on-Don // Bulletin of Belgorod State Technological University named after S.D. Shukhov. 2020. No. 8. Pp. 18-31. doi:10.34031/2071-7318-2020-5-8-18-31. – EDN TWUSEU.
10. Pashkina M.V. Identification, typology and evaluation of urban morphotypes (on the example of Yaroslavl) // Yaroslavl Pedagogical Bulletin. 2012. Vol. 3. No. 4. Pp. 245-250. EDN PXMNIX.
11. Ptichnikova G. A. Transformations of the spatial structure of Russia's largest cities in the post-Soviet period // Biosphere compatibility: man, region, technologies. 2020. No. 1(29). Pp. 42-56. doi:10.21869/2311-1518-2020-29-1-42-56. EDN IYQGH.
12. Stadnikov V.E. Historical territories. Normative and non-normative approaches to updating (hard & soft) // Architecton: izvestiya vuzov. 2019. No. 2(66). Pp. 13.
13. Sosnovsky V.A., Rusakova N.S. Applied methods of urban planning research: a textbook in the direction 630100 "architecture" - Moscow: Architecture-c, 2006 (Ulyanovsk: Ulyanovsk House of Printing). 110 p.
14. Stadnikov V.E. Historical territories. Normative and non-normative approaches to updating (hard & soft) // Architecton: izvestiya vuzov. 2019. No. 2(66). Pp. 13.
15. Troitsky N.V. The image of the future of Voronezh. Voronezh : Voronezh Book Publishing House, 1953. 63 p.
16. Fedchenko I.G. Modern morphotypes of the living environment, formed under the influence of dynamic life processes at the beginning of the XXI century // Modern architecture of the world. 2019. No. 1(12). Pp. 178-192. doi:10.25995/NIITIAG.2019.12.1.026.
17. Khan-Magomedov S.O. Architecture of the Soviet avant-garde. In 2 books. Book 1: Problems of shaping. Masters and currents. M.: Stroyizdat. 1996. 709 p.

18. Khmel'nitsky D.S. Preface. Stalin's Architecture: Psychology and style. Under the general ed. E.P. Kryukova. Moscow : Progress-Tradition, 2007. 376 p.
19. Chesnokov G.A. Architecture of Voronezh: history and modernity. Voronezh: Voronezh. state Arch.-builds. academy, 1999. 394 p.
20. Biddau G.M., Marotta A., Sanna G. Abandoned landscape project design // City Territ Archit. 2020. Vol. 7. Iss. 10. Pp. 1–17. doi:10.1186/s40410-020-00118-7
21. Kropf K. Urbanism, politics and language: the role of urban morphology. Urban Morphology. 2011. No. 15. Pp. 157–161.
22. Pittaluga P. Pioneering urban practices in transition spaces // City Territ Archit. 2020. Vol. 7. Iss. 18. Pp. 1–10. doi:10.1186/s40410-020-00127-6
23. Whitehand J.W.R. British urban morphology: the Conzenian tradition. Urban Morphology. 2001. No. 5(2). Pp. 32-35.

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

Заплавная Алеся Эдуардовна

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж, Россия, аспирант факультета архитектуры и градостроительства.
E-mail: A.zaplavnaya@yandex.ru

Information about authors:

Enin Alexander E.

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, candidate of architecture, professor, dean of the Faculty of Architecture and Urban Planning.
E-mail: a_yenin@mail.ru

Zaplavnaya Alesya E.

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation, post-graduate student of the Faculty of Architecture and Urban Planning.
E-mail: A.zaplavnaya@yandex.ru

Т.Ф. ЕЛЬЧИЩЕВА², В.Т. ЕРОФЕЕВ¹, П.В. МОНАСТЫРЕВ², Е.Н. АБРАМОВА¹,
В.В. АФОНИН¹, И.В. ЕРОФЕЕВА³, А.Ф. АТМАНЗИН¹

¹ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Огарева»,
г. Саранск, Республика Мордовия, Россия,

²ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов, Россия

³ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
г. Москва, Россия

БИОСТОЙКОСТЬ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ ИЗ СУХИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ

Аннотация. Проведено исследование воздействия модельной биологической среды продуктов метаболизма мицелиальных грибов на биостойкость цементных композитов из сухих строительных смесей промышленного производства для наружных и внутренних работ. Установлена низкая сопротивляемость образцов без дополнительной биозащиты воздействию биологической среды. Актуальна разработка цементных композитов с биоцидными добавками для обеспечения стойкости к биологически и химически агрессивной среде без снижения прочностных свойств. Определена степень обрастаемости образцов из различных видов сухих строительных смесей в модельной среде продуктов метаболизма мицелиальных грибов. Исследовано восемь композитов различного состава при воздействии 13 видов модельной среды. Установлена стойкость образцов при концентрации компонентов среды от 0 до 5% по массе. Плиточный клей «UNIS 2000», плиточный клей «Старатели», шпатлевка «Старатели», штукатурка фасадная «KNAUF» обладают грибостойкими свойствами. Шпатлевка «СТ29 Ceresit», гидроизоляция «ВодоStopGlims», штукатурка «IvsilGross» и наливной пол «Мagma» являются негрибостойкими. Выявлены наиболее неблагоприятные для образцов концентрации продуктов метаболизма мицелиальных грибов. Выявлена эффективность применения биоцидных добавок на полимерной основе серии «Текфлекс» (ООО «СофтПРОТЕКТОР», Россия) на сопротивляемость цементных композитов биоразрушению. Наибольшую эффективность показали добавки «АнтиСоль смывка», «Для металла» и «Универсальный», их применение обеспечивает грибостойкость и фунгицидность строительных материалов.

Ключевые слова: сухие строительные смеси, биостойкость, биоцидные добавки, фунгицидность, грибостойкость, прочностные свойства.

T.F. ELCHISHCHEVA², V.T. EROFEEV¹, P.V. MONASTYREV², E.N. ABRAMOVA¹,
V.V. AFONIN¹, I.V. EROFEEVA³, A.F. ATMANZIN¹

¹National Research Mordovia State University, Saransk, Russia

²Tambov State Technical University, Tambov, Russia

³Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

BIOSTABILITY OF CEMENT COMPOSITES FROM DRY BUILDING MIXTURES

Abstract. A study was made of the influence of a model biological environment of the products of the metabolism of filamentous fungi on the biostability of cement composites from industrial dry building mixes for outdoor and indoor work. The low resistance of samples without additional bioprotection to the influence of the biological environment was established. Relevant is the development of cement composites with biocidal additives to ensure resistance to biologically and chemically aggressive environments without reducing the strength properties. The degree of fouling of samples from various types of dry building mixtures in a model environment of metabolic products of filamentous fungi was determined. Eight composites of different composition were studied under the

influence of 13 types of model medium. The stability of the samples was established at a concentration of medium components from 0 to 5% by weight. Tile adhesive "UNIS 2000", tile adhesive "Prospektors", putty "Prospektors", facade plaster "KNAUF" have fungus-resistant properties. Putty "CT29 Ceresit". Waterproofing "VodoStopGlims", plaster "IvsilGross" and self-leveling floor "Magma" are non-mushroom resistant. The most unfavorable concentrations of filamentous fungi metabolism products for the samples were revealed. The effectiveness of the use of polymer-based biocidal additives of the Teflex series (OOO SoftPROTECTOR, Russia) on the resistance of cement composites to biodegradation was revealed. The additives "Anti-Salt Wash", "For Metal" and "Universal" showed the greatest efficiency, their use provides fungi resistance and fungicidal properties of building materials.

Keywords: dry building mixtures, biostability, biocidal additives, fungicide, fungal resistance, strength properties.

Введение

В соответствии с утвержденной государственной программой «Обеспечение доступным и комфортным жильем и коммунальными услугами граждан РФ на 2018–2025 гг.», в России запланировано увеличение темпов строительства жилья и объектов инфраструктуры. Для успешной реализации стратегических задач программы необходимо производство эффективных строительных материалов нового поколения, которые изготовлены в соответствии со стандартами Европейского Союза (ЕС). От свойств сухих смесей зависит эффективность современной строительной индустрии, прочность, архитектурная выразительность и эстетика городских зданий и сооружений, возможность обеспечения комфортных условий жизни людей, а также осуществление всех этапов промышленного и гражданского строительства и рациональное использование топливно-энергетических ресурсов.

Сухие строительные смеси на цементном вяжущем показывают высокую индустриальность при строительстве, ремонте, реконструкции и реставрации зданий и сооружений. Их использование, по сравнению с традиционными растворами промышленного производства, обеспечивает техническую и экономическую эффективность и повышение качества и технологичности строительства [1–6] и производительности труда. Доставка смесей на строительные объекты организуется легче, чем строительных растворов. Срок хранения смесей на строительной площадке выше, поэтому обеспечивается непрерывный цикл строительных работ за счет достаточного их запаса в местах потребления. Потребность строительной отрасли в качественных сухих смесях в настоящее время превышает их производство [7–9].

Свойства смесей зависят от состава и качества сырья и количества и вида компонентов [10–12]. В работе рассматриваются свойства сухих смесей на цементном вяжущем.

Модели и методы

Исследуемые материалы. В работе приводятся результаты исследований биостойкости материалов образцов композитов, изготовленных из цементных сухих строительных смесей различного состава и назначения российского и зарубежного производства. Было изучено 8 составов сухих смесей (№1–№8): плиточный клей «UNIS 2000» (состав №1), плиточный клей «Старатели» (состав №2), шпатлевка «CT29 Ceresit» (состав №3), шпатлевка «Старатели» (состав №4), гидроизоляция «ВодоStopGlims» (состав №5), штукатурка фасадная «KNAUF» (состав №6), штукатурка «IvsilGross» (состав №7), наливной пол «Магма» (состав №8).

Для затворения сухих смесей применялась вода, удовлетворяющая нормативным требованиям ГОСТ 23732-2011 «Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия» (Россия).

Изготовление образцов. Перед изготовлением образцов сухие строительные смеси высушивались до постоянной массы в сушильном шкафу, затем взвешивались на электронных весах с точностью до 0,01 г. Количество воды затворения назначалось по

рекомендациям производителей строительных смесей. Образцы в виде призм размером 10×10×30 мм изготавливались в металлических формах, предварительно смазанных изнутри машинным маслом. В течение 1-х суток образцы твердели в нормальных условиях. Следующие 6 часов осуществлялась их термообработка в печи при температуре 80°С. После полного остывания образцы вынимались из форм. Набор прочности происходил при нормальных условиях в течение 28 суток.

Определение биостойкости. Биостойкость цементных композитов из сухих строительных смесей исследовалась в среде, моделирующей воздействие продуктов метаболизма мицелиальных грибов и содержащей лимонную кислоту (C₆H₈O₇), щавелевую кислоту (C₂H₂O₄) и перекись водорода (H₂O₂). Концентрация каждого компонента в дистиллированной воде составляла от 0,0 до 5,0% по массе. Компоненты смешивались в различных сочетаниях, что позволило смоделировать естественный процесс биологической коррозии композиционных материалов. Образцы помещались в модельную среду на 90 суток. Стойкость материалов образцов оценивалась по относительному изменению массы (%) по формуле (1):

$$\Delta m = \frac{m - m_0}{m_0} 100, \quad (1)$$

где m_0 и m – соответственно, масса образца материала (г) до и после экспонирования в модельной среде.

Планирование эксперимента. В методе математического планирования эксперимента [24, 25] в качестве матрицы планирования применялся комплексный симметричный трехуровневый план второго порядка на кубе с количеством опытов $n = 13$ (таблица 1). Варьируемые факторы выбирались с учетом критерия оптимизации: X_1 – концентрация лимонной кислоты; X_2 – концентрация щавелевой кислоты; X_3 – концентрация перекиси водорода. Пределы варьирования устанавливались путем проведения предварительных экспериментов, что позволило провести опыты в максимальной близости к области оптимума, и составили 0,0, 2,5 и 5,0% по массе.

Таблица 1 – Рабочая матрица кодированных факторов модельной среды

Факторы	Кодированные значения факторов												
X_1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0	1	-1	0
X_2	1	0	0	-1	1	1	0	-1	1	1	0	0	-1
X_3	1	1	1	1	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1

Биоцидные добавки. Изучение действия биоцидных добавок проводилось путем исследования эффективности добавок на полимерной основе серии «Текфлекс» (производство компании ООО СофтПРОТЕКТОР, Россия). Исследовались добавки: «АнтиСоль смывка», «Защита для металла» и «Универсальный».

Обработка экспериментальных данных. Достоверность полученных результатов экспериментов обеспечивалась их статистической обработкой. Определялось среднее арифметическое значение отдельных наблюдений, среднее квадратическое отклонение и средняя квадратическая ошибка среднего арифметического значения, а также коэффициент вариации и показатель точности. Значимость статистических характеристик оценивалась по t -критерию Стьюдента. Значения, не входящие в доверительный интервал, не использовались в дальнейших расчетах. После обработки экспериментальных данных были составлены уравнения регрессии.

Изготовление и исследование биологического сопротивления цементных композитов.

Для исключения влияния вида сухой смеси на определение эффективности добавок, вводимых в цементные композиты, использовался портландцемент бездобавочный М500 производства ОАО «Мордовцемент» (г. Саранск, Россия). Биологическое сопротивление модифицированных добавками цементных композитов определялось по ГОСТ 9.049–91 «Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Материалы полимерные и их компоненты. Методы лабораторных испытаний на стойкость к воздействию плесневых грибов» (Россия) по методу 1 и методу 3.

Результаты исследования и их анализ

Теоретический анализ.

Изделия и конструкции, изготовленные из строительных смесей, часто подвергаются воздействию агрессивной среды помещений производственных зданий и агрессивных веществ, содержащихся в наружном воздухе [13–16], а также влиянию микроорганизмов – биологической среды [17, 18]. Максимальный рост и развитие колоний микроорганизмов, в частности, мицелиальных грибов, происходит при повышенной влажности и положительных температурах среды. Такая среда способствует снижению долговечности строительных материалов, изделий и конструкций. Поэтому весьма актуально повышение долговечности изделий из сухих строительных смесей при неблагоприятных условиях эксплуатации.

Биозараженные здания и сооружения имеют низкое санитарное качество внутренней среды помещений, что нарушает экологическую составляющую комфортного пребывания в них людей. Поэтому в строительной практике часто стоят задачи ремонта, реконструкции и реставрации зданий вследствие повреждений, вызванных мицелиальными грибами. Для роста и развития мицелиальных грибов на строительных конструкциях необходима повышенная влажность и положительные температуры среды. Жизнедеятельность мицелиальных грибов сопровождается процессом выделения органических кислот, неорганических веществ, воды и ферментов. Указанные продукты метаболизма вступают в химические реакции с составляющими твердого вещества цементного камня, что приводит к разрушению структуры материала. Увеличение размера колоний микроорганизмов вызывает биокоррозию строительных материалов и конструкций [19], вследствие чего разрушение строительных материалов идет более быстрыми темпами, чем заложено в расчетах [20, 21]. В таких зданиях при проведении работ наиболее эффективно использование сухих строительных смесей с биоцидными свойствами [22]. Поэтому получение экологических сухих строительных смесей, конструкции и изделия из которых показывают стойкость и повышенные физико-механические свойства [23] в агрессивных биологических средах различного состава, является главной задачей, решаемой в данной работе.

Экспериментальная часть.

Концентрация компонентов в модельном растворе продуктов жизнедеятельности мицелиальных грибов и изменение массы образцов композитов, изготовленных из сухих строительных смесей после воздействия модельной среды, приведены в таблице 2.

Результаты и их обсуждение.

Математическая модель поверхности отклика изменения массосодержания композитов описывается уравнением регрессии:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3. \quad (2)$$

Коэффициенты уравнения регрессии (2) для различных смесей модельного раствора представлены в таблице 3.

Полученные результаты в виде уравнения регрессии общего вида (2) и расчетных значений коэффициентов регрессии, приведенных в таблице 3, позволяют провести численный и аналитический анализ поведения изменения массосодержания исследованных смесей с целью определения значений факторов, при которых будет наблюдаться минимальное и максимальное изменение массосодержания заданных композитов.

Таблица 2 – Концентрация компонентов модельного раствора, изменение массы цементных композитов

№ опыта	Концентрация в модельном растворе (%)			Δm (%) композитов, изготовленных из смесей составов №1–№8							
	$C_6H_8O_7$	$C_2H_2O_4$	H_2O_2	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8
1	2,5	5	5	19,43	16,50	13,19	22,35	16,74	12,73	17,44	11,08
2	5	2,5	5	20,92	18,04	15,30	24,82	22,19	15,50	19,56	10,34
3	0	2,5	5	20,02	16,64	12,32	22,54	16,09	12,44	17,26	10,40
4	2,5	0	5	19,84	15,52	12,94	22,71	16,20	12,45	17,37	10,97
5	5	5	2,5	22,48	20,10	13,60	23,32	21,41	15,88	20,16	12,21
6	0	5	2,5	20,17	17,24	11,76	22,03	18,30	12,38	16,31	10,44
7	2,5	2,5	2,5	20,26	17,23	13,14	22,02	19,22	13,28	19,15	12,07
8	5	0	2,5	20,64	17,80	14,48	23,03	18,05	14,00	22,32	12,43
9	0	0	2,5	19,15	16,19	11,98	22,36	15,59	12,11	17,84	11,39
10	2,5	5	0	21,62	18,43	15,25	19,83	20,02	14,84	16,85	11,35
11	5	2,5	0	22,91	19,83	15,52	23,65	19,12	17,46	16,71	9,61
12	0	2,5	0	19,08	16,26	8,07	21,17	17,15	11,83	14,33	8,11
13	2,5	0	0	27,26	15,43	12,74	21,45	17,55	11,44	16,46	10,13

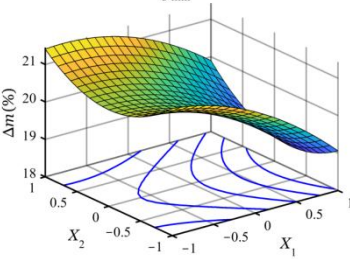
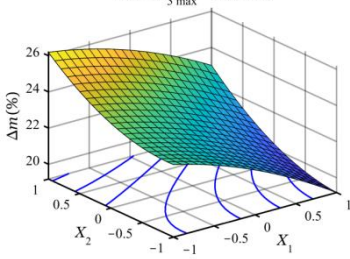
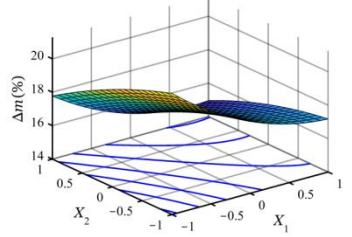
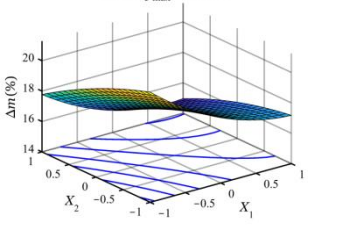
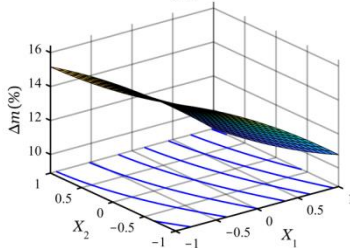
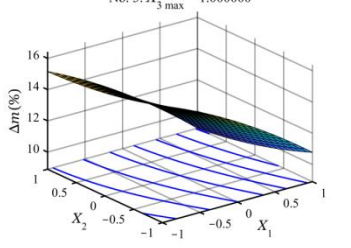
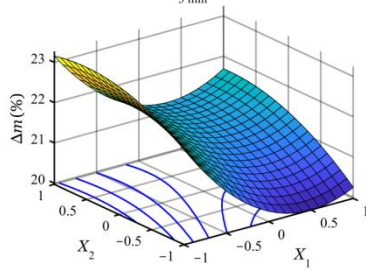
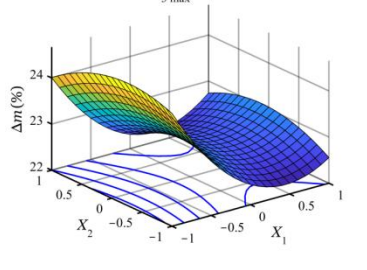
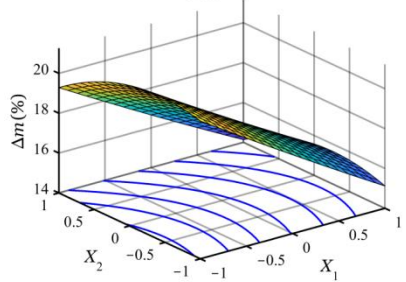
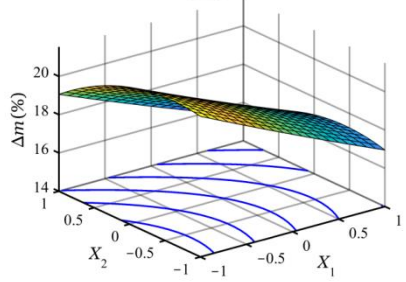
Таблица 3 – Коэффициенты уравнения регрессии поверхности отклика

№ смеси	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{11}	b_{22}	b_{33}	b_{12}	b_{13}	b_{23}
1	20,260	–1,066	0,399	1,332	–0,478	0,828	0,950	0,205	–0,732	1,308
2	17,230	–1,180	–0,916	0,406	0,912	–0,310	–0,450	0,313	–0,542	–0,505
3	13,140	–1,846	–0,207	–0,271	–0,456	0,271	0,119	–0,165	–1,117	–0,565
4	22,020	–0,840	0,252	–0,790	1,062	–0,397	–0,038	0,155	–0,050	0,315
5	19,220	–1,705	–1,135	0,328	0,064	–0,946	–0,646	0,162	1,032	–0,482
6	13,280	–1,760	–0,729	0,306	0,877	–0,565	0,150	0,402	–0,643	–0,780
7	19,150	–1,626	0,404	–0,910	–0,029	0,036	–2,156	–0,157	–0,020	–0,080
8	12,070	–0,531	–0,020	–0,449	–0,860	0,408	–1,595	0,183	–0,390	–0,277

Таблица 4 – Результаты решения задачи глобальной оптимизации

№ смеси	Решение задачи минимизации			Решение задачи максимизации			$\Delta m_{\max} - \Delta m_{\min}$
	$X_{1\min}$	$X_{2\min}$	$X_{3\min}$	$X_{1\max}$	$X_{2\max}$	$X_{3\max}$	
1	1,000000/ 4,999999	-0,252727/ 1,868182	-0,141807/ 2,145484	-0,999999/ 0,000002	1,000000/ 5,000000	1,000000/ 5,000000	7,594864
	$\Delta m_{\min} = 18,597135$ (%)			$\Delta m_{\max} = 26,191999$ (%)			
2	0,772477/ 4,431193	1,000000/ 4,999999	1,000000/ 4,999999	-1,000000/ 0,000000	-1,000000/ 0,000001	0,999999/ 4,999998	6,333209
	$\Delta m_{\min} = 14,910790$ (%)			$\Delta m_{\max} = 21,243999$ (%)			
3	0,772477/ 4,431193	1,000000/ 4,999999	1,000000/ 4,999999	-1,000000/ 0,000000	-1,000000/ 0,000001	0,999999/ 4,999998	6,333209
	$\Delta m_{\min} = 14,910790$ (%)			$\Delta m_{\max} = 21,243999$ (%)			
4	1,000000/ 5,000000	0,999999/ 4,999997	1,000000/ 4,999999	-1,000000/ 0,000000	-1,000000/ 0,000000	1,000000/ 5,000000	7,469999
	$\Delta m_{\min} = 8,903001$ (%)			$\Delta m_{\max} = 16,373000$ (%)			
5	0,491996/ 5,000000	-1,000000/ 0,000001	1,000000/ 4,999999	-1,000000/ 0,000000	-0,274559/ 1,813603	-0,999999/ 0,000000	4,682993
	$\Delta m_{\min} = 19,970933$ (%)			$\Delta m_{\max} = 24,653927$ (%)			
6	1,000000/ 5,000000	1,000000/ 5,000000	-1,000000/ 0,000000	-1,000000/ 0,000000	-0,604119/ 0,989701	-0,319516/ 1,701215	7,35724
	$\Delta m_{\min} = 14,136000$ (%)			$\Delta m_{\max} = 21,493240$ (%)			
7	1,000000/ 4,999999	1,000000/ 5,000000	1,000000/ 5,000000	-1,000000/ 0,000000	-0,999999/ 0,000001	1,000000/ 5,000000	7,823999
	$\Delta m_{\min} = 10,538000$ (%)			$\Delta m_{\max} = 18,361999$ (%)			
8	1,000000/ 5,000000	-0,999999/ 0,000001	1,000000/ 5,000000	-1,000000/ 0,000001	0,999999/ 4,999998	-0,224954/ 1,937616	7,175102
	$\Delta m_{\min} = 14,278000$ (%)			$\Delta m_{\max} = 21,453102$ (%)			
9	1,000000/ 5,000000	0,139706/ 2,849264	1,000000/ 5,000000	-0,414377/ 1,464057	-1,000000/ 0,000000	-0,003258/ 0,000000	4,409175
	$\Delta m_{\min} = 8,237038$ (%)			$\Delta m_{\max} = 12,646213$ (%)			

Таблица 5 – Значение параметра X_3 при минимуме / максимуме целевой функции

№ смеси	Минимум функции	Максимум функции
1	No. 1. $X_{3 \min} = -0.141806$ 	No. 1. $X_{3 \max} = 1.000000$ 
2	No. 2. $X_{3 \min} = 1.000000$ 	No. 2. $X_{3 \max} = 0.999999$ 
3	No. 3. $X_{3 \min} = 1.000000$ 	No. 3. $X_{3 \max} = 1.000000$ 
4	No. 4. $X_{3 \min} = 1.000000$ 	No. 4. $X_{3 \max} = -0.999999$ 
5	No. 5. $X_{3 \min} = -1.000000$ 	No. 5. $X_{3 \max} = -0.319516$ 

Продолжение таблицы 5

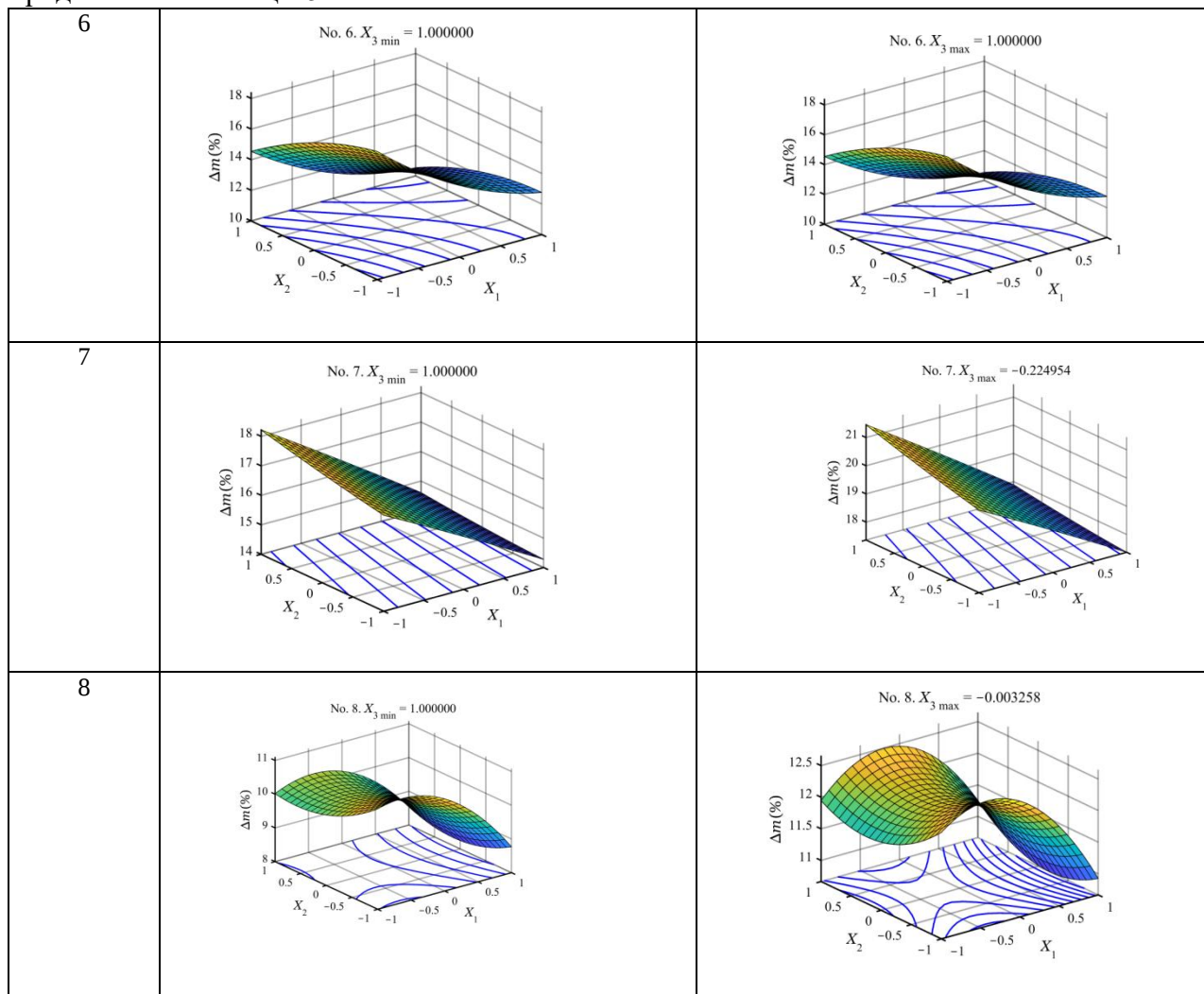


Таблица 6 – Неблагоприятные сочетания компонентов модельного раствора для цементных композитов из сухих строительных смесей

№ смеси	Наименование сухой смеси	Неблагоприятные концентрации компонентов модельного раствора (% по массе)		
		$C_6H_8O_7$	$C_2H_2O_4$	H_2O_2
1	Плиточный клей «UNIS 2000»	0	2,5	5
2	Плиточный клей «Старатели»	0	2,5	0
3	Шпатлевка «СТ29 Ceresit»	5	2,5	0
4	Шпатлевка «Старатели»	0	0	2,5
5	Гидроизоляция «ВодоStopGlims»	0	0	2,5
6	Фасадная штукатурка «KNAUF»	0	2,5	0
7	Штукатурка «IvsilGross»	5	0	2,5
8	Наливной пол «Магма»	5	2,5	0

Таблица 7 – Биостойкость цементных композитов с добавками серии «Тефлекс»

Количество добавки (часть) от массы цемента	Грибостойкость (баллы) по ГОСТ 9.049–91	
	По методу 1	По методу 3
Контрольный состав (без добавок)		
0,0	3, НГ	4, НГ
Добавка Тефлекс «АнтиСоль смывка»		
1,0	1, Г	4, НГ
3,0	1, Г	4, НГ
5,0	0, Ф	4, НГ
7,5	0, Ф	4, НГ
Добавка Тефлекс «Защита для металла»		
1,0	1, Г	4, НГ
3,0	0, Ф	3, НГ
5,0	0, Ф	2, Г
7,5	0, Ф	0, Ф
Добавка Тефлекс «Универсальный»		
1,0	0, Ф	0, Ф (R=4)
3,0	0, Ф	0, Ф (R=10)
5,0	0, Ф	0, Ф (R=13)
7,5	0, Ф	0, Ф (R=15)
Условные обозначения: Ф – фунгицидный; Г – грибостойкий; НГ – негрибостойкий; R– радиус зоны ингибирования роста грибов (мм).		

Поэтому предлагается уравнение (2) рассматривать как целевую функцию трех переменных – факторов X_1, X_2, X_3 при соблюдении ограничений (условий) вида: $-1 \leq X_i \leq +1, i = 1, 2, 3$. Учитывая то, что целевая функция (2) является непрерывно-дифференцируемой, можно выбрать метод оптимизации, который позволит решить данную задачу. В силу того, что целевую функцию трех переменных невозможно визуализировать, необходимо применение какого-либо метода глобальной оптимизации. Анализ существующих методов [26–28] позволил сделать выбор численного метода глобальной оптимизации (минимизации) GlobalSearch, который описан в [27, 28]. В связи с этим была сформирована задача оптимизации в виде:

$$f(X_1, X_2, X_3) \rightarrow \min / \max,$$

$$-1 \leq X_1 \leq +1, -1 \leq X_2 \leq +1, -1 \leq X_3 \leq +1. \quad (3)$$

В (3) целевая функция $f(X_1, X_2, X_3)$ представляет собой уравнение регрессии (2) и является изменением массосодержания Δm композитов (%). В результате решения задачи (3) определяются значения кодированных и действительных факторов, при которых целевая функция достигает минимума или максимума. Формулы для перехода от кодированных

факторов к действительным приведены в [29]. Обозначим массив значений реальных факторов через RealFactors. Тогда:

$$R_{\max} = \max(\text{RealFactors}); \quad R_{\min} = \min(\text{RealFactors});$$

$$dM = (R_{\max} - R_{\min}) / 2;$$

$$dC = (R_{\max} + R_{\min}) / 2;$$

$$Xd_{i\max} = X_{i\max} \times dM + dC;$$

$$Xd_{i\min} = X_{i\min} \times dM + dC,$$

$$i = 1, 2, 3.$$

Максимум массива $R_{\max} = 5,000000$; минимум массива $R_{\min} = 0,000000$; 1-й коэффициент $dM = 2,5$; 2-й коэффициент $dC = 2,5$.

В таблице 4 приводятся результаты решения оптимизационной задачи (3) с представлением (кодированных / действительных) значений факторов с учетом (2) и коэффициентов уравнения регрессии (целевой функции) из таблицы 3.

Анализ результатов, представленных в таблице 4, дает основания сделать вывод, что смесь №8 наименее подвержена изменению массосодержания изготовленных из нее композитов при воздействии агрессивной среды, так как разница между максимумом и минимумом изменения массосодержания составляет 4,409175%, что меньше, чем для других сухих смесей.

Результаты, приведенные в таблице 4, были получены по следующему алгоритму:

- 1) Загрузка двумерного массива Vtab коэффициентов уравнения регрессии для каждой смеси (данные таблицы 2).
- 2) Определение символьных переменных X_1, X_2, X_3 и формирование вектора столбца $X = [1, X_1, X_2, X_3, X_1^2, X_2^2, X_3^2, X_1 \times X_2, X_1 \times X_3, X_2 \times X_3]^T$.
- 3) Формирование массива функции отклика (целевой функции) $Y = \text{Vtab} \times X$.
- 4) Создание массива указателей анонимных функций, описывающих целевые функции каждой композитной смеси.
- 5) Создание объекта GlobalSearch для решения задачи глобальной оптимизации по заданным анонимным функциям и ограничениям из условий (3).
- 6) Создание структуры createOptimProblem задачи оптимизации.
- 7) Инициализация поиска оптимального решения минимума или максимума заданных целевых (анонимных) функций с помощью функции run.
- 8) Вывод результатов оптимизации.
- 9) Использование оптимальных значений фактора X_3 для последующих графических построений.

Предложенный алгоритм ориентирован на программную реализацию в среде инженерных и научных расчетов MATLAB. Алгоритм может быть адаптирован на другие виды уравнений регрессии и их коэффициенты.

В таблице 5 приведены зависимости изменения массосодержания образцов композитов от двух факторов X_1 и X_2 с фиксированным значением параметра X_3 , который устанавливался в соответствии с данными таблицы 4. На плоскостях x - y показаны изолинии – линии равного уровня, которые отображают характер изменения целевых функций при постоянном значении параметра X_3 .

Проведенные исследования позволили определить неблагоприятные сочетания компонентов агрессивной среды для цементных композитов из сухих строительных смесей. Полученные результаты сведены в таблице 6.

В результате проведенных исследований установлено, что действие продуктов метаболизма мицелиальных грибов на цементные композиты приводит к изменению их свойств. Заселение поверхностей строительных материалов и конструкций

микроорганизмами способствует не только их разрушению, но также ухудшению санитарного состояния зданий и сооружений, вызывает развитие плесени в помещениях, сопровождающееся устойчивым запахом. Продукты метаболизма грибов обладают токсичными свойствами и вызывают аллергические реакции у людей. Для улучшения санитарного состояния строительных конструкций и повышения их устойчивости к воздействию биологически активной среды следует снизить ее агрессивное воздействие. Защита строительных материалов и конструкций от влияния микроорганизмов обеспечивается введением биоцидных добавок, которые могут вводиться в композиты во время изготовления. После изготовления также возможно введение биоцидных компонентов с использованием метода пропитки.

Результаты испытаний биологического сопротивления модифицированных биоцидными добавками цементных композитов в зависимости от вида и количества добавок и свойств питательной среды, приведены в таблице 7. Испытания проводились по методу 1 и методу 3.

В результате проведенных исследований выявлено, что введение в состав цементных композитов добавок серии «Тефлекс» в концентрации 1 часть и более по массе от массы цемента при испытании по методу 1, в зависимости от концентрации добавки, придает им грибостойкость или фунгицидность. У композитов с добавкой «АнтиСоль смывка» свыше 3 частей по массе от массы цемента при выдерживании в среде, зараженной спорами плесневых грибов без дополнительных источников углеродного и минерального питания, осмотр под микроскопом показал отсутствие роста грибов. Материал имеет фунгицидные свойства, которые проявлялись в том, что вокруг зараженных спорами грибов образцов при испытании на питательной среде наблюдалась зона отсутствия роста грибов. При испытании на питательной среде по методу 3 выявлено, что композит не обладает грибостойкими свойствами в изучаемом диапазоне концентрации добавки.

Введение препарата «Защита для металла» при концентрации 1 часть по массе от массы цемента придает композиту грибостойкость без питательной среды при испытании по методу 1. При концентрации свыше 1-й части по массе от массы цемента материал приобретает фунгицидные свойства. Испытание по методу 3 показывает негрибостойкость композита при концентрации добавки от 1-й до 3-х частей по массе от массы цемента. При этом грибостойкость появляется при концентрации добавки 5 частей, а фунгицидность – 7,5 частей по массе от массы цемента.

Использование добавки «Тефлекс Универсальный» придает цементным композитам фунгицидные свойства при введении добавки в концентрации от 1-й части по массе от массы цемента. При этом возникает постоянная зона ингибирования роста грибов радиусом от 4-х до 15-и мм при концентрации добавки от 1-й до 7,5 частей по массе от массы цемента и испытании образцов на питательной среде по методу 3.

Выводы

1. Установлено изменение массы образцов цементных композитов, изготовленных из 8-и сухих строительных смесей без биоцидных добавок при воздействии на материал образцов модельной среды, представляющей собой имитацию продуктов метаболизма бактерий. Концентрация составляющих компонентов модельной среды варьировалась от 0,0 до 5,0% по массе. Сочетания компонентов модельной среды определялись с помощью метода математического планирования эксперимента путем реализации комплексного симметричного трехуровневого плана второго порядка на кубе, состоящего из 13 опытов.

2. Получены уравнения регрессии изменения массы композитов после экспозиции в модельной среде водного раствора лимонной кислоты, щавелевой кислоты и перекиси водорода. По уравнениям регрессии построены графические зависимости. Установлено наиболее неблагоприятное сочетание компонентов модельного раствора для цементных композитов из исследуемых сухих строительных смесей. На основе уравнения регрессии

решена задача глобальной оптимизации поиска сочетаний кодированных и реальных факторов, при которых целевая функция принимает минимальные и максимальные значения.

3. Установлена неодинаковая обрастаемость изготовленных из сухих смесей образцов цементных композитов в модельной среде, имитирующей воздействие продуктов метаболизма грибов. Образцы, изготовленные из плиточного клея «UNIS 2000», плиточного клея «Старатели», шпатлевки «Старатели», штукатурки фасадной «KNAUF» обладают грибостойкими свойствами. Остальные исследуемые смеси, такие, как шпатлевка «СТ29 Ceresit», гидроизоляция «ВодоStopGlims», штукатурка «IvsilGross», наливной пол «Магма» показали негрибостойкие свойства.

4. Выявлено повышение биостойкости композитов путем введения в их состав биоцидных добавок серии «Тефлекс» и установлены оптимальные концентрации добавок для формирования у композитов грибостойких и фунгицидных свойств. Установлено, что в отсутствии дополнительных источников углеродного и минерального питания для достижения эффекта грибостойкости добавкам «АнтиСольсмывка» и «Для металла» необходима концентрация от 1-й части по массе от массы цемента. Фунгицидные свойства материал приобретает при введении добавок «АнтиСольсмывка», «Для металла» и «Универсальный», соответственно, в количестве от 5-и, 3-х и 1-й части по массе от массы цемента.

5. При наличии дополнительных источников углеродного и минерального питания добавка «АнтиСольсмывка» не дает эффекта грибостойкости. Добавка «Для металла» показывает эффект грибостойкости при концентрации от 5-и частей по массе от массы цемента. Фунгицидные свойства материал приобретает при введении добавок «Для металла» в количестве от 7,5 частей и «Универсальный» – в количестве 1-й части по массе от массы цемента. Введение добавки «Универсальный» вызывает эффект образования постоянной зоны ингибирования роста грибов, имеющей радиус от 4-х до 15-и мм. Концентрация добавки при этом составляет, соответственно, от 1-й до 7,5 частей по массе от массы цемента.

Статья публикуется в рамках выполнения темы 3.1.2.5 «Разработка новых композиционных полимерных материалов, отвечающих требованиям строительной индустрии, в том числе используемых в аддитивной технологии», входящей в план фундаментальных научных исследований Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации и Российской академии архитектуры и строительных наук для НИИСФ РААСН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ботка Е.Н. Рынок сухих строительных смесей России // Цемент и его применение. 2021. № 2. С. 32-33.
2. Рынок сухих строительных смесей в России: исследование и прогноз до 2025 г. Вып.: апрель, 2021 г. [Электронный ресурс]. <https://roif-expert.ru/stroitelstvo/stroitel-nye-smesi/rynok-suhih-stroitel-nyh-smesej/rynok-suhih-stroitel-nyh-smesej-v-rossii-issledovanie-i-prognoz.html> (дата обращения: 22.12.2022).
3. Perevozchikova S.V., Belov V.V. Dry Mix Mortar for Restoration of Buildings // Smart Composite in Construction. 2021. Vol. 2. No. 1. Pp. 14-18. doi:10.52957/27821919_2021_1_14
4. Остроух А.В., Вэй П.А., Суркова Н.Е. Анализ современного состояния автоматизации процесса производства сухих строительных смесей // Механизация строительства. 2014. № 7 (841). С. 59-63.
5. Бабешко А.В., Лесовик В.С., Загороднюк Л.Х. Теплоизоляционные сухие строительные смеси на основе композиционного вяжущего // Университетская наука. 2021. № 2 (12). С. 13-15.
6. Петропавловская В.Б., Новиченкова Т.Б., Петропавловский К.С. и др. Сухие строительные смеси для отделочных изделий и производства внутренних работ // Строительство и реконструкция. 2020. № 5 (91). С. 106-115. doi:10.33979/2073-7416-2020-91-5-106-115
7. Еферица Т.В., Хитов К.В. Рынок сухих строительных смесей: специфика продвижения // Строительные материалы – Бизнес. 2005. № 8. С. 10-11.
8. Медведева И.Н., Зозуля П.В., Корнеев В.И. Технология сухих строительных смесей. М.: Лань, 2019. 372 с.

9. Barabanshchikov Yu., Gorodilova A., Popova E. Sulphate resistance of waterproofing compounds based on cement containing dry construction mixtures // Alfa Build. 2018. No. 4 (6). Pp. 65-70. doi:10.34910/ALF.6.6
10. Кузьмина В.П. Особенности применения сухих строительных смесей при проведении отделочных работ в различных климатических условиях. Часть 2 // Сухие строительные смеси. 2018. № 6. С. 30-36.
11. Abramov R., Sokolov M., Surilov M. et al. Dry Mixes for Self-Leveling Floors Based on Composite Binder // Key Engineering Materials. 2019. No. 802. Pp. 101-112. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.802.101
12. Rudenko I., Runova R., Omelchuk V. et al. Features of macromolecular compounds in dry mixes based on alkaline cement // Conference: 19. Ibausil. Internationale Baustofftagung At: Weimar, Germany. 2015. Vol. 2. Pp. 101-112. doi:10.13140/RG.2.1.4059.2089.
13. Abramova M.G., Panchenko Y.M., Vetrova E.Y. et al. Corrosiveness of the Atmosphere in Various Climatic Regions of the Russian Federation // Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces. 2021. Vol. 57. No. 7. Pp. 1272-1282. doi:10.1134/S2070205121070029.
14. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М. Обзор зарубежного опыта исследований коррозии и средств защиты от коррозии // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 2 (35). С. 76. doi:10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87
15. Каблов Е.Н., Лаптев А.Б., Прокопенко А.Н. и др. Релаксация полимерных композиционных материалов под длительным действием статической нагрузки и климата (обзор) часть 1. Связующие // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 4(65). С. 70-80. doi:10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80
16. Ветрова Е.Ю., Щекин В.К., Курс М.Г. Сравнительная оценка методов определения коррозионной агрессивности атмосферы // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 1 (54). С. 74-81. doi:10.18577/2071-9140-2019-0-1-74-81
17. Erofeev V.T., Smirnov V.F., Myshkin A.V. The study of species composition of the mycoflora, selected surface samples poliferation composites in humid maritime climate // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. No. 698 (2). Pp. 022082. doi:10.1088/1757-899X/698/2/022082
18. Dergunova A., Piksaykina A., Bogatov A. et al. The economic damage from biodeterioration in building sector// IOP Conference (Series: Materials Science and Engineering). 2019. Vol. 698 (7). Pp. 077020. doi:10.1088/1757-899X/698/7/077020
19. Erofeev V., Smirnov V., Myshkin A. The study of polyester-acrylate composite's stability in the humid maritime operating conditions // Materials Today: Proceedings. 2019. Vol. 19. Pp. 2255. doi:10.1016/j.matpr.2019.07.547
20. Ерофеев В.Т., Ельчищева Т.Ф. Исследование накопления солей в наружных ограждающих конструкциях зданий промышленных предприятий // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2020. № 2 (386). С. 193-200.
21. Ерофеев В.Т., Ельчищева Т.Ф. Изменение влажности и теплопроводности строительных материалов при наличии в их составе солей // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2020. № 4 (388). С. 18-27.
22. Чикичев А.А., Белых С.А., Кудяков А.И. Гидрофобно-фунгицидная добавка и штукатурная сухая смесь на ее основе // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. Вып. 105. С. 661-668. doi:10.22227/1997-0935.2017.6.661-668
23. Urkhanova L., Lkhasaranov S., Badmaeva E. Research of composite binders with nanomodifiers for dry mixes // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. No. 880. Pp. 012028. doi:10.1088/1757-899X/880/1/012028
24. Вентцель В.И. Теория вероятности М.: Наука, 1969. 576 с.
25. Евдокимов Ю.А., Колесников В.И., Тетерин А.И. Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа. М.: Наука, 1980. 228 с.
26. Афонин В.В., Никулин В.В. Методы моделирования и оптимизации с примерами на языке C/C++ и MATLAB. Ч. 2. Методы безусловной оптимизации. Саранск: Издатель Афанасьев В.С., 2017. 231 с.
27. Гольдштейн А.Л. Оптимизация в среде MATLAB. Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2015. 192 с.
28. Glover F. A template for scatter search and path relinking // Lecture Notes in Computer Science. 1997. Pp. 1-51. doi:10.1007/BFb0026589
29. Сидняев Н.И. Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных. М.: Юрайт, 2019. 495 с.

REFERENCES

1. Botka E.N. Rynok sukhikh stroitel'nykh smesey Rossii: rost nesmotrya ni na chto [Market of dry construction mixtures in Russia: growth in spite of everything] // *Cement and its application*. 2021. No. 2. Pp. 32-33. (rus)
2. Rynok sukhikh stroitel'nykh smesey v Rossii: issledovaniye i prognoz do 2025 g. [The market of dry building mixes in Russia: research and forecast until 2025]. Issue: April, 2021 [Online] <https://roif-expert.ru/stroitelstvo/stroitel-nye-smesi/rynok-suhikh-stroitel-nyh-smesey/rynok-suhikh-stroitel-nyh-smesey-v-rossii-issledovanie-i-prognoz.html>. (date of application: 22.12.2022) (rus)

3. Perevozchikova S.V., Belov V.V. Dry Mix Mortar for Restoration of Buildings // *Smart Composite in Construction*. 2021. Vol. 2. No. 1. Pp. 14-18. doi:10.52957/27821919_2021_1_14.
4. Ostroukh A.V., Wei P.A., Surkova N.E. Analiz sovremennogo sostoyaniya avtomatizatsii protsessa proizvodstva sukhikh stroitel'nykh smesey [Analysis of the current state of automation of the process of production of dry building mixtures]. *Mekhanizatsiya stroitel'stvo*. 2014. No. 7 (841). Pp. 59-63. (rus)
5. Babeshko A.V., Lesovik V.S., and L. Kh. Teploizolyatsionnyye sukhie stroitel'nyye smesi na osnove kompozitsionnogo vyazhushchego [Heat-insulating dry building mixtures based on composite binder] // *Universitetskaya nauka*. 2021. No. 2 (12). Pp. 13-15. (rus)
6. Petropavlovskaya V.B., Novichenkova T.B., Petropavlovskii K.S. and others. Sukhiye stroitel'nyye smesi dlya otdelochnykh izdeliy i proizvodstva vnutrennikh rabot [Dry construction mixtures for finishing products and interior works] // *Construction and Reconstruction*. 2020. No. 5 (91). Pp.106-115. doi:10.33979/2073-7416-2020-91-5-106-115 (rus)
7. Eferina T.V., Khilov K.V. Rynok sukhikh stroitel'nykh smesey: spetsifika prodvizheniya [The market of dry building mixes: the specifics of promotion] // *Building materials – Business*. 2005. No. 8. Pp. 10-11. (rus)
8. Medvedeva I.N., Zozulya P.V., Korneev V.I. [Technology of dry building mixtures]. Moscow: Lan, 2019. 372 p. (rus)
9. Barabanshchikov Yu., Gorodilova A., Popova E. Sulphate resistance of waterproofing compounds based on cement containing dry construction mixtures // *Alfa Build*. 2018. No. 4 (6). Pp. 65-70. doi:10.34910/ALF.6.6
10. Kuzmina V.P. Osobennosti primeneniya sukhikh stroitel'nykh smesey pri provedenii otdelochnykh rabot v razlichnykh klimaticheskikh usloviyakh [Features of the use of dry building mixes during finishing work in various climatic conditions]. Part 2 // *Dry building mixes*. 2018. No. 6. Pp. 30-36. (rus)
11. Abramov R., Sokolov M., Surilov M. et al. Dry Mixes for Self-Leveling Floors Based on Composite Binder // *Key Engineering Materials*. 2019. No. 802. Pp. 101-112. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.802.101
12. Rudenko I., Runova R., Omelchuk V. et al. Features of macromolecular compounds in dry mixes based on alkaline cement // Conference: 19. Ibausil. Internationale Baustofftagung At: Weimar, Germany. 2015. Vol. 2. Pp.101-112. doi:10.13140/RG.2.1.4059.2089.
13. Abramova M.G., Panchenko Y.M., Vetrova E.Y. et al. Corrosiveness of the Atmosphere in Various Climatic Regions of the Russian Federation // *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2021. Vol. 57, No. 7. Pp. 1272-1282. doi:10.1134/S2070205121070029.
14. Kablov E.N., Startsev O.V., Medvedev I.M. Obzor zarubezhnogo opyta issledovaniy korrozii i sredstv zashchity ot korrozii [Review of foreign experience in corrosion research and corrosion protection] // *Aviation materials and technologies*. 2015. No. 2 (35). Pp. 76. doi:10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87 (rus)
15. Kablov E.N., Laptev A.B., Prokopenko A.N. and others. Relaksatsiya polimernykh kompozitsionnykh materialov pod dlitel'nyy deystviyem staticheskoy nagruzki i klimata (obzor) chast' 1. Svyazuyushchiye [Relaxation of polymeric composite materials under prolonged action of static load and climate (review), part 1. Binders] // *Aviation materials and technologies*. 2021. No. 4(65). Pp. 70-80. doi:10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80 (rus)
16. Vetrova E.Yu., Shchekin V.K., Kurs M.G. Cravnitel'naya otsenka metodov opredeleniya korroziionnoy agressivnosti atmosfery [Comparative evaluation of methods for determining the corrosive aggressiveness of the atmosphere] // *Aviation materials and technologies*. 2019. No. 1 (54). Pp. 74-81. doi:10.18577/2071-9140-2019-0-1-74-81. (rus)
17. Erofeev V.T., Smirnov V.F., Myshkin A.V. The study of species composition of the mycoflora, selected surface samples poliferation composites in humid maritime climate // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. No. 698 (2). Pp. 022082. doi:10.1088/1757-899X/698/2/022082.
18. Dergunova A., Piksaykina A., Bogatov A. et al. The economic damage from biodeterioration in building sector// *IOP Conference (Series: Materials Science and Engineering)*. 2019. Vol. 698 (7). Pp. 077020. doi:10.1088/1757-899X/698/7/077020
19. Erofeev V., Smirnov V., Myshkin A. The study of polyester-acrylate composite's stability in the humid maritime operating conditions // *Materials Today: Proceedings*. 2019. Vol. 19. Pp. 2255. doi:10.1016/j.matpr.2019.07.547.
20. Erofeev V.T., Elchishcheva T.F. Issledovaniye nakopleniya soley v naruzhnykh ograzhdayushchikh konstruktsiyakh zdaniy promyshlennykh predpriyatiy [Investigation of salt accumulation in the external enclosing structures of buildings of industrial enterprises] // *Izvestiya of higher educational institutions. Technology of the textile industry*. 2020. No. 2 (386). Pp. 193-200. (rus)
21. Erofeev V.T., Elchishcheva T.F. Izmeneniye vlazhnosti i teploprovodnosti stroitel'nykh materialov pri nalichii v ikh sostave soley [Change in humidity and thermal conductivity of building materials in the presence of salts in their composition]. *Izvestiya of higher educational institutions. Technology of the textile industry*. 2020. No. 4 (388). Pp. 18-27. (rus)
22. Chikichev A.A., Belykh S.A., Kudiyakov A.I. Gidrofobno-fungitsidnaya dobavka i shtukaturnaya sukhaya smes' na yeye osnove [Hydrophobic-fungicidal additive and plaster dry mix based on it] // *Bulletin of MGSU*. 2017. Vol. 12. Issue. 105. Pp. 661-668. doi:10.22227/1997-0935.2017.6.661-668. (rus)

23. Urkhanova L., Lkhasaranov S., Badmaeva E. Research of composite binders with nanomodifiers for dry mixes // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. No. 880. Pp. 012028. doi:10.1088/1757-899X/880/1/012028
24. Wentzel V.I. Teoriya veroyatnosti [Probability Theory]. Moscow: Nauka, 1969. 576 p. (rus)
25. Evdokimov Yu.A., Kolesnikov V.I., Teterin A.I. Planirovaniye i analiz eksperimentov pri reshenii zadach treniya i iznosa [Planning and analysis of experiments in solving problems of friction and wear]. Moscow: Nauka, 1980. 228 p. (rus)
26. Afonin V.V., Nikulin V.V. Metody modelirovaniya i optimizatsii s primerami na yazyke S/S++ i MATLAB. CH. 2. Metody bezuslovnoy optimizatsii [Modeling and optimization methods with examples in C/C++ and MATLAB. Part 2. Methods of unconditional optimization]. Saransk: Publisher Afanasiev V.S., 2017. 231 p. (rus)
27. Goldstein A.L. Optimizatsiya v srede MATLAB [Optimization in the MATLAB environment]. Perm: Perm National Research Polytechnic University. 2015. 192 p. (rus)
28. Glover F. A template for scatter search and path relinking // *Lecture Notes in Computer Science*. 1997. Pp. 1-51. doi:10.1007/BFb0026589.
29. Sidnyaev N.I. Teoriya planirovaniya eksperimenta i analiz statisticheskikh dannykh. [Theory of experiment planning and analysis of statistical data]. Moscow: Yurayt, 2019. 495 p. (rus)

Информация об авторах:

Ельчищева Татьяна Федоровна

ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов, Россия,
кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Архитектура и градостроительство».
E-mail: elschevat@mail.ru

Ерофеев Владимир Трофимович

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Огарева», г. Саранск, Республика Мордовия, Россия,
академик Российской академии архитектуры и строительных наук, доктор технических наук, профессор, директор института архитектуры и строительства, директор НИИ «Материаловедение», заведующий кафедрой строительных материалов и технологий.
E-mail: yerofeevvt@mail.ru

Монастырев Павел Владиславович

ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов, Россия,
член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, доцент, директор института архитектуры, строительства и транспорта.
E-mail: monastyrev68@mail.ru

Абрамова Екатерина Николаевна

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Огарева», г. Саранск, Республика Мордовия, Россия,
кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры зданий, сооружений и автомобильных дорог.
E-mail: surekat86@yandex.ru

Афонин Виктор Васильевич

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Огарева», г. Саранск, Республика Мордовия, Россия,
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления.
E-mail: vvafonin53@yandex.ru

Ерофеева Ирина Владимировна

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия
кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Основы архитектуры и художественных коммуникаций».
E-mail: ira.erofeeva.90@mail.ru

Атманзин Алексей Федорович

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Огарева», г. Саранск, Республика Мордовия, Россия,
аспирант кафедры строительных материалов и технологий.
E-mail: Af@atassa.ru

Information about authors:

Elchishcheva Tatyana F.

Tambov State Technical University, Tambov, Russia,
candidate of technical sciences, associate professor, head of the department of Architecture and Urban Planning.
E-mail: elschevat@mail.ru

Erofeev Vladimir T.

National Research Mordovia State University, Saransk, Russia,
academician of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, doctor of technical sciences,
professor, director of the Institute of Architecture and Construction, director of the Materials Science Research Institute,
Head of the Department of Building Materials and Technologies.
E-mail: yerofeevvt@mail.ru

Monastyrev Pavel V.

Tambov State Technical University, Tambov, Russia,
corresponding member of RAASN, doctor of technical sciences, associate professor, director of the Institute of
Architecture, Construction and Transport.
E-mail: monastyrev68@mail.ru

Abramova Ekaterina N.

National Research Mordovia State University, Saransk, Russia,
candidate of technical science, Senior Lecturer of the Department of Buildings, Structures and Highways.
E-mail: surekat86@yandex.ru

Afonin Viktor V.

National Research Mordovia State University, Saransk, Russia,
candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the department of Automated Information
Processing and Control Systems.
E-mail: vvafonin53@yandex.ru

Erofeeva Irina V.

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
candidate of technical sciences, senior lecturer of the department «Fundamentals of Architecture and Artistic
Communications».
E-mail: ira.erofeeva.90@mail.ru

Atmanzin Alexey F.

National Research Mordovia State University, Saransk, Russia,
postgraduate student of the department of building materials and technologies.
E-mail: Af@atassa.ru

А.И. МАКЕЕВ¹¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж, Россия

ФОРМИРОВАНИЕ МАРШРУТА МАГИСТРАЛЬНОЙ ТРЕЩИНЫ РАЗРУШЕНИЯ В МНОГОУРОВНЕВОЙ СТРУКТУРЕ КОНГЛОМЕРАТНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОМПОЗИТОВ¹

Аннотация. В публикации конгломератные строительные композиты (бетоны) идентифицируются как гетерогенные твёрдые тела с иерархически организованной пространственно-геометрической структурой характеристической размерностью от 10^{-10} до 10^{-1} м, обладающей минимум 5-6 масштабными уровнями и тремя типами конструкции подструктур, различающихся по своему масштабу, генезису и механике проявления свойств. Первый тип характерен для макро-, мезо- и микромасштабного уровней и принимается в виде двухкомпонентной «конструкции» из пространственно непрерывной матрицы и детерминировано-стохастически распределённых в ней дискретных твёрдых и газообразных (макропоры) включений; второй тип относится к субмикро-, ультрамикро- и наномасштабным уровням и полагается в виде «микромасштабной пространственной конструкции» новообразований цементирующего вещества из консолидированных индивидуальных кристаллических разностей; третий тип, наконец, соответствует атомно-молекулярному строению новообразований цементирующего вещества. Дается характеристика выделяемых типов подструктур по масштабу слагающих их компонентов, особенностям формирования, механике проявления свойств, критериям конструирования и средствам синтеза каждой подструктуры.

Анализируются закономерности формирования маршрута трещины разрушения в подструктурах всех типов и субстанции каждого масштабного уровня. При этом развитие напряженно-деформированного состояния конгломератного композита по принципу диссипации энергии, локализации и повышения (концентрации) напряжений реализуется в направлении от макро- к атомно-молекулярному уровню структуры композита, а само же разрушение и, соответственно, формирование маршрута трещины во времени и в пространстве композита проходит в направлении от атомно-молекулярного уровня к макроуровню каскадно через все промежуточные структурные уровни. В рамках интегрированного механо-физико-химического подхода показывается место термофлуктуационной теории (физика разрушения) на этапах разрыва единичных атомно-молекулярных связей и механики трещин на этапах развития микро- и макроповреждений. Обсуждаются возможности применения теоретических закономерностей формирования маршрута трещины для постановки и решения практических задач конструирования и синтеза оптимальных структур конгломератных строительных композитов.

Ключевые слова: конгломератные строительные композиты, масштабные уровни структуры композитов, физика разрушения, механика трещин, маршрут трещины в многоуровневой структуре.

А.И. МАКЕЕВ¹¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

FORMATION OF THE ROUTE OF THE MAIN CRACK OF DESTRUCTION IN THE MULTI-LEVEL STRUCTURE OF CONGLOMERATE BUILDING COMPOSITES¹

Abstract. In the publication, conglomerate building composites (concrete) are identified as heterogeneous solids with a hierarchically organized spatial-geometric structure with a characteristic

© Макеев А.И., 2023

¹ Статья посвящена памяти академика РААСН, д.т.н., профессора Евгения Михайловича Чернышова (1936-2021)
№ 5 (109) 2023

dimension from 10-10 to 10-1 m, with a minimum of 5-6 scale levels and three types of substructure design that differ in scale, genesis and mechanics of properties manifestation. The first type is characteristic of the macro-, meso- and microscale levels and is taken in the form of a two-component "construction" of a spatially continuous matrix and discrete solid and gaseous (macropores) inclusions deterministically and stochastically distributed in it; the second type refers to the submicro-, ultra-micro- and nanoscale levels and is believed to be in the form of a "microscale spatial structure" of new formations of a cementitious substance from consolidated individual crystalline differences; the third type, finally, corresponds to the atomic-molecular structure of new formations of the cementing substance. Characteristics of the distinguished types of substructures are given according to the scale of their components, the peculiarities of formation, the mechanics of manifestation of properties, design criteria and means of synthesis of each substructure.

The patterns of formation of the fracture route in substructures of all types and substances of each scale level are analyzed. In this case, the development of the stress-strain state of the conglomerate composite according to the principle of energy dissipation, localization and increase (concentration) of stress is realized in the direction from the macro- to the atomic-molecular level of the structure of the composite, and the destruction itself and, accordingly, the formation of the crack route in time and in space of the composite passes in the direction from the atomic-molecular level to the macrolevel in a cascade through all intermediate structural levels. Within the framework of an integrated mechano-physico-chemical approach, the place of thermofluctuation theory (fracture physics) at the stages of breaking single atomic-molecular bonds and crack mechanics at the stages of development of micro- and macrodamage is shown. The possibilities of using theoretical principles of crack route formation to formulate and solve practical problems of designing and synthesizing optimal structures of conglomerate building composites are discussed.

Keywords: conglomerate building composites, scale levels of the structure of composites, fracture physics, fracture mechanics, crack path in a multilevel structure.

Введение

Понятие «трещиностойкость» является ключевым в характеристике сопротивления конструкционных материалов разрушению. Более того, это, можно сказать, интегрирующее понятие, поскольку оно отражает существо механизма проявления ими работоспособности и надежности, как это показано в работах З. Бажанта, С. Дамонда, Т. Екобори, Ю.В. Зайцева, Р. Кристенсена, Ф.Ф. Ленга, Ф. Макклиттока, В.З. Партона, П. Строевона, Г.П. Черепанова. Действительно, исчерпание потенциала сопротивления материалов и конструкций разрушению начинается с момента зарождения и образования в них трещин [1-3].

Практически все конструкционные материалы по типу своего разрушения относятся к квазихрупким, обладая большей или меньшей мерой упругости, вязкости и пластичности, то есть большей или меньшей склонностью к образованию в них трещин. Не случайно для них используют понятие «предел трещинообразования», которое связывается с реологическими характеристиками материала и параметрическими точками его деформирования в процессе сопротивления разрушению [4-7].

В теории и практике расчета строительных конструкций используется концепция первой и второй группы предельных состояний. И та и другая группа прямо соотносятся с явлениями трещинообразования в материалах при силовом нагружении конструкций. Принимаемое при этом феноменологическое рассмотрение трещиностойкости, применимое и, более того, удобное для построения моделей механики конструкционных композитов, должно на современном этапе развития их материаловедения и технологии смениться системно-структурными представлениями, отражающими связь, существо поведения композитов, параметров их реологических моделей с особенностями их состава, структуры и состояния, которые являются предметом управления в технологиях получения композитов и средством обеспечения требуемых их свойств (методология формулы «4С» [8]).

Механизм и природа, качественная и количественная реализация потенциала трещиностойкости материалов интересны и важны именно с позиций структурного подхода, обеспечивающего основы для решения задач конструирования структур высокотехнологичных строительных композитов с новыми возможностями по функционально-конструкционным свойствам.

Данная публикация, как раз, связана с рассмотрением проблемы трещиностойкости

конгломератных строительных композитов (бетонов) именно в такой постановке.

Идентификация структуры конгломератных строительных композитов.

С позиций системно-структурного подхода в строительном материаловедении «бетоны — это структурированные твёрдые тела, композиты с конгломератной структурой, наделённые признаками субстанциональности, многофазности, полиструктурности, масштабной многоуровневости, детерминированности, стохастичности и диалектичности» [9]. При всем многообразии и специфичности конгломератных строительных композитов (бетонов), в их целостной гетерогенной иерархически организованной структуре с учётом явлений её синтеза, механики проявления свойств и процессов разрушения можно и целесообразно выделять три типа подструктуры (таблица 1).

Введённые к рассмотрению типы структур с их генезисом объективно «присутствуют» в неорганических конгломератных строительных композитах на гипсовой, известковой, цементной, силикатной, керамической основе, определяя широкую номенклатуру плотных, поризованных, ячеистых бетонов.

Рассматривая в общей постановке проблему трещиностойкости конгломератных строительных композитов, принципиально важно выделить положение о том, что они с их многоуровневой по масштабу и иерархии структурой проявляют себя как «преобразователи» (своего рода, трансформаторы) энергии внешних механических и других энергетических воздействий в энергию напряжений структурных связей. Такое преобразование, трансформация состоит во взаимосвязанных явлениях диссипации энергии (ее рассеяния, распределения) по макрообъему материала в конструкции и соответствующей локализации (размещения, местоположения) напряжений с их концентрацией (средоточием) в микрообъемах структуры материала в его структурных связях.

Формирование напряженно-деформированного состояния конгломератного композита реализуется по принципу диссипации энергии, локализации и повышения (концентрации) напряжений в направлении от макро- к атомно-молекулярному уровню структуры композита [10]. Само же разрушение и, соответственно, формирование маршрута трещины во времени и в пространстве композита проходит в направлении от атомно-молекулярного уровня к макроуровню каскадно через все промежуточные структурные уровни [11]. Соответственно этому, маршрут магистральной трещины в структуре композита уместно будет анализировать в направлении от субстанции новообразований к композитной структуре бетона.

Таблица 1 - Характеристика подструктур конгломератных строительных композитов

Характеристический признак	Тип подструктуры		
	I (конгломератный композит)	II (микроконструкция)	III (сплошная среда)
«Занимаемые» уровни целостной структуры	макро-, мезо- и микромасштабные	субмикро-, ультрамикро- и наномасштабные	наномасштабный и атомно-молекулярный
Размерный диапазон структурных элементов, м	$10^{-1} - 10^{-(4\div5)}$	$10^{-(4\div5)} - 10^{-(8\div9)}$	$10^{-8} - 10^{-10}$
Описание строения	двухкомпонентная «конструкция» из пространственно непрерывной матрицы и детерминировано-стохастически распределённых в ней дискретных включений; сплошное гетерогенное тело	«микромасштабная пространственная конструкция» новообразований цементирующего вещества из консолидированных индивидуальных кристаллических разностей	твёрдофазная субстанция индивидуальных скрытокристаллических или кристаллических новообразований; сплошное монофазное тело, наделённое несовершенствами (дефектами) в форме вакансий, замещений, дислокаций
Генезис	продукт формирования «системы сложения»	продукт взаимодействия «системы сложения» и «системы роста»	продукт эволюции «системы роста»
Доля занимаемого пространства композита, %	100	15-20	6-10

Маршрут магистральной трещины в подструктуре третьего типа

В общей теории строения вещества [12] под *атомно-молекулярным уровнем* строения подразумевается дискретная система взаимодействующих взаиморазмещённых в дальнем или ближнем порядке анионов и катионов размерностью $< 10^{-9}$ м. Создаваемые на основе атомно-молекулярных взаимодействий субстанции будут иметь те или иные различающиеся силовые характеристики, предопределяемые видом анионов и катионов. Какие? Ответы на вопросы этого рода дают фундаментальные научные дисциплины, относящиеся к области химического строения вещества, кристаллохимии, теории конденсации и кристаллизации, кристаллографии. В этом смысле строительное материаловедение в своих разработках может опираться на фундаментальные положения работ Г.Б. Бокия, Н.В. Белова, Х.С. Мамедова, которые раскрывают теоретические и практические возможности управления потенциалом механических и реологических характеристик кристаллохимических фаз и, в итоге, механических свойств макрообъёмных материалов.

Обращаясь к проблемам прочности строительных композитов (бетонов), в качестве наиболее наглядного примера можно привести структуру тоберморитоподобных высокоосновных и низкоосновных гидросиликатов кальция [13, 14], демонстрирующих сопротивление разрушению в диапазоне от десятков до сотен МПа. Уместен вопрос о том, как реализуется различный уровень прочности и в чём состоит природа разрушения данных объектов атомно-молекулярного и наномасштабного уровня? Есть ли принципиальное отличие проявления их механических свойств от субстанции с другим масштабным уровнем структуры?

Для ответа на эти вопросы необходимо обратиться к положениям так называемой термофлуктуационной теории прочности твёрдых тел.

Согласно термофлуктуационной теории С.Н. Журкова, равновесное положение ионов в ненагруженном состоянии не является статичным: для него характерны флуктуации – резкие колебания, сопровождающиеся разрывом межатомной связи и переходом иона в новое положение. Приложенная механическая нагрузка приводит не только к согласованному смещению ионов, но и при растяжении упорядочивает процесс термофлуктуационного разрыва, придаёт ему направленность, снижая энергетический порог разрыва и препятствуя рекомбинации разорванной связи. Суммарный, консолидированный разрыв связей сопровождается возникновением в системе сложения близкорасположенных ионов несплошности, которая может стать зародышем трещины в структуре более крупного масштабного уровня – уровня кристаллической решётки кристалла.

На основе теоретических посылок С.Н. Журковым предложена эмпирическая зависимость для оценки потенциала работоспособности, характеризующего и раскрываемого критерием долговечности «по времени»

$$\tau = \tau_0 \exp[(U_0 - \gamma\sigma)/RT],$$

где τ_0 - период тепловых колебаний атомов ($10^{-12} \div 10^{-13}$ с); U_0 - энергия активации распада межатомных связей; γ - структурно-механическая константа, учитывающая концентрацию напряжений σ на разрываемой связи; R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура тела.

Исходные идеи С.Н. Журкова получили основательное развитие в работах В.Р. Регеля, А.И. Слущера, Э.Е. Томашевского и других [15], в результате чего сформировалась теория кинетической природы прочности твёрдых тел [16].

В последующем С.Б. Ратнер и В.П. Ярцев [17], используя заложенный в вышеприведенном соотношении принцип температурно-временной и силовой эквивалентности, связали величину прочности материала (предельного напряжения разрушения) с его атомно-молекулярными характеристиками специальным выражением

$$\sigma = \frac{1}{\gamma} \left[U_0 - \frac{2,3RT}{1-T/T_m} \ln \frac{\tau}{\tau_0} \right],$$

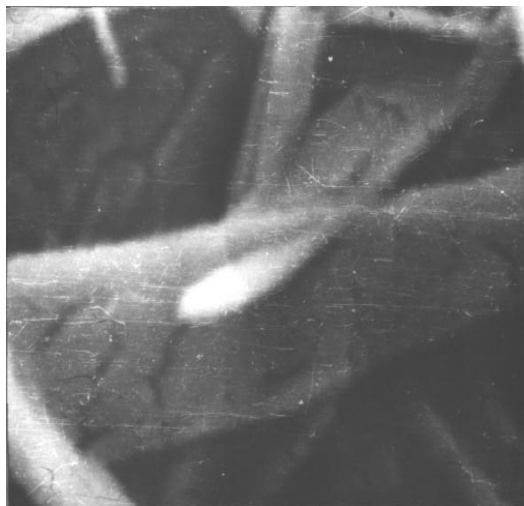
где T_m - предельная температура существования твердого тела, при которой все связи разрываются за одно колебание.

Этот шаг позволил «перевести» физические подходы на практический инженерно-технологический язык, когда учитываемые и рассматриваемые константы стало возможным принимать в качестве объекта конструирования и синтеза физической структуры материала на атомно-молекулярном его уровне. Особенно важно, что это позволило ставить вопрос об интеграции положений термофлуктуационной теории, отражающей физику разрушения, с подходами и положениями механики разрушения – механики трещин [9].

При переходе на **наномасштабный уровень** (уровень индивидуального кристалла) дискретная структура кристаллической решётки сменяется структурой сплошного монокристаллического тела - твёрдофазной субстанцией, обладающей признаками монофазности (при размерном масштабе структурного уровня $< 10^{-8}$ м).

Величина сопротивления трещинообразованию и прочность твёрдофазной субстанции кристалла предопределяется в первую очередь энергией решетки кристаллохимической разности, а также мерой её насыщения неоднородностями и дефектами: искажениями в виде вакансий, замещений, краевых и винтовых дислокаций; поверхностными трещинами (рисунок 1).

При эксплуатации композита величина силового воздействия на структуру третьего типа на несколько порядков может превосходить величину расчётного макроскопического напряжения в конструкции из композита. Диссипация, рассеяние поглощаемой композитом энергии силового нагружения по структурным связям монокристаллической субстанции (твёрдой фазе) сопровождается локализацией повышенных напряжений на контурах и вершинах её неоднородностей и дефектов с их (напряжений) дальнейшей концентрацией, кратность которой особенно велика в вершинах и по фронту зародышевых трещин. Именно в этих зонах действующие механические напряжения интенсифицируют процессы термофлуктуационного разрыва межатомных связей, придают им направленность, препятствуя рекомбинации, что сопровождается «страгиванием» зародышевой трещины и её развитием в форме последовательного отрыва соседних атомных плоскостей друг от друга в результате консолидированного разрыва связей по фронту трещины.



*Рисунок 1 - Твёрдофазная субстанция цементирующего вещества с контактами примыкания, срастания, прорастания
(увеличение до $\times 1,5 \cdot 10^5$; видны поверхностные дефекты в теле монокристаллов тоберморита)*

При отсутствии зародышевых трещин этому предшествует их образование в результате перемещения и слияния дислокаций.

Образовавшиеся берега зародышевой трещины выступают в качестве носителей поверхностной энергии, накопление которой сверх критических величин сопровождается появлением хрупкой (по Гриффитсу) микротрещины, движение которой подчиняется законам механики трещин.

Исходя из условий хрупкого разрушения по Гриффитсу, критическая величина напряжений σ_c при заданной полудлине трещины l равна

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi l}},$$

а критическая длина трещины l_c при заданном напряжении σ

$$l_c = \frac{2E\gamma}{\pi\sigma^2},$$

где E – модуль упругости субстанции; γ – удельная поверхностная энергия субстанции.

Трещина распространяется в пределах характеристического размера атомно-молекулярного уровня, каковым является наименьший габаритный размер сечения индивидуального кристалла. Маршрут трещины соотносится с ориентацией межатомных плоскостей, межзеренными границами, границами блоков. При этом искажения кристаллической решётки могут выполнять двоякую роль: облегчать трещине продвижение за счёт разрыхления структуры, и, наоборот, задерживать трещину, становясь своего рода стопором. Эта роль предопределяется углом «встречи» трещины с дефектом.

Наиболее нагруженными оказываются участки, объёмы матричной субстанции, расположенные на границе ее раздела (контактных зонах) с включениями (концентраторами напряжений на «своих» структурных уровнях). Именно эти участки оказываются наиболее вероятными очагами трещинообразования.

Маршрут магистральной трещины в подструктуре второго типа

На *ультрамикромасштабном уровне* структуры (размерный диапазон $10^{-8} \dots 10^{-6}$ м) из однофазного состояния система переходит в многофазное (ТФ+ГФ+ЖФ). Индивидуальные кристаллы образуют аморфизированные области, кристаллические сростки, их ансамбли и кластеры, которые представляют собой пространственную конструкцию из индивидуальных морфологических разностей (скрытокристаллических, склонных к псевдопластическому, волокнисто-игольчатым, склонных к псевдовязкому, пластинчато-призматических, склонных к упругому деформированию), объединенных в единое целое контактами примыкания, срастания, прорастания. Кристаллические сростки, ансамбли, кластеры имеют развитое поровое пространство с порами разной формы и размера (рисунок 2, таблица 2).

А)

В)

С)

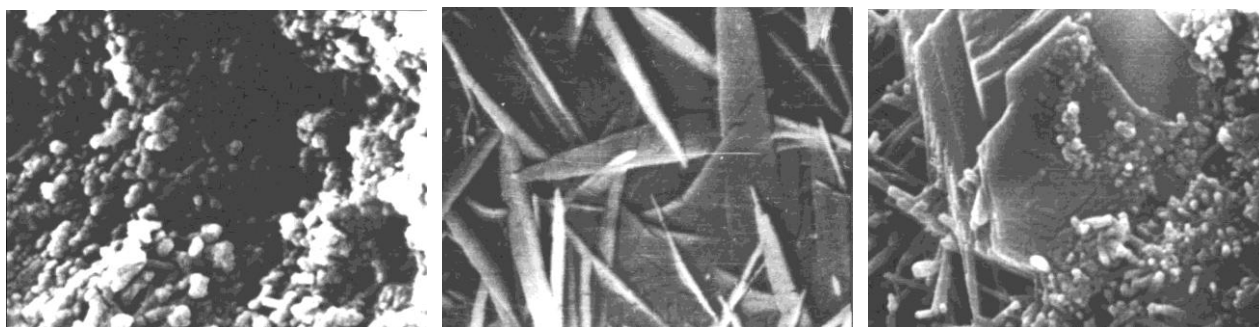


Рисунок 2 - Морфологические разности кристаллического сростка, $\times(1,2 \div 1,5) \cdot 10^5$:

А – скрытокристаллическая; В – волокнисто-игольчатая; С – пластинчато-призматическая

Таблица 2 - Характеристика морфологических разностей кристаллического сростка ультрамикромасштабного уровня структуры композита

Показатели для морфологической разности	А	В	С
Размеры в поперечине, нм	100...130	100...500	800...1300
Тип контакта	примыкания, срастания	примыкания, срастания, прорастания	примыкания, срастания, прорастания
Число контактов в единице объема, см ⁻³	$\approx 10^7$	$\approx 10^5$	$\approx 10^4$
Удельная площадь поверхности, м ² /г	500	100...200	30...50
Эквивалентный радиус пор, нм	5...7	20...40	40...80

Несмотря на ярко выраженную стохастичность таких образований, они могут быть уподоблены строительным макромасштабным конструкциям (стержневым, стоечно-балочным, оболочечным и т.п.). Есть основания полагать, что между их свойствами существует сходство [18]. Такое сходство предполагает возможность использования аналитического аппарата теории строительной механики и расчёта строительных конструкций [19, 20] для рассмотрения задач количественной оценки напряжённо-деформированного состояния и потенциала сопротивления разрушению микроконструкций второго типа подструктуры.

На ультрамикромасштабном уровне маршрут трещины будет пролегать по зонам контактирования индивидуальных кристаллов в сростке, так как, во-первых, они являются местом локализации и концентрации напряжений, а во-вторых, характеризуются повышенной дефектностью как следствия: разориентации кристаллической решетки в контактной зоне родственных по составу кристаллов; несоответствия параметров решеток разных по составу кристаллов, контактирующих в сростке; физических нарушений сплошности.

Соответственно, сопротивление разрушению данного масштабного уровня в композите и композита в целом будет предопределяться количеством контактов и их «качеством».

Следует и можно считать, что представленное рассмотрение имеет отношение также к формированию и развитию повреждений на *субмикромасштабном уровне* ($10^{-6}...10^{-4}$ м) - уровне цементирующего вещества в структуре строительного композита, поскольку данный уровень также является многофазным (ТФ+ГФ+ЖФ). В нём в качестве элементов порового пространства как включений дополнительно идентифицируются капиллярные поры, внутриансамблевые и междусростковые поры, контракционные поры.

Маршрут магистральной трещины в подструктуре первого типа

Субмикромасштабный структурный уровень цементирующего вещества в сочетании с остаточными зёрнами цемента, а также специально вводимыми зёрнами микронаполнителя образуют структуру *микромасштабного уровня* в размерном диапазоне $10^{-4}...10^{-3}$ м (цементный камень, или так называемый микробетон Юнга). Введением в цементный камень (матрицу) зёрен мелкого заполнителя (включения) формируют *мезомасштабный уровень* структуры, который является конгломератным композитом типа «твёрдофазная матрица – твёрдофазные зернистые включения» ($10^{-2}...10^{-1}$ м). Введением в цементно-песчаный камень (матрицу) зёрен крупного заполнителя (включений) формируется *макроструктура* бетона ($10^{-1}...10^0$ м), также представляющая собой конгломератный композит типа «твёрдофазная матрица – твёрдофазные зернистые включения» (рисунок 3).

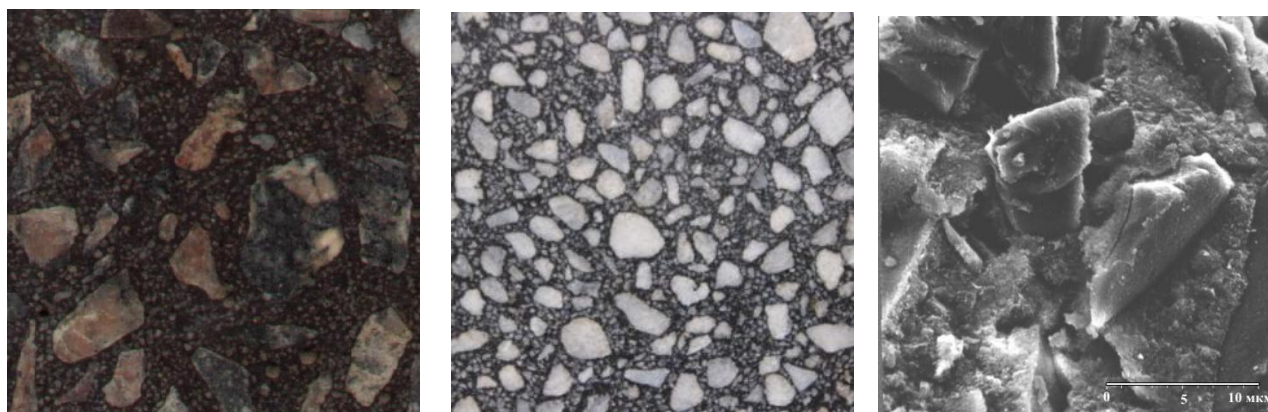


Рисунок 3 - Примеры макро-, мезо- и микромасштабного уровня структуры первого типа в конгломератном строительном композите
(макро- и мезоуровни даны без увеличения, микроуровень - с увеличением $\times 3000$)

Параметры микро-, мезо- и макромасштабных уровней структуры представлены в таблице 3, характеристика субстанции уровней – в таблице 4.

Таблица 3 - Идентификационные признаки микро-, мезо- и макромасштабных уровней структуры конгломератных строительных композитов

Параметр структуры	Значение параметра (оценочно), на уровне		
	микро	мезо	макро
Характеристический размер, м	$10^{-5} \dots 10^{-4}$	$10^{-3} \dots 10^{-2}$	$\geq 3 \cdot 10^{-2}$
Размер включений, м	$(1 \div 20) \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-4} \dots 5 \cdot 10^{-3}$	$(5 \div 40) \cdot 10^{-3}$
Удельная площадь поверхности включений, $\text{м}^2/\text{кг}$	до 300	до 24	до 0,5
Удельная поверхностная энергии включений, $\text{Дж}/\text{кг}$	до 400	до 30	до 0,6
Число частиц в единице объема, шт./ м^3	до $1 \cdot 10^{12}$	до $5 \cdot 10^6$	до $1 \cdot 10^4$
Крупность дефектов, м	$(4 \div 40) \cdot 10^{-5}$	$(4 \div 9) \cdot 10^{-4}$	$(3 \div 5) \cdot 10^{-3}$

Привязка маршрута трещины на рассмотренных уровнях исходит из того, что они являются пространственно-геометрическими аналогами и отвечают строению конгломератных композитов, состоящих из матрицы, включения и образуемого ими контакта. В связи с этим, качественная картина диссипации, локализации и концентрации напряжений, трещинообразования будет отвечать общим для них и единым закономерностям: формирование полей напряжений и маршрутов трещин на макро-, мезо- и микроуровнях будет геометрически подобным. Например, в крупнозернистой системе бетона (макроуровень) процесс разрушения будет включать псевдопластическое предразрушения и разрушение его матрицы, представленной мелкозернистой системой (мезоуровень). Продвижение фронта трещины в бетоне будет проходить через матричную субстанцию (в данном примере через мелкозернистую систему), через контактную зону матрицы и крупного заполнителя, не исключая вариант пересечения трещиной и частиц крупного заполнителя при определенном энергетическом балансе напряжений в структуре.

Таблица 4 - Характеристика субстанции микро-, мезо- и макромасштабных уровней структуры конгломератных строительных композитов

Показатель свойства	Значения показателя на уровне		
	микро	мезо	макро
Модуль упругости, $\text{МПа} \times 10^{-3}$	До 60	48-52	30 - 40
Коэффициент Пуассона	0,22-0,29	0,14-0,15	0,18 – 0,21
Предельная растяжимость, мм/м	До 10	0,7-0,8	1,1 – 1,3
Предел прочности при сжатии, МПа	200-600	120-130	30 - 60
Вязкость разрушения, $\text{МН}/\text{м}^{3/2}$	Более 2,5	0,7-0,8	0,85 – 1,1
Удельная энергия разрушения, $\text{Дж}/\text{м}^2$	Более 9000	280	75 - 105

На рисунке 4 а представлена фрактограмма, типичная для варианта маршрута трещины, в котором поверхность разрушения располагается в матрице и на границах контакта крупного заполнителя с матрицей (бетон рядового качества). На рисунке 4 б дается фрактограмма, когда поверхность разрушения в маршруте трещины пересекает частицы крупного заполнителя (бетона класса НРС).



Рисунок 4 - Характерные фрактограммы тяжелого бетона:

а) трещина обходит зерна крупного заполнителя; б) трещина пересекает зерна крупного заполнителя [21]

Картина процесса разрушения, маршрут трещины и в мелкозернистой системе, и в микрозернистой в качественной интерпретации будет аналогичной маршруту трещины на макроуровне. В количественной интерпретации параметров процесса разрушения будет иметь место отличие по энергетическим характеристикам трещинообразования (см. таблицу 4).

Для всех уровней первого типа подструктуры рассмотрение задач формирования маршрута трещины лежит в контексте моделей механики деформируемого твёрдого тела, механики разрушения бетона, отражающих влияние вида, размера и формы, состава включений в матрицу, их пространственной ориентации и равномерности размещения в объёме композита [22-26].

О критериях конструирования и синтеза подструктур конгломератных строительных композитов. Согласованное применение положений физики разрушения и механики разрушения структуры композитов позволяет охарактеризовать процесс деградации структуры в диапазоне от начальных актов разрыва единичных атомно-молекулярных связей до макроскопического повреждения тела конструкции. С учетом «включенных» в целостную структуру конгломератного полиструктурного композита подструктур, при разрушении трещина должна «пройти» последовательно монофазное твердое тело, затем - пространственную конструкцию из отдельных строительных элементов и их сочленений, и после этого – условно сплошное гетерогенное тело (среду). На последнем этапе трещина может проходить только по матрице, по матрице и контактной зоне, по матрице и включениям.

В теории конструирования и синтеза структур целевой установкой и критерием их оптимизации принимается эффективность использования потенциала структурных связей композита в сопротивлении воздействию факторов эксплуатационной среды, в которой работают строительные конструкции. Это означает, что полиструктура композита должна обеспечивать максимальную энергоёмкость процесса прохождения трещины по своему маршруту. Оптимизация структуры осуществляется через регулирование ее параметров в задаваемых условиях нагружения. Результатом оптимизации являются «конструкторские»

решения по повышению однородности поля напряжений и снижению величины концентрации напряжений, сокращению мест зарождения повреждений, позитивному изменению траектории движения, длины фронта магистральной трещины, и, соответственно, затратам энергии разрушения [9].

Для решения обозначенных задач конструирование подструктур первого типа должно быть связано с оптимизацией критерия объёмного соотношения компонентов (матрицы и включений), которое определяет величины межзернового зазора и, соответственно, характеристики цементации композитной структуры, которая может отвечать контактовому, плёночному, поровому, базальному видам. Предметом и целью конструирования подструктуры первого типа является при этом обоснование гранулометрии зернистых включений, определяющих плотность упаковки, координационное число упаковки, удельное число контактов в единичном геометрическом объёме композитной макро-, мезо- и микроструктуры и сформированной в ней системы сложения крупно-, мелко- и микрозернистых включений. Неотъемлемым вопросом конструирования композитной структуры этих масштабных уровней выступают параметры порового пространства.

Масштабная полиструктурность конгломератного строительного композита выражается в том, что относительно более крупный масштаб содержит в качестве матричного материала следующую по масштабу структуру. Поэтому в оптимизационных задачах конструирования композита возникает вопрос обеспечения квазиоднородности полиструктуры на основе геометрической соразмерности, конгруэнтности структурных элементов.

Критериями конструирования и синтеза второго и третьего типов структуры выступают характеристики твёрдой фазы, определяющие количественные и качественные показатели системы физико-химических структурных связей. Особо отметим, что направленное конструирование подструктур третьего типа по комплексу задаваемых свойств в целостной полиструктуре строительного композита стало возможным с появлением и привлечением методов компьютерного моделирования [27]. К сожалению, этого нельзя сказать о подструктурах второго типа, которые в настоящее время не поддаются детерминации и моделированию.

Заключение

Представленные результаты могут стать опорой для разработки принципов получения структурированной системы конгломератного строительного композита, обеспечивающих возможности управления формированием его напряжённо-деформированного состояния в строительной конструкции и достижения требуемой прочности и трещиностойкости при минимизации производственных затрат.

Благодарности

Статья посвящена памяти моего Учителя - академика РААСН, д.т.н., профессора Евгения Михайловича Чернышова (1936-2021), под руководством которого и были разработаны ее основные положения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беликов В.Т. Условия реализации возможных режимов развития процесса разрушения твердого тела // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2020. № 2. С. 28-39. doi:10.31857/S0572329920010055
2. Dong W., Wu Z., Zhou X. On fracture process zone and crack extension resistance of concrete based on initial fracture toughness // Construction and Building Materials. 2013. Vol. 49. Pp. 352-363. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.08.041
3. Дамаскинская Е.Е., Фролов Д.И., Пантелеев И.А., Гафурова Д.Р. Идентификация критического состояния деформированных горных пород // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2018. № 1(34). С. 116-123. doi:10.5281/zenodo.1196713

4. Колчунов В.И., Кузнецова К.Ю., Федоров С.С. Модель критерия трещиностойкости и прочности плоскотянутых конструкций из высокопрочного фибробетона и фиброжелезобетона // Строительство и реконструкция. 2021. № 3(95). С. 15-26. doi:10.33979/2073-7416-2021-95-3-15-26
5. Леденев В.В., Однолько В.Г., Нгуен З.Х. Теоретические основы механики деформирования и разрушения. Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2013. 312 с.
6. Miura T., Sato K., Nakamura H. The role of microcracking on the compressive strength and stiffness of cracked concrete with different crack widths and angles evaluated by DIC // Cement and Concrete Composites. 2020. Vol. 114. Pp. 103768. doi:10.1016/j.cemconcomp.2020.103768.
7. Трещев А.А., Захарова И.А., Судакова И.А. О вариантах выбора диаграмм деформирования композитных материалов и не только // Эксперт: теория и практика. 2022. № 2(17). С. 81-90. doi:10.51608/26867818_2022_2_81
8. Чернышов Е.М. Макеев А.И. Материаловедение и технология строительных композитов как система научного знания и предмет развития исследований. Часть 3. Системная идентификация "конструкции структуры" конгломератных строительных композитов (в качественной постановке проблемы) // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2021. № 3(747). С. 5-26.
9. Чернышов Е.М., Макеев А.И., Коротких Д.Н. Базовые положения механики проявления конструктивных свойств конгломератных строительных композитов. Часть 1. Обзор результатов теоретических исследований проблемы конструирования и синтеза структур современных высокотехнологичных бетонов // Известия вузов. Строительство. 2020. № 8. С. 43-51
10. Соколова Ю.А., Кондращенко В.И., Кесарийский А.Г. и др. Расчетно-экспериментальные исследования внутренних напряжений в строительных материалах // Эксперт: теория и практика. 2020. № 4(7). С. 60-65. doi:10.24411/2686-7818-2020-10037.
11. Селяев В.П., Селяев П.В., Лазарев А.Л. и др. Фрактальная квантово-механическая модель деформирования и разрушения бетона // Региональная архитектура и строительство. 2022. № 4(53). С. 31-40. doi:10.54734/20722958_2022_4_31.
12. Карапетянц М.Х. Строение вещества. М.: Либроком, 2014. 312 с.
13. Илюхин В.В., Кузнецов В.А., Лобачёв А.Н., Бакшутев В.С. Гидросиликаты кальция. Синтез монокристаллов и кристаллохимия. М.: Наука. 1979. 184 с.
14. Kulik D. A., Miron G. D., Lothenbach B. A structurally-consistent CASH+ sublattice solid solution model for fully hydrated C-S-H phases: Thermodynamic basis, methods, and Ca-Si-H₂O core sub-model // Cement and Concrete Research. 2022. Vol. 151. Pp. 106585. doi:10.1016/j.cemconres.2021.106585.
15. Shkolnik I.E. Effect of nonlinear response of concrete on its elastic modulus and strength // Cement and Concrete Composites. 2005. V. 27. I. 7-8. Pp. 747-757.
16. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. М.: Наука, 1974. 535 с.
17. Ярцев В.П., Киселева О.А. Прогнозирование поведения строительных материалов при неблагоприятных условиях эксплуатации. Тамбов: Изд-во Тамбовского государственного технического университета, 2009. 124 с.
18. Чернышов Е.М., Макеев А.И. Типы подструктур в целостной полиструктуре бетона и закономерности формирования параметров поля напряжений в композите (к развитию теории конструирования и синтеза структур конгломератных строительных композитов) // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2020 году : Сборник научных трудов РААСН: в 2 томах / Российская академия архитектуры и строительных наук (РААСН). Том 2. М: Изд-во АСВ, 2021. С. 304-314.
19. Вычислительные методы в механике разрушения / Под. ред. С. Алгури. М.: Мир, 1990. 392 с.
20. Актуальные проблемы численного моделирования зданий, сооружений и комплексов. Том 2. К 25-летию Научно-исследовательского центра СтаДиО / Под общ. ред. А.М. Белостоцкого и П.А. Акимова. М.: Изд-во АСВ, 2016. 596 с.
21. Коротких Д.Н. Трещиностойкость современных цементных бетонов (проблемы материаловедения и технологии). Воронеж: Воронежский ГАСУ, 2014. 141 с.
22. Карпенко Н.И. Общие модели механики бетона. М.: Стройиздат, 1996. 416 с.
23. Селяев В.П., Селяев П.В. Физико- химические основы механики разрушения цементных композитов. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2018. 220 с.
24. Максимова И.Н., Макридин Н.И., Ерофеев В.Т., Скачков Ю.П. Структура и прочность конструктивных цементных композитов. Саранск, 2015. 360 с.
25. Tran N.T., Park J.K., Kim D.J. [et al.] Fracture energy of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete at high strain rates // Cement and Concrete Research. 2016. Vol. 79. Pp. 169-184. doi:10.1016/j.cemconres.2015.09.011
26. Чернышов Е.М., Коротких Д.Н., Макеев А.И. Базовые положения механики проявления конструктивных свойств конгломератных строительных композитов. Часть 2. Обзор результатов прикладных

исследований по проблеме конструирования и синтеза структур современных высокотехнологичных бетонов // Известия вузов. Строительство, 2020. № 9. С. 48-57

27. Valavi M., Casar Z., Bowen P. [et al.] Molecular dynamic simulations of cementitious systems using a newly developed force field suite ERICA FF // Cement and Concrete Research, 2022. Vol. 154. Pp. 106712. doi:10.1016/j.cemconres.2022.106712.

REFERENCES

1. Belikov V.T. Usloviya realizatsii vozmozhnykh rezhimov razvitiya protsessa razrusheniya tverdogo tela [Conditions for the implementation of possible modes of development of the process of destruction of a solid body]. Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Mekhanika tverdogo tela. 2020. No. 2. Pp. 28-39. doi:10.31857/S0572329920010055
2. Dong W., Wu Z., Zhou X. On fracture process zone and crack extension resistance of concrete based on initial fracture toughness // Construction and Building Materials. 2013. Vol. 49. Pp. 352-363. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.08.041
3. Damaskinskaya E.E., Frolov D.I., Panteleev I.A., Gafurova D.R. Identifikatsiya kriticheskogo sostoyaniya deformirovannykh gornykh porod [Identification of the critical state of deformed rocks]. Bulletin of the Engineering School of the Far Eastern Federal University. 2018. No. 1(34). Pp. 116-123. doi:10.5281/zenodo.1196713
4. Kolchunov V.I., Kuznetsova K.Yu., Fedorov S.S. Model' kriteriya treshchinostoykosti i prochnosti plosknapryazhennykh konstruktivnykh iz vysokoprochnogo fibrobetona i fibrozhelezobetona [Model of crack resistance and strength criterion for plane stressed structures made of high-strength fiber-reinforced concrete and fiber-reinforced concrete]. Stroitel'stvo i rekonstruktsiya. 2021. No. 3(95). Pp. 15-26. doi:10.33979/2073-7416-2021-95-3-15-26
5. Ledenev V.V., Odnolko V.G., Nguyen Z.Kh. Teoreticheskiye osnovy mekhaniki deformirovaniya i razrusheniya [Theoretical Foundations of Deformation and Fracture Mechanics]. Tambov: Publishing House of FGBOU VPO "TSTU", 2013. 312 p.
6. Miura T., Sato K., Nakamura H. The role of microcracking on the compressive strength and stiffness of cracked concrete with different crack widths and angles evaluated by DIC. // Cement and Concrete Composites, 2020. Vol. 114. Pp. 103768. doi:10.1016/j.cemconcomp.2020.103768
7. Treschev A.A., Zakharova I.A., Sudakova I.A. O variantakh vybora diagramm deformirovaniya kompozitnykh materialov i ne tol'ko [On options for choosing deformation diagrams for composite materials and not only]. Ekspert: teoriya i praktika. 2022. No. 2(17). Pp. 81-90. doi:10.51608/26867818_2022_2_81
8. Chernyshov E.M., Makeev A.I., Korotkikh D.N. Bazovyye polozheniya mekhaniki proyavleniya konstruktivnykh svoystv konglomeratnykh stroitel'nykh kompozitov. Chast' 1. Obzor rezul'tatov teoreticheskikh issledovaniy problemy konstruirovaniya i sinteza struktur sovremennykh vysokotekhnologichnykh betonov [Basic provisions of the mechanics of manifestation of structural properties of conglomerate building composites. Part 1. Review of the results of theoretical studies of the problem of designing and synthesizing the structures of modern high-tech concretes]. Izvestiya vuzov. Construction. 2020. No. 8. Pp. 43-51 (rus)
9. Chernyshov E.M. Makeev A.I. Materialovedeniye i tekhnologiya stroitel'nykh kompozitov kak sistema nauchnogo znaniya i predmet razvitiya issledovaniy. Chast' 3. Sistemnaya identifikatsiya "konstruktsii struktury" konglomeratnykh stroitel'nykh kompozitov (v kachestvennoy postanovke problemy) [Material science and technology of building composites as a system of scientific knowledge and subject of research development. Part 3. System identification of the "structural structure" of conglomerate building composites (in a qualitative formulation of the problem)] // Izvestia of higher educational institutions. Construction. 2021. No. 3(747). Pp. 5-26. (rus)
10. Sokolova Yu.A., Kondrashchenko V.I., Kesariysky A.G. et al. Raschetno-eksperimental'nyye issledovaniya vnutrennikh napryazheniy v stroitel'nykh materialakh [Calculation and experimental studies of internal stresses in building materials]. Ekspert: teoriya i praktika, 2020. No. 4(7). Pp. 60-65. doi:10.24411/2686-7818-2020-10037
11. Selyaev V.P., Selyaev P.V., Lazarev A.L. et al. Fraktal'naya kvantovo-mekhanicheskaya model' deformirovaniya i razrusheniya betona [Fractal quantum-mechanical model of deformation and destruction of concrete]. Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo. 2022. No. 4(53). Pp. 31-40. doi:10.54734/20722958_2022_4_31
12. Karapetyants M.Kh. Stroyeniye veshchestva [The structure of matter]. M.: Librokom, 2014. 312 p. (rus)
13. Ilyukhin V.V., Kuznetsov V.A., Lobachev A.N., Bakshutov V.S. Gidrosilikaty kal'tsiya. Sintez monokristallov i kristallokhimiya [Calcium hydrosilicates. Synthesis of single crystals and crystal chemistry]. M.: Science. 1979. 184 p. (rus)
14. Kulik D.A., Miron G.D., Lothenbach B. A structurally-consistent CASH+ sublattice solid solution model for fully hydrated C-S-H phases: Thermodynamic basis, methods, and Ca-Si-H₂O core sub-model. Cement and Concrete Research. 2022. Vol. 151. Pp. 106585. doi:10.1016/j.cemconres.2021.106585
15. Shkolnik I.E. Effect of nonlinear response of concrete on its elastic modulus and strength. Cement and Concrete Composites, 2005. V. 27. I. 7-8. Pp. 747-757.
16. Regel V.R., Slutsker A.I., Tomashevsky E.E. Kineticheskaya priroda prochnosti tverdykh tel [Kinetic nature of the strength of solids]. M.: Nauka, 1974. 535 p. (rus)

17. Yartsev V.P., Kiseleva O.A. Prognozirovaniye povedeniya stroitel'nykh materialov pri neblagopriyatnykh usloviyakh ekspluatatsii [Predicting the behavior of building materials under adverse operating conditions]. Tambov: Publishing House of the Tambov State Technical University, 2009. 124 p.
18. Chernyshov E. M., Makeev A. I. Tipy podstruktur v tselostnoy polistrukture betona i zakonomernosti formirovaniya parametrov polya napryazheniy v kompozite (k razvitiyu teorii konstruirovaniya i sinteza struktur konglomeratnykh stroitel'nykh kompozitov) [Types of substructures in the integral polystructure of concrete and patterns of formation of stress field parameters in the composite (to the development of the theory of design and synthesis of structures of conglomerate building composites)] // Fundamental, search and applied research of RAASN on scientific ensuring the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2020: Collection of scientific papers of the RAACS: in 2 volumes / Russian Academy of Architecture and Building Sciences (RAASN). Volume 2. M: DIA Publishing House, 2021. Pp. 304-314. (rus)
19. Vychislitel'nyye metody v mekhanike razrusheniya [Computational methods in fracture mechanics] / Pod. ed. S. Alturi. M.: Mir, 1990. 392 p. (rus)
20. Aktual'nyye problemy chislennogo modelirovaniya zdaniy, sooruzheniy i kompleksov. Tom 2. K 25-letiyu Nauchno-issledovatel'skogo tsentra StaDiO [Actual problems of numerical modeling of buildings, structures and complexes. Volume 2. To the 25th anniversary of the StaDiO Research Center] / Under the general ed. A.M. Belostotsky and P.A. Akimov. M.: Izd-vo ASV, 2016. 596 p. (rus)
21. Korotkikh D.N. Treshchinostoykost' sovremennykh tsementnykh betonov (problemy materialovedeniya i tekhnologii) [Crack resistance of modern cement concretes (problems of materials science and technology)]. Voronezh: Voronezh GASU, 2014. 141 p. (rus)
22. Karpenko N.I. Obshchiye modeli mekhaniki betona [General models of concrete mechanics]. M.: Stroyizdat, 1996. 416 p. (rus)
23. Selyaev V.P., Selyaev P.V. Fiziko- khimicheskiye osnovy mekhaniki razrusheniya tsementnykh kompozitov [Physico-chemical foundations of fracture mechanics of cement composites]. Saransk: Izd-vo Mordov. un-ta, 2018. 220 p. (rus)
24. Maksimova I.N., Makridin N.I., Erofeev V.T., Skachkov Yu.P. Struktura i prochnost' konstruktsionnykh tsementnykh kompozitov [Structure and strength of structural cement composites]. Saransk, 2015. 360 p.
25. Tran N.T., Park J.K., Kim D.J. [et al.] Fracture energy of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete at high strain rates. Cement and Concrete Research, 2016. Vol. 79. Pp. 169-184. doi:10.1016/j.cemconres.2015.09.011
26. Chernyshov E.M., Korotkikh D.N., Makeev A.I. Bazovyye polozheniya mekhaniki proyavleniya konstruktsionnykh svoystv konglomeratnykh stroitel'nykh kompozitov. Chast' 2. Obzor rezul'tatov prikladnykh issledovaniy po probleme konstruirovaniya i sinteza struktur sovremennykh vysokotekhnologichnykh betonov [Basic provisions of the mechanics of manifestation of structural properties of conglomerate building composites. Part 2. Review of the results of applied research on the problem of designing and synthesizing the structures of modern high-tech concretes]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo. 2020. No. 9. Pp. 48-57.
27. Valavi M., Casar Z., Bowen P. [et al.] Molecular dynamic simulations of cementitious systems using a newly developed force field suite ERICA FF. Cement and Concrete Research, 2022. Vol. 154. Pp. 106712. doi:10.1016/j.cemconres.2022.106712

Информация об авторе:

Макеев Алексей Иванович

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

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций.

E-mail: makeev@vgasu.vrn.ru

Information about author:

Makeev Alexey Iv.

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia,

candidate of sciences, associate professor, associate professor of the department of Technology of Building Materials, Products and Structures.

E-mail: makeev@vgasu.vrn.ru

А.В. ПУЗАТОВА¹, М.А. ДМИТРИЕВА¹, А.А. ЗАХАРОВ¹, В.Н. ЛЕЙЦИН¹¹ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта», г. Калининград, Россия

ЗОЛА-УНОСА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ БЕТОНОВ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ И СУХИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ

Аннотация. В последние годы поиск и использование альтернативных вяжущих строительных материалов становится предметом многих исследований как в России, так и за рубежом. Это связано с тенденцией к сокращению вредного воздействия от производства строительных материалов и к более рациональному использованию доступного сырья. Зола-уноса, являясь отходом энергетической промышленности, накопленным в больших объемах в золоотвалах по всей территории России, является перспективным материалом для использования в производстве цементосодержащих строительных материалов и изделий. В статье дан обзор научной литературы и патентов по использованию золы-уноса в бетонах различного вида, а также при производстве сухих строительных смесей. На основании проведенного обзора выявлены положительные и отрицательные воздействия от введения добавки золы-уноса на свойства бетона, способы повышения эффективности использования рассматриваемых отходов при производстве строительных материалов. В экспериментальной части работы представлены результаты по определению прочности и водонепроницаемости образцов тяжелого бетона с частичной заменой цемента золой-уноса, полученной при сжигании угля на новой тепловой электростанции в Калининградской области.

Ключевые слова: зола-уноса, цемент, вяжущее, ячеистый бетон, бетон, специальные виды бетонов, сухие строительные смеси.

A.V. PUZATOVA¹, M.A. DMITRIEVA¹, A.A. ZAKHAROV¹, V.N. LEITSIN¹¹Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

FLY ASH IN THE PRODUCTION OF CONCRETE FOR VARIOUS PURPOSE AND DRY CONSTRUCTION MIXTURES

Abstract. In recent years, the search for and use of alternative binder building materials has become the subject of many studies both in Russia and abroad. This is due to the trend to reduce the harmful effects of the production of building materials and to more rational use of available raw materials. Fly ash, being a waste of the energy industry, accumulated in large volumes in ash dumps throughout Russia, is a promising material for use in the production of cement-containing building materials and products. The article provides a review of scientific literature and patents on the use of fly ash in various types of concrete, as well as in the production of dry building mixtures. On the basis of the review, positive and negative effects from the introduction of fly ash additives on the properties of concrete, ways to increase the efficiency of using the considered waste in the production of building materials were identified. The experimental part of the work presents the results of determining the strength and water resistance of heavy concrete samples with partial replacement of cement with fly ash obtained by burning coal at a new thermal power plant in the Kaliningrad region.

Keywords: fly ash, cement, binder, cellular concrete, concrete, special types of concrete, dry mixes.

Введение

Современное строительное материаловедение сталкивается с такой актуальной задачей, как снижение негативного влияния от производства строительных материалов на окружающую среду.

© Пузатова А.В., Дмитриева М.А., Захаров А.А., Лейцин В.Н., 2023

В первую очередь это связано с тем, что производство цемента является одной из основных отраслей промышленности, выбрасывающих большое количество CO_2 в атмосферу. Известно, что при производстве 1 тонны цемента в атмосферу выделяется около 0,85 тонн углекислого газа [1], что представляет собой большую нагрузку как на экологическую ситуацию в зоне расположения цементного завода, так и в целом на глобальную проблему повышения средней мировой температуры из-за увеличивающегося количества парниковых газов. На 21-й Конференции ООН по изменению климата COP21 в декабре 2015 года 197 стран-участников приняли Парижское соглашение о необходимости сокращения глобальных выбросов парниковых газов в атмосферу. Целью этого соглашения является стремление к ограничению повышения глобальной температуры в этом столетии до 2 градусов Цельсия при одновременном поиске средств для еще большего ограничения этого повышения до 1,5 градуса. Россия, как участник Парижского соглашения, должна достичь к 2030 году количества выбросов CO_2 не более 70% от уровня 1990 года.

Одним из путей решения этой задачи является мировое сокращение производства и потребления цемента и использования вместо него альтернативных вяжущих материалов. Этими материалами могут быть отходы других промышленности, такие, как зола-уноса – отходы от сжигания угля на тепловых электростанциях. Ежегодно в России образуется 26 млн. тонн золошлаковых отходов, из которых используется или утилизируется только 8-10% [1]. Использование золы-уноса как добавки в бетоны решает сразу несколько проблем – экологическую, с точки зрения использования отходов, и экономическую, так как использование дополнительного вяжущего материала сокращает расход цемента, а следовательно, и стоимость всей бетонной смеси.

Использование золы-уноса в бетонах не является новшеством в строительном материаловедении [2-11], но данный вопрос продолжает быть актуальным и по сей день ввиду развития топливно-энергетической промышленности. Так, в Калининградской области в 2017 году был дан старт строительству новой Приморской угольной ТЭС. В 2021 году станция была введена в эксплуатацию. С началом работ на станции стали образовываться отходы при сжигании каменного угля, и встал вопрос об утилизации этих отходов. Перспективным направлением использования этих отходов является строительная индустрия области.

В Калининградской области имеются заводы как товарного бетона, так и производства железобетонных изделий, заводы по производству блоков из ячеистого бетона и сухих строительных смесей. Для Калининградской области использование материалов, обладающих пуццолановой активностью, обосновано еще и отсутствием местного производства цемента и необходимостью завозить его из других регионов России, что связано с дополнительными издержками на транспортировку, что в свою очередь, ведет к удорожанию конечного продукта. Перспективным является применение золы-уноса новой Приморской ТЭС на всех вышеуказанных предприятиях. В связи с этим, в данной статье приведен обзор научной литературы и патентов по использованию зол-уноса ТЭС в стройиндустрии Российской Федерации и за рубежом.

Использование золы-уноса при производстве ячеистых бетонов. В последние годы исследуется получение легких пористых материалов из промышленных отходов. По сравнению с обычным бетоном, пенобетон демонстрирует большой потенциал в области утилизации промышленных отходов с высокой производительностью, поскольку прочность такого бетона не является основным свойством, учитывая область его применения. Исходя из целей устойчивого развития, настоятельно необходимо продвигать энергоэффективные здания, технологии и материалы. Зольный пенобетон – это ключ к созданию энергоэффективных зданий. Такой материал обладает пониженной теплопроводностью и улучшенной теплоизоляцией за счет замедления тепловой конвекции, теплопроводности и теплового излучения. Использование золы-уноса для приготовления пенобетонов способствует устойчивому развитию, так как происходит переработка отходов сжигания угля

тепловых станций и снижается расход цемента [12]. Сравнительный анализ ячеистых бетонов с содержанием золы-уноса Новотроицкой ТЭС показал снижение энергозатрат при производстве таких бетонов до 80% и финансовых расходов до 30%. Кроме того, подсчитан экологический эффект. Так на производство 1 тонны зольного ячеистого бетона утилизируется порядка 900 кг золы-уноса [1]. К недостаткам использования золы-уноса в пенобетонах можно отнести повышение водопоглощения незначительные изменения прочности на сжатие.

Анализ публикаций таких исследователей как А.В. Волженский, П.И. Боженков, Е.А. Галибина, В.В. Костин и других [2-11] свидетельствует о преимуществах использования высококальциевых зол в производстве ячеистых бетонов. Проведенные исследования свидетельствуют об обладании зол всеми исходными характеристиками сырья для изготовления ячеистых бетонов (дисперсность и вяжущий потенциал), к тому же ячеистая структура смягчает деструкции расширения золы в поровое пространство без развития трещин.

Рассмотренный в [13-14] опыт действующих производств изделий из автоклавных ячеистых бетонов выявил трудности при использовании высококальциевых зол, прежде всего из-за нестабильности их свойств, обусловленной значительными колебаниями состава различных зол. В связи с этим, производство автоклавных ячеистых бетонов с использованием региональных источников золы-уноса требует отдельных научных исследований по определению состава и свойств газобетонов.

Во всем мире происходит активное использование золы-уноса при производстве ячеистых бетонов [12, 15-19]. Hongyu Gao et al. [15] изучают легкий вакуумный пенобетон, содержащий золу уноса и гипс, с целью выявления степени вспенивания в вакууме и в атмосферных условиях. В исследовании зола-уноса и карбидный шлак были использованы для частичной замены цемента с целью снижения стоимости сырья. Основными компонентами золы являются оксид кремния и оксид алюминия, а основными компонентами шлака из карбида кальция являются $\text{Ca}(\text{OH})_2$, эти вещества обладают вяжущими свойствами, поэтому могут заменять собой часть цементного вяжущего.

Крупная зола-уноса может использоваться при производстве ячеистых бетонов как мелкий заполнитель [16]. Введение золы-уноса крупных фракций в состав пенобетона улучшает многие его свойства, в том числе удобоукладываемость, механическую стойкость и устойчивость к замораживанию-оттаиванию, в то время как обратное явление наблюдается в отношении водопоглощения и усадки при высыхании. Использование мелкоизмельченной золы-уноса приводит к улучшению механических свойств бетона, может снизить выделяемую при гидратации теплоту и уменьшить усадку пенобетона при высыхании без значительного изменения его механических свойств. Однако влияние крупной золы-уноса на характеристики пенобетона на данный момент менее изучено. Использование крупной золы-уноса вместо песка улучшает консистенцию пенобетона из-за эффекта сферической формы частиц и большей удельной площадью, чем у песка. Прочность на сжатие пенобетона с золой оказалась выше, чем у песчаного пенобетона ввиду большего содержания мелких частиц. В отношении морозостойкости пенобетон с содержанием золы-уноса и песка показывает наилучшую сопротивляемость замораживанию-размораживанию по сравнению с другими составами [16].

Для увеличения эффекта от применения золы-уноса при производстве ячеистых бетонов могут использоваться дополнительные минеральные добавки, например микрокремнезем [17, 18]. Для достижения баланса желаемых свойств пенобетона с высоким содержанием пены рекомендуется использование тройных цементных систем (микрокремнезем + зола уноса + цемент). В работе [18] рассматривается улучшение свойств фибропенобетонов за счет введения полипропиленовой фибры, золы-уноса и микрокремнезема. Зола-уноса в данном случае рассматривается как замена традиционному песку. Структурный фибропенобетон с разной плотностью (1000, 1300, 1600 и 1900 кг/м³) и

соответствующей прочностью на сжатие 20-70 МПа использовался для исследования прочности на сжатие, изгиб и раскалывание, усадки при высыхании и ползучести. Замена песка золой-уноса привела к тому, что 28-дневная прочность пенобетона с золой составляла около 80–95% от соответствующей прочности, наблюдаемой после трех месяцев отверждения обычного пенобетона. Мелкодисперсный кремнезем и полипропиленовая фибра значительно повысили прочность пенобетона при затвердевании. Кроме того, добавление полипропиленового волокна значительно увеличило предел прочности на растяжение и увеличило сопротивление ползучести и усадку при высыхании. Таким образом, структурный фибропенобетон сегодня может использоваться в качестве заменителя легкого бетона при производстве конструкционного бетона в строительной отрасли.

Были проведены исследования механизма упрочнения легкого ячеистого бетона с золой-уноса в отношении микроструктуры, включая характеристики пористости и каркаса [19]. Изучение механизма упрочнения легкого ячеистого бетона, заполненного золой-уноса показало, что для достижения наилучшей прочности каркаса и характерных параметров пор рекомендуется содержание золы-уноса в ячеистом бетоне составляет примерно 25%. Различия в механизме образования структурного каркаса между обычным легким ячеистым бетоном и таким же с золой-уноса происходит из-за эффекта наполнения структуры сферическими частицами золы-уноса в период до 28 дней. После 28 дней твердения пуццолановая реакция золы и реакция гидратации цемента взаимно способствуют уплотнению структуры легкого ячеистого бетона, что увеличивает его долговечность и эксплуатационные характеристики.

Существуют запатентованные технологии производства ячеистых бетонов, содержащих золу-уноса [20-23]. Патент RU 2237041 С1 описывает сырьевую смесь для изготовления конструктивного теплоизоляционного пенобетона. Зола-уноса содержится в смеси в количестве 35-39% по массе, причем количество цемента в составе равноценно золе. В данном случае введение золы вместо части цемента снижает стоимость пенобетона. Кроме того, так как зола обладает высокой удельной поверхностью (2800-5000 см²/г у золы, 2500 см²/г у цемента) происходит улучшение гранулометрического состава, увеличивается суммарная поверхность соприкосновения цементного геля с микронаполнителем, что в итоге приводит к более быстрому твердению смеси и повышенной прочности [20].

Патент RU 2543847 С2 описывает способ приготовления смеси для производства неавтоклавного композиционного ячеистого бетона естественного твердения. Сухая смесь для изготовления такого бетона содержит, кг: цемент 600, зола-уноса Рязанской ТЭЦ 400, микрокремнезем МКУ 50, суперпластификатор С-3 9, олеат натрия 3, глюконат натрия 1,5, адимент СТ-2 2, биоцидная добавка Ластонокс 2, фибра 1,5, полимерная добавка 5, сухая порообразующая смесь 20, цеолитовая добавка, содержащая одно- или многослойные нанотрубки, 50. После перемешивания совместный сухой состав подвергают ударной механоактивации на УДА-установках. В результате происходит воздействие на процесс образования кристаллогидратов, процесс формирования фибриллярных микроструктур многомикронного порядка. Сухую смесь затворяют водой в количестве 45 л на 100 кг и тщательно перемешивают. Из-за отсутствия автоклавной обработки и возможности не применять пропарку и прогрев предлагаемый способ позволяет обеспечить существенную экономию при производстве пенобетона [21].

В патенте RU 2719895 С1 представлена бетонная смесь для приготовления пенобетона со звукопоглощающими свойствами. Такая смесь содержит цемент, известняк, гипс, золу-уноса, кварцевый песок, стеклянную крошку, поликарбоксилатный гиперпластификатор, синтетический углеводородный пенообразователь, воду. Зола-уноса содержится в количестве 36-44 кг на м³. Технический результат изготовления пенобетона из такой смеси – улучшение звукопоглощающих характеристик, повышение их стабильности при одновременном упрощении технологии производства и утилизации отходов. За счет совместного использования цемента, золы-уноса, известняка и гипса повышаются физико-механические

характеристики бетона, так как синергетический эффект от совместной работы этих компонентов обеспечивает образование центров кристаллизации, что приводит в итоге к улучшению качества бетона [22].

Патент RU 2635687 C1 описывает сырьевую смесь для производства изделий из газобетона, которые могут быть использованы в домостроении для изготовления строительных блоков, а также в дорожном строительстве для изготовления бордюров, ограждений и плиток. Сырьевая смесь содержит золу уноса ТЭЦ-4 г. Омска в количестве 10,1-33% по массе. Используется зола-уноса от сжигания бурых углей Канско-Ачинского бассейна, содержащая SiO_2 не менее 45%, CaO не более 10%, SO_3 не более 3%, влажность не более 0,05%. Такая зола является кислой, в газобетоне используется как кремнеземистый заполнитель для повышения прочности и долговечности [23].

Таким образом, описанные выше преимущества и примеры использования золы-уноса при производстве ячеистых бетонов, подтверждают перспективность использования данного материала в стройиндустрии как Калининградской области в частности, так и в России в целом.

Использование золы-уноса в общестроительных бетонах. На сегодняшний день накоплен большой опыт использования золы-уноса в бетонах общестроительного назначения. В зависимости от качества золы, она может использоваться либо как добавка, обладающая пуццолановой активностью, либо как микрозаполнитель или заполнитель [24]. Эффективным способом повышения активности золы является метод ее помола до определенного значения удельной поверхности в шаровых мельницах или дезинтеграторах. Таким образом можно добиться повышения прочности золосодержащих бетонов в 1,5-2 раза [25]. К негативным эффектам использования золы в бетонах можно отнести повышение усадки и, в отдельных случаях, снижение прочности в начальные сроки твердения, так как зола-уноса является медленноотвердеющим пуццоланом [26].

Согласно ГОСТ 25818-2017 «Зола-уноса тепловых электростанций для бетонов» золы-уноса по химическому составу делятся на кислые и основные. Кислые золы получают при сжигании антрацитовых, каменных и бурых углей, содержание оксида кальция в такой золе не более 10%. Основные золы – буроугольные, с содержанием оксида кальция более 10%. Содержание оксида кальция влияет на вяжущие свойства золы, чем больше этот показатель, тем большей пуццолановой активностью обладает зола-уноса.

В зарубежном опыте используется зола-уноса двух классов С и F в качестве альтернативы цементному вяжущему, либо как мелкий заполнитель [27-29]. Согласно данным Американского нефтяного института, зола класса С содержит высококальциевые соединения и может быть использована в качестве самостоятельного вяжущего, так как обладает достаточной пуццолановой активностью. Зола класса F содержит пониженное количество кальция, для полноценного использования такой золы в качестве вяжущего необходимо вводить в состав дополнительные источники пуццолановой активности, либо применять такую золу в качестве замены части цемента или песка.

Влияние замещения части цемента золой-уноса в количестве от 25% до 60% на прочность бетона свыше 28 дней исследуется в [28]. Для этих исследований используется низкокальциевая зола-уноса класса F. Прочность на сжатие и модуль статической упругости были измерены экспериментально в разных возрастах от 7 до 180 дней на цилиндрических образцах для всех смесей бетона, также были измерены деформация при ползучести и усадке при длительной нагрузке с уровнем напряжения 50%. Бетон с 40% содержанием золы-уноса показывает удовлетворительные характеристики в более позднем возрасте (т.е. после 28 дней) с точки зрения прочности, модуля упругости и прогиба. Было замечено, что увеличение прочности от 28 до 180 дней больше у бетона с содержанием золы-уноса, чем у обычного бетона. Ползучесть и деформация при усадке с 28 до 180 дней снижается в бетонных образцах с золой. Таким образом, эффективное использование золы-уноса улучшает механические свойства бетона из-за ее пуццолановой активности.

Особенности использования зол уноса классов С и F отражены в Патенте RU 2745041 С1 [30], который описывает способ цементирования скважин композитным цементным составом, который содержит по меньшей мере один пуццолан, ускоритель на основе хлористой и сульфатной солей и воду. Показано, что одним из возможных пуццоланов может выступать зола-уноса тепловых электростанций, которая может быть использована как отдельно, так и в комбинации с дополнительными пуццоланами (кремнеземистая пыль, зола сельскохозяйственных отходов или природные пуццоланы). Класс С содержит кремнезем и известь, при смешивании с водой образует затвердевшую массу. Класс F не содержит достаточного количества извести, поэтому для активации цементирующей реакции требуется дополнительный источник ионов кальция. Для композитного цементного состава с золой-уноса класса F дополнительно вводится известь, в некоторых случаях гидратированная известь или гидроксид кальция.

Характеристики усадки конструкционного легкого бетона плотностью 1600 кг/м^3 , содержащего соединения гликоля и золу-уноса изучаются в [31]. Отмечается, что частичная замена цемента и песка золой может уменьшить усадку легкого бетона. В этом случае прочность на сжатие увеличивается за счет дополнительной пуццолановой реакции при введении золы-уноса. Добавление золы привело к эффектам наполнения и диспергирования, а также к увеличению центров зародышеобразования и осаждения цементного теста и бетона. Использование золы для замены части песка также положительно сказалось на прочности бетона. Следовательно, использование золы для замены части цемента и части песка выгодно для легкого бетона с точки зрения как усадки при высыхании, так и прочности на сжатие.

Известен способ на производство легкого заполнителя для бетонов из сырьевой смеси, содержащей золу-уноса (пенозола) [32]. Сырьевая смесь состоит преимущественно из золы-уноса от сжигания каменных углей на ТЭС и ТЭЦ г. Новосибирска (52,5-68,5%), в меньшем количестве содержится глина (20-25%), отсеvy магматической породы (10-20%), неабразивный шлам карбида кремния (1,5-2,5%), который используется в качестве газообразующего компонента. Легкие заполнители, изготовленные из такой сырьевой смеси, могут быть эффективными для легких бетонов с пониженной теплопроводностью. За счет использования измельченных до 100 мкм отсеvов магматической породы при изготовлении легкого зольного заполнителя снижается температура прокаливания и обжига гранул заполнителей, тем самым уменьшается энергоемкость производства таких заполнителей.

Использование золы-уноса в бетонах специального назначения. К бетонам специального назначения предъявляются повышенные требования по прочности, непроницаемости, морозостойкости, долговечности и т.д. Известно, что чем плотнее бетонная смесь, тем более высокими эксплуатационными характеристиками она обладает в затвердевшем состоянии. Опыт использования золы-уноса в бетонах специального назначения представлен в [33]. Композиционное вяжущее такого бетона состоит из цемента, двух видов зол-уноса ТЭЦ Приморского края и известняка. Для повышения активности композиционное вяжущее было измельчено до удельной поверхности $600 \text{ м}^2/\text{кг}$. Созданные цементно-зольные фибробетоны для малопроницаемых объектов (резервуаров и гидротехнических сооружений) имеют повышенные показатели по прочности (выше 100 МПа), а также сниженные характеристики газо-, водо- и паропроницаемости. За счет применения золы-уноса с другими активными минеральными компонентами происходит уплотнение структуры бетона, так как микросферы золы-уноса являются центрами кристаллизации новообразований, создавая плотную упаковку зерен на макроуровне. Таким образом снижается проницаемость бетона и повышаются его эксплуатационные свойства в особых условиях.

В условиях воздействия на конструкцию сульфатно-агрессивных вод могут применяться бетоны на заполнителе из каменноугольной золошлаковой смеси [34]. Такие

бетоны могут выдерживать до 300 циклов попеременного замораживания-оттаивания, иметь повышенные прочностные показатели и марку по водонепроницаемости W12 и выше.

Из патента RU 2717436 С1 [35] известно вяжущее на основе серы для растворов, бетонов и конструкций из них. В состав вяжущего входят золошлаковые отходы тепловой электростанции г. Казани в количестве 59-60% по массе. Помимо золы вяжущее содержит серные отходы нефтеперерабатывающих заводов (37-39%) и хлорид кремния IV (1-3%). Серные отходы и модифицирующую добавку (хлорид кремния) нагревают до температуры плавления, затем в расплав добавляют золошлаковые отходы. Полученное вяжущее выгружают в формы и прессуют под давлением, после остывания проводят распалубку изделия. Свойства предлагаемого вяжущего значительно улучшены по сравнению с известными прототипами вяжущего. Прочность на сжатие выше на 20-50%, прочность на изгиб – на 25-32%, морозостойкость больше на 15-24 цикла, вяжущее имеет повышенную стойкость к воздействиям хлороводородной и серной кислотам.

Из патента RU 2482146 С2 [36] известно теплозащитное покрытие для конструкций и оборудования, эксплуатируемых в условиях высоких температур и агрессивных сред. Такое покрытие состоит из полых керамических или корундовых микросфер (67-85%), вяжущего (10-30%) и воды (остальное). В качестве полых керамических микросфер используются алюмосиликатные микросферы золы-уноса с диаметром 3-150 мкм и толщиной стенок 1-6 мкм. Изобретение позволяет получить теплозащитное покрытие с повышенными теплозащитными и теплофизическими свойствами, стойкостью к вибронагрузкам и агрессивным средам.

Зола-уноса пригодна для использования при производстве «зеленого» бетона нового поколения для современного строительства [37]. Геополимерный бетон на основе золы-уноса кажется превосходным вариантом по сравнению с обычным бетоном, так как использование экономически эффективных и широкодоступных зол-уноса в качестве минеральных наполнителей в бетоне дает множество преимуществ. Хотя доказано, что геополимерный бетон на основе золы демонстрирует превосходные прочностные характеристики, аналогичные или даже превосходящие обычный бетон, его долговечность по-прежнему остается открытым вопросом, требующим дальнейшего изучения. Вместе с золой-уноса прочный геополимерный бетон представляет собой сравнительно новый, революционный и устойчивый инженерный композитный материал с рядом преимуществ, включая высокую начальную прочность и улучшенные характеристики долговечности (например, пониженную проницаемость) в агрессивных средах за счет получения более плотного бетона с небольшим размером пор. Тем не менее, производство экологически безопасных и экологически чистых бетонных композитов специального назначения с использованием техногенного сырья стало основным интересом в строительной отрасли во всем мире.

Механические свойства геополимерного бетона на основе золы-уноса с добавлением резиновой крошки и стальной фибры в условиях окружающей среды и агрессивных сернокислых условий рассматривается в [38]. Геополимерный бетон с заменой до 20% цемента золой-уноса, резиновой крошкой в количестве, равном 10% от объема мелких зерен, и стальной фиброй был изготовлен и затем выдержан в сухих условиях при температуре 60°C. Через 28 дней были проведены испытания механических свойств в среде, контактировавшей с серной кислотой. Результаты показали, что самые высокие значения прочности на сжатие и растяжение, равные 49 МПа и 4,7 МПа соответственно, принадлежали геополимерному бетону, содержащему резиновую крошку и 1% стального волокна с заменой 20% цемента золой-уноса. При контакте с кислотой в течение 90 дней бетон с 1% фибры и без цемента имел самую высокую прочность на сжатие, равную 34 МПа, показав наименьшее снижение, равное 26%. Эти значения указывают на соответствующую конструктивную прочность геополимерного бетона такого типа, который может быть использован в качестве подходящей модели для устойчивого развития как замена обычному бетону полностью на цементом вяжущем.

Использование золы-уноса при производстве сухих строительных смесей.

Накопленное количество золы-уноса на всей территории России и описанные выше преимущества делают ее отличным компонентом при производстве сухих строительных смесей (ССС). Представлен обзор использования золы-уноса различных территорий при производстве СССР и даны некоторые составы таких смесей.

В Рязанской области при производстве сухих строительных смесей используют тонкомолотую золу-уноса, получаемую при сгорании твердого топлива на местной ГРЭС [39]. С помощью математического моделирования эксперимента удалось установить, что использование золы-уноса в составах СССР улучшает их пластические свойства, ускоряет гидратацию, а также способствует структурообразованию смесей. Отмечается повышенная прочность смесей при введении количестве золы от 30% до 50% от массы вяжущего, что наиболее целесообразно для кладочных растворов.

В работе [40] представлен оптимальный состав СССР на основе отходов промышленности, не содержащих вредные примесей. Представлен состав СССР, содержащий: цемент (10-12%), глину (15-18%), карбонатный песок (17,5-22,5%), кварцевый песок (30,5-42,5%) и золу-уноса ТЭС (15-20%). Для придания золе дополнительной активности, ее предварительно измельчали в бегунах до тонкодисперсного состояния (до 0,14 мм). На основе разработанной СССР получены растворы с оптимальными физико-механическими свойствами, соответствующими маркам М30-М100.

В [41] разработан состав с содержанием золы-уноса и известково-карбонатной пыли (ИКП), который был успешно апробирован на заводах по производству СССР. Отмечается соответствие физико-механических свойств разработанного состава требованиям нормативных документов. Введение добавки карбонатной извести в данном случае ускоряет твердение цементно-зольных растворов как в раннем, так и в более позднем возрасте, способствует увеличению объема гидратных новообразований, формированию кристаллизационной структуры цементного камня. При расходе цемента до 200 кг/м³, золы 100-150 кг/м³, ИКП 50-100 кг/м³ представляется возможным получение растворов с прочностью 20-30 МПа.

Влияние золы-уноса ТЭЦ-2 г. Улан-Уде на вязкость сухих строительных систем исследовано в [42]. Отмечается, что введение золы-уноса повышает динамическую вязкость и предельное напряжение сдвига композиционных вяжущих на цементной основе. Это оказывает большое значение на технологические и физико-механические свойства СССР. Рассматриваемая зола-уноса относится к низкокальциевым, которые имеют высокое содержание кристаллической фазы (70% масс.) в виде кремнезема и глинозема, содержание стеклофазы составляет 30% масс [43].

Использование золы-уноса Омской ТЭЦ при производстве СССР для кладочных и штукатурных работ представлено в работе [44]. В исследуемых составах отмечается увеличение водопотребности на 18-20% при улучшении реологических свойств. При производстве эффективных СССР рекомендуется проводить совместный помол вяжущего с наполнителем в сухом виде. С помощью такой технологии повышаются свойства наполнителя, а также физико-механические показатели получаемых растворных смесей.

Исследования СССР с использованием гипсового вяжущего и техногенных отходов Чеченской Республики, представленных золой-уноса, показаны в [45]. Установлено, что такие СССР перспективны для применения в кладочных и штукатурных работах, а добавление тонкомолотой золы-уноса местной ТЭЦ выступает в качестве активной минеральной добавки в сухих строительных смесях.

Материалы и методы

В данном исследовании использовалась зола-уноса новой Приморской ТЭС Калининградской области. Характеристики золы, соответствие ГОСТ и перспективность использования в строительном секторе региона представлены в работе [46]. Была проведена оценка применимости золы в качестве частичной замены вяжущего в составе тяжелого

бетона класса В25. Для этого были определены прочности образцов контрольного и зольного бетона в возрасте 28 суток, а также влияние содержания золы на водонепроницаемость бетона. Изготовлены серии образцов трех составов бетона: контрольного, с 15% и 30% замещением цемента золой-уноса. Расход материалов на 1м³ представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Расход материалов на 1м³ бетонной смеси с различным содержанием золы-уноса

Маркировка состава	Количество золы-уноса по массе от вяжущего, %	Цемент, кг	Песок, кг	Щебень, кг	Суперпластификатор Stachement 2598, кг	Зола-уноса, кг	Вода, кг
ЗУ0	0	410	780	970	2,26	-	165
ЗУ15	15	348,5	780	970	2,26	61,5	165
ЗУ30	30	287	780	970	2,26	123	165

Прочность цементно-зольного бетона определялась при соблюдении требований и указаний ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам» посредством измерения минимальных усилий, разрушающих изготовленные образцы бетона в виде кубов размером 100х100х100 мм при их статистическом нагружении с постоянной скоростью нарастания нагрузки, и последующим вычислением напряжений при этих усилиях.

Исследование водонепроницаемости бетона велось в соответствии с ГОСТ 12730.5-2018 «Бетоны. Методы определения водонепроницаемости» методом «мокрого пятна». Были изготовлены серии из шести контрольных образцов-цилиндров и образцов с содержанием 30% золы по ГОСТ 10180-2012, которые устанавливались в гнезда аппарата для испытания бетона на водонепроницаемость УВБ-МГ4.01, обеспечивающую подачу воды к нижней торцевой поверхности образцов, поддержание ее давления, а также фиксацию времени «мокрого пятна» на каждом из образцов. Водонепроницаемость серии образцов оценивалась максимальным давлением, при котором не менее чем на четырех из шести образцов не наблюдалась фильтрация воды.

Результаты исследования и их анализ

Результаты по прочности контрольных образцов и образцов цементно-зольного бетона представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты определения прочности

Маркировка образцов	Средняя плотность, кг/м ³	Прочность в возрасте 28 суток R ₂₈ , МПа	Средняя прочность в возрасте 28 суток R ₂₈ , МПа
ЗУ0-1	2395,1	68,46	70,04
ЗУ0-2		72,27	
ЗУ0-3		67,66	
ЗУ0-4		71,76	
ЗУ15-1	2367	68,73	68,24
ЗУ15-2		70,12	
ЗУ15-3		68,58	
ЗУ15-4		65,51	
ЗУ30-1	2345	60,84	61,38
ЗУ30-2		58,13	
ЗУ30-3		61,9	
ЗУ30-4		64,63	

Как видно из результатов, прочность тяжелого бетона при добавлении в него золы-уноса Приморской ТЭС взамен части вяжущего имеет нисходящую тенденцию. При этом содержание золы в размере 15% понижает прочность бетона примерно на 3%, при содержании золы в 30-ти процентной дозировке значение прочности составляет 87% от прочности контрольных образцов.

Результаты испытаний на водонепроницаемость представлены для контрольного состава и состава с 30% золы в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты определения водонепроницаемости

Состав	Содержание золы-уноса взамен вяжущего, %	Максимальное давление воды, при котором на 4-х из 6-ти образцов не наблюдалась фильтрация, МПа	Марка бетона по водонепроницаемости
ЗУ0	0	0,8	W8
ЗУ30	30	0,4	W4

Результаты испытаний показали, что при добавлении в бетон приморской золы-уноса в размере 30% от массы вяжущего, водонепроницаемость бетона значительно ухудшается. У образцов на золоцементном вяжущем наблюдалась фильтрация уже при давлении воды в 0,4 МПа в то время, когда у контрольных образцов фильтрация наступала при давлении 0,8 МПа, а давление на отдельных образцах до момента начала фильтрации было более 1,0 МПа.

Выводы

В данной статье приведен обзор литературы по использованию золы-уноса при изготовлении бетонов различного назначения и производстве сухих строительных смесей. В зависимости от качества золы и ее химического состава, она может быть использована как замена части цемента при производстве бетонов и ССС, либо как микронаполнитель или заполнитель. При анализе литературы по теме были сформулированы следующие преимущества, недостатки и решения для широкого внедрения использования применения золы-уноса в строительном материаловедении:

– Преимущества: снижение энергозатрат и финансовых расходов при производстве стройматериалов; снижение расхода цемента; улучшение удобоукладываемости бетонной смеси, механической стойкости и устойчивости к замораживанию-оттаиванию; уплотнение структуры бетонной смеси; улучшение гранулометрического состава; повышение долговечности; повышенная стойкость золосодержащих конструкций при эксплуатации в агрессивных условиях.

– Недостатки: повышение водопоглощения; в некоторых случаях уменьшение прочности на начальных сроках твердения; увеличение усадки при высыхании; нестабильность свойств золы в зависимости от свойств угля, режима сгорания и состава золы.

– Решение: использование мелкоизмельченной золы; введение дополнительных минеральных добавок; совместный помол золы-уноса с цементом и добавками; определение свойств золы-уноса каждой партии перед использованием.

Экспериментальные исследования по введению золы-уноса Приморской ТЭС Калининградской области вместо части вяжущего в состав тяжелого бетона класса В25 не показали положительных результатов. Прочность на сжатие 28-суточных образцов снизилась на 13% при замене 30% цемента на золу-уноса. Также в два раза снизилась марка по водонепроницаемости. Можно сделать вывод, что зола-уноса Приморской ТЭС может быть использована в качестве микронаполнителя, а не как замена вяжущего. Также стоит подвергнуть золу дополнительной обработке с целью повышения физико-механических характеристик зольно-цементного бетона, на что будут направлены дальнейшие исследования.

Использование золы-уноса в строительной индустрии решает сразу несколько проблем – утилизацию большого количества накопленной золы в золоотвалах по всей территории России, сокращение расхода цемента и удешевление стоимости конечного продукта. Таким образом, активное использование золы-уноса в производстве строительных материалов и изделий ведет российскую и мировую строительную отрасль к более современному, экологичному и разумному потреблению ресурсов, энергии и сырья.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бикбау М.Я., Жарко В.И. Энергосбережение и экология производства наноцементов. О возможности снижения удельных затрат топлива и выбросов газов при производстве цемента // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2015. № 7-8 (198-199). С. 22-25.
2. Данакин Д.Н., Кожухова Н.И. Разработка ячеистых бетонов на основе зол-уноса // VII Международный молодежный форум «Образование. Наука. Производство»: сборник материалов. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2015. С. 554-558.
3. Волженский А.В. Минеральные вяжущие вещества. М.: Стройиздат, 1986. 464 с.
4. Боженов П.И. Технология автоклавных материалов. Л.: Стройиздат, 1978. 327 с.
5. Галибина Е.А. Автоклавные строительные материалы из отходов ТЭЦ. Л.: Стройиздат. Ленингр. Отд-ние, 1986. 128 с.
6. Костин В.В. Получение и свойства газобетонов, наполненных золами. Автореферат на соискание учёной степени к.т.н. М., 1993.
7. Чернышов Е.М. Закономерности развития структуры автоклавных материалов // Строительные материалы. 1992. №11. С. 28-31.
8. Овчаренко Г.И. Золы углей КАТЭКа в строительных материалах. Красноярск: Изд-во Краснояр. Ун-та, 1992. 216 с.
9. Рунова Р.Ф., Плохий В.П., Дехно А.Л., Яменко А.Б. Особенности структурообразования вяжущего на основе высокоуглеродистых зол // Цемент. 1995. № 3. С. 38-41.
10. Андреев В.В., Халин В.А., Политов И.П. Автоклавные материалы на основе зол ТЭЦ // Сб. Тр./ВНИИЭСМ. М.:1992. № 9. С. 23-43.
11. Козлова В.К. Основные направления использования зол и золошлаковых смесей ТЭЦ Сибири в производстве строительных материалов и в строительстве // Изв. вузов. Сер. стр-во и архитектура. 1990. № 10. С. 60-63.
12. Ощепков И.А., Худоносова З.А. Активизация вяжущих свойств высококальциевых зол-уноса тепловых электростанций и перспектива экономии цемента в строительстве // Изв. вузов. Сер. стр-во и архитектура. 1995. № 12. С. 64-69.
13. Chen Y., Guan L., Zhu S., Chen W. Foamed concrete containing fly ash: Properties and application to backfilling // Construction and Building Materials. 2021. № 273. 121685.
14. Черных К.П., Овчаренко Г.И., Францен В.Б. Технология, стабилизирующая свойства газобетона на основе высококальциевых зол // Труды научно-технической юбилейной конференции «Современные строительные материалы». Новосибирск: Изд-во НГАСУ, 2000. С. 47-48.
15. Овчаренко Г.И., Францен В.Б., Черных К.П. Золы ТЭЦ углей КАБ в качестве сырьевого компонента для производства газобетона // Международной научно-практической конференции «Гуманизм и строительство на пороге третьего тысячелетия»: тезисы докладов. Барнаул: изд-во Алт ГТУ. 1999. С. 129.
16. Gao H., Wang W., Liao H., Cheng F. Characterization of light foamed concrete containing fly ash and desulfurization gypsum for wall insulation prepared with vacuum foaming process // Construction and Building Materials. 2021. No. 281. 122411.
17. She W., Du Y., Zhao G., Feng P., Zhang Y., Cao X., Influence of coarse fly ash on the performance of foam concrete and its application in high-speed railway roadbeds // Construction and Building Materials. 2018. No. 170. С. 153-166.
18. Gökçe H.S., Hatungimana D., Ramyar K. Effect of fly ash and silica fume on hardened properties of foam concrete // Construction and Building Materials. 2019. No. 194. С. 1-11.
19. Mugahed Amran Y.H., Alyousef R., Alabduljabbar H., Khudhair M.H.R., Hejazi F., Alaskar A., Alrshoudi F., Siddika A. Performance properties of structural fibred-foamed concrete // Results in Engineering. 2020. No. 5. 100092.
20. Liu X., Ni C., Meng K., Zhang L., Liu D., Sun L. Strengthening mechanism of lightweight cellular concrete filled with fly ash // Construction and Building Materials. 2020. No. 251. 118954.
21. Патент RU 2237041 С1, Российская Федерация, МПК C04B 38/10. Сырьевая смесь для изготовления конструктивного теплоизоляционного пенобетона: № 2003111123/03, Заявл. 17.04.2003: Оpubл.

- 27.09.2004 / П.Ф. Собкалов, В.М. Бертов; патентообладатель(и): Открытое акционерное общество "Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники им. Б.Е. Веденеева".
22. Патент RU 2543847 C2, Российская Федерация, МПК C04B 38/02, C04B 38/10, B82B 3/00. Способ приготовления смеси для производства композиционного ячеистого бетона: № 2013131123/03, Заявл. 05.07.2013; Оpubл. 10.03.2015 / Е. Н. Ястремский, И. А. Емельянов.
23. Патент RU 2719895 C1, Российская Федерация, МПК C04B 38/10. Бетонная смесь: № 2019121054, Заявл. 03.07.2019; Оpubл. 23.04.2020 / Р.С. Федюк, А.В. Баранов, Ю.Л. Лисейцев, В.С. Лесовик, Е.А. Попов; патентообладатель(и): Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Владивостокский государственный университет экономики и сервиса" (ВГУЭС).
24. Патент RU 2635687 C1, Российская Федерация, МПК C04B 38/02, C04B 38/10, C04B 40/02. Сырьевая смесь для газобетона: № 2016122858, Заявл. 08.06.2016; Оpubл. 15.11.2017 / О.В. Чемисенко, Ю.Л. Брейтер, Е.Н. Полоумова; патентообладатель(и): Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Омский государственный технический университет".
25. Фомина И.В., Капустин Ф.Л. Эффективный заполнитель для конструкционных бетонов на основе золы-уноса // Апробация. 2013. № 3(6). С. 56-60.
26. Голик В.И., Дмитрак Ю.В., Хмелевский М.В., Стась П.П. Режим перемешивания компонентов при изготовлении бетона с добавкой золы уноса // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2019. № 1. С. 201-210.
27. Коровкин М.О., Калашников В.И., Ерошкина Н.А. Влияние высококальциевой золы-уноса на свойства самоуплотняющегося бетона // Региональная архитектура и строительство. 2015. № 1(22). С. 49-53.
28. Jani P., Imqam A. Class C fly ash-based alkali activated cement as a potential alternative cement for CO2 storage applications // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2021. № 201. 108408.
29. Fuzail Hashmi A., Shariq M., Baqi A. An investigation into age-dependent strength, elastic modulus and deflection of low calcium fly ash concrete for sustainable construction // Construction and Building Materials. 2021. № 283. 122772.
30. She W., Du Y., Zhao G., Feng P., Zhang Y., Cao X. Influence of coarse fly ash on the performance of foam concrete and its application in high-speed railway roadbeds // Construction and Building Materials. 2018. №170. С. 153-166.
31. Патент RU 2745041 C1, Российская Федерация, МПК E21B 33/138, C04B 28/02, C09K 8/467, C04B 22/08, C04B 40/00, C04B 22/16, C04B 103/14. Ускорители для композитных цементных составов: № 2019121706, Заявл. 22.02.2017; Оpubл. 18.03.2021 / Т.Д. Писклак, Ш.У. Риджо, Р.Г. Морган, Т.С. Содхи, С.Е.А. Ламзден, С.Дж. Льюис; Хэллибертон энерджи сервисиз, Инк.
32. Chindaprasirt P., Rattanasak U. Shrinkage behavior of structural foam lightweight concrete containing glycol compounds and fly ash // Materials & Design. 2011. № 32(2). С. 723-727.
33. Патент RU 2479518 C1, Российская Федерация, МПК C04B 18/06. Сырьевая смесь для производства легкого заполнителя бетонов (пенозола): № 2011137771/03, Заявл. 13.09.2011; Оpubл. 20.04.2014 / В.А. Кутолин, В.А. Широких; патентообладатель(и): Учреждение Российской академии наук Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения РАН (Институт геологии и минералогии СО РАН, ИГМ СО РАН).
34. Лесовик В.С., Федюк Р.С. Повышение эффективности малопроницаемых цементных композитов // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 10. С. 1346-1356.
35. Попов С.В., Брагинский В.Г., Давиденко В.П. Исследование специальных свойств бетона на заполнителях из золошлаковых смесей ТЭС // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2010. № 5-1(85). С. 135-139.
36. Патент RU 2717436 C1, Российская Федерация, МПК C04B 28/36, C01B 17/00, C04B 7/28, C04B 111/20. Вяжущее: № 2019115562, Заявл. 21.05.2019; Оpubл. 24.03.2020 / Р.Т. Ахметова, Г.А. Медведева, А.А. Юсупова, Л.Р. Бараева, А.Ю. Ахметова, А.И. Хапринов; патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Казанский национальный исследовательский технологический университет" (ФГБОУ ВО "КНИТУ").
37. Патент RU 2482146 C2, Российская Федерация, МПК C09D 5/00, C09D 1/00. Высокотемпературное теплозащитное покрытие: № 2011136161/05, Заявл. 31.05.2011; Оpubл. 20.05.2013 / Ю.А. Григорьев; патентообладатель: Общество с ограниченной ответственностью "ОВК-Россия".
38. Amran M., Debbarma S., Ozbakkaloglu T. Fly ash-based eco-friendly geopolymers concrete: A critical review of the long-term durability properties // Construction and Building Materials. 2021. №270. 121857.
39. Moghaddam S.C., Madandoust R., Jamshidi M., Nikbin I.M. Mechanical properties of fly ash-based geopolymers concrete with crumb rubber and steel fiber under ambient and sulfuric acid conditions // Construction and Building Materials. 2021. № 281. 122571.
40. Шалаев А.Г., Шалаева М.А., Антоненко Н.А. Использование золы-уноса для решения экологических проблем сухих строительных смесей // Новые технологии в учебном процессе и производстве: Материалы XVIII Международной научно-технической конференции, Рязань, 17–19 апреля 2019 года. Рязань:

Рязанский институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский политехнический университет», 2020. С. 200-203.

41. Бондарь А.В., Ковальский В.П. Использование отходов для производства строительных материалов // Северная Пальмира: IX Молодежной экологической конференции: сборник научных трудов. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН, 2018. С. 148-151.

42. Дворкин Л.И., Житковский В.В. Сухие строительные смеси с добавкой известково-карбонатной пыли // Сухие строительные смеси. 2018. № 4. С. 13-16.

43. Бадмаева Э.В., Урханова Л.А., Лхасаранов С.А. Исследование влияния минеральных добавок на вязкость композиционных вяжущих для сухих строительных смесей // Актуальные вопросы строительного материаловедения: материалы всероссийской научно-практической конференции. Улан-Удэ: Бурятский государственный университет имени Доржи Банзарова. 2021. С. 6-9.

44. Урханова Л.А., Лхасаранов С.А., Бадмаева Э.В. Исследование влияния минеральных добавок на свойства и фазовый состав композиционных вяжущих для сухих строительных смесей // Вестник ВСГУТУ. 2021. № 4(83). С. 79-84.

45. Рашупкина М.А., Симачева Э.Э., Скворцова Н.В. Получение эффективных сухих строительных смесей для кладочных и штукатурных работ // III Международной научно-практической конференции «Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации»: сборник материалов. Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2019. С. 385-390.

46. Чернышева Н.В., Муртазаев С.А.Ю., Аслаханова А.Х. Сухие строительные смеси на основе КГВ // Сухие строительные смеси. 2012. № 1. С. 12-13.

47. Zakharov A., Puzatova A, Dmitrieva M., Leitsin V. Prospects for the Use of Fly Ash from a Thermal Power Plant of the Kaliningrad Region in the Construction Industry // Lecture Notes in Civil Engineering. 2022. № 168. С. 105-116.

REFERENCES

1. Bikbau M.YA., Zharko V.I. Energoberezheniye i ekologiya proizvodstva nanotsementov. O vozmozhnosti snizheniya udel'nykh zatrat topliva i vybrosov gazov pri proizvodstve tsementa [Energy saving and ecology of nanocement production. On the possibility of reducing the specific fuel consumption and gas emissions in the production of cement]. *Building materials, equipment, technologies of the XXI century*. 2015. No. 7-8 (198-199). Pp. 22-25. (rus)

2. Danakin D.N., Kozhukhova N.I. Razrabotka yacheistykh betonov na osnove zol-unosa [Development of cellular concrete based on fly ash]. *VII International Youth Forum "Education. The science. Production": Conference Proceedings*. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2015. Pp. 554-558. (rus)

3. Volzhenskiy A.B. Mineral'nyye vyazhushchiye veshchestva [Mineral binders]. Moscow: Stroyizdat, 1986. 464 p. (rus)

4. Bozhenov P.I. Tekhnologiya avtoklavnykh materialov [Technology of autoclave materials]. Leningrad: Stroyizdat, 1978. 327 p. (rus)

5. Galibina E.A. Avtoklavnyye stroitel'nyye materialy iz otkhodov TETS [Autoclave building materials from CHP waste]. Leningrad: Stroyizdat. Leningrad. Department, 1986. 128 p. (rus)

6. Kostin V.V. Polucheniye i svoystva gazobetonov, napolnennykh zolami [Obtaining and properties of aerated concrete filled with ash]. Abstract for the degree of Ph.D. M., 1993. (rus)

7. Chernyshov Ye.M. Zakonomernosti razvitiya struktury avtoklavnykh materialov [Patterns of the development of the structure of autoclave materials]. *Stroitel'nyye materialy*. 1992. No. 11. Pp. 28-31. (rus)

8. Ovcharenko G.I. Zoly ugley KATEKa v stroitel'nykh materialakh [Ashes of KATEK coals in building materials]. Krasnoyarsk: Izd-vo Krasnoyar. Un-ta, 1992. 216 p. (rus)

9. Runova R.F., Plokhii V.P., Dekhno A.L., Yamenko A.B. Osobennosti strukturoobrazovaniya vyazhushchego na osnove vysokouglerodistykh zol [Peculiarities of structure formation of a binder based on high-carbon ash]. *Cement*. 1995. No. 3. Pp. 38-41. (rus)

10. Andreyev V.V., Khalin V.A., Politov I.P. Avtoklavnyye materialy na osnove zol TETS [Autoclave materials based on CHP ash]. Moscow: VNIIESM. 1992. No. 9. Pp.23-43. (rus)

11. Kozlova V.K. Osnovnyye napravleniya ispol'zovaniya zol i zoloshlakovykh smesey TETS Sibiri v proizvodstve stroitel'nykh materialov i v stroitel'stve [The main directions of the use of ashes and ash and slag mixtures from Siberian thermal power plants in the production of building materials and in construction]. *Izvestiya vuzov. Seriya str-vo i arkhitektura*. 1990. No. 10. Pp. 60-63. (rus)

12. Oshchepkov I.A., Khudonosova Z.A. Aktivizatsiya vyazhushchikh svoystv vysokokal'tsiyevykh zol-unosa teplovykh elektrostantsiy i perspektiva ekonomii tsementa v stroitel'stve [Activation of binding properties of

- high-calcium fly ash from thermal power plants and the prospect of saving cement in construction]. *Izvestiya vuzov. Seriya str-vo i arkhitektura*. 1995. No. 12. Pp. 64-69. (rus)
13. Chen Y., Guan L., Zhu S., Chen W. Foamed concrete containing fly ash: Properties and application to backfilling. *Construction and Building Materials*. 2021. No. 273. 121685. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.121685
 14. Chernykh K.P., Ovcharenko G.I., Frantsen V.B. Tekhnologiya, stabiliziruyushaya svoystva gazobetona na osnove vysokokal'tsiyevykh zol [Technology stabilizing the properties of aerated concrete based on high-calcium ash]. *Proceedings of the scientific and technical anniversary conference "Modern Building Materials"*. Novosibirsk: Izd-vo NGASU, 2000. Pp. 47-48. (rus)
 15. Ovcharenko G.I., Frantsen V.B., Chernykh K.P. Zoly TETS ugley KAB v kachestve syr'yevogo komponenta dlya proizvodstva gazobetona [Ashes of thermal power plant of KAB coals as a raw material component for the production of aerated concrete]. International scientific-practical conference "Humanism and construction on the threshold of the third millennium": abstracts. Barnaul: publishing house Alt GTU. 1999. Pp. 129. (rus)
 16. Gao H., Wang W., Liao H., Cheng F. Characterization of light foamed concrete containing fly ash and desulfurization gypsum for wall insulation prepared with vacuum foaming process. *Construction and Building Materials*. 2021. No. 281. 122411. doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.122411.
 17. She W., Du Y., Zhao G., Feng P., Zhang Y., Cao X., Influence of coarse fly ash on the performance of foam concrete and its application in high-speed railway roadbeds. *Construction and Building Materials*. 2018. No. 170, Pp. 153-166. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.02.207.
 18. Gökçe H.S., Hatungimana D., Ramyar K. Effect of fly ash and silica fume on hardened properties of foam concrete. *Construction and Building Materials*. 2019. No. 194. Pp. 1-11. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.11.036.
 19. Mugahed Amran Y.H., Alyousef R., Alabduljabbar H., Khudhair M.H.R., Hejazi F., Alaskar A., Alrshoudi F., Siddika A. Performance properties of structural fibred-foamed concrete. *Results in Engineering*. 2020. No. 5. 100092. doi:10.1016/j.rineng.2019.100092.
 20. Liu X., Ni C., Meng K., Zhang L., Liu D., Sun L. Strengthening mechanism of lightweight cellular concrete filled with fly ash. *Construction and Building Materials*. 2020. No. 251. 118954. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.118954.
 21. Patent RU 2237041 C1, Russian Federation, IPC C04B 38/10. Raw mix for the manufacture of structural heat-insulating foam concrete: No. 2003111123/03, Appl. 04/17/2003: Published. 09/27/2004 / P.F. Sobkalov, V.M. Bertov; patentee(s): Open Joint Stock Company "All-Russian Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering named after B.E. Vedenev".
 22. Patent RU 2543847 C2, Russian Federation, IPC C04B 38/02, C04B 38/10, B82B 3/00. Method for preparing a mixture for the production of composite cellular concrete: No. 2013131123/03, Appl. 07/05/2013: Published. 03/10/2015 / E. N. Yastremsky, I. A. Emelyanov.
 23. Patent RU 2719895 C1, Russian Federation, IPC C04B 38/10. Concrete mix: No. 2019121054, Appl. 07/03/2019: Published. 04/23/2020 / R.S. Fedyuk, A.V. Baranov, Yu.L. Liseyev, V.S. Lesovik, E.A. Popov; patent holder(s): Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Vladivostok State University of Economics and Service" (VGUES).
 24. Patent RU 2635687 C1, Russian Federation, IPC C04B 38/02, C04B 38/10, C04B 40/02. Raw mix for aerated concrete: No. 2016122858, Appl. 06/08/2016: Published. 11/15/2017 / O.V. Chemisenko, Yu.L. Breiter, E.N. Poloumova; patent holder(s): Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Omsk State Technical University".
 25. Fomina I.V., Kapustin F.L. Effektivnyy zapolnitel' dlya konstruktsionnykh betonov na osnove zoly-unos [Efficient filler for structural concrete based on fly ash]. *Aprobatsiya*. 2013. No. 3(6). Pp. 56-60. (rus)
 26. Golik V.I., Dmitrak YU.V., Khmelevskiy M.V., Stas' P.P. Rezhim peremeshivaniya komponentov pri izgotovlenii betona s dobavkoy zoly unosa [The mode of mixing components in the manufacture of concrete with the addition of fly ash]. *Bulletin of the Tula State University. Earth Sciences*. 2019. No. 1. Pp. 201-210. (rus)
 27. Korovkin M.O., Kalashnikov V.I., Yeroshkina N.A. Vliyaniye vysokokal'tsiyevoy zoly-unosa na svoystva samouplotnyayushchegosya betona [Influence of high-calcium fly ash on the properties of self-compacting concrete]. *Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo*. 2015. No. 1(22). Pp. 49-53. (rus)
 28. Jani P., Imqam A. Class C fly ash-based alkali activated cement as a potential alternative cement for CO2 storage applications. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2021. No. 201. 108408. doi:10.1016/j.petrol.2021.108408
 29. Fuzail Hashmi A., Shariq M., Baqi A. An investigation into age-dependent strength, elastic modulus and deflection of low calcium fly ash concrete for sustainable construction. *Construction and Building Materials*. 2021. No. 283. 122772. doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.122772.
 30. She W., Du Y., Zhao G., Feng P., Zhang Y., Cao X. Influence of coarse fly ash on the performance of foam concrete and its application in high-speed railway roadbeds. *Construction and Building Materials*. 2018. No. 170. Pp. 153-166. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.02.207.
 31. Patent RU 2745041 C1, Russian Federation, IPC E21B 33/138, C04B 28/02, C09K 8/467, C04B 22/08, C04B 40/00, C04B 22/16, C04B 103/14. Accelerators for composite cement compositions: No. 2019121706, Appl.

- 02/22/2017: Published. 03/18/2021 / T.D. Pisklak, Sh.U. Rijo, R.G. Morgan, T.S. Sodhi, S.E.A. Lamzden, S.J. Lewis; Halliburton Energy Services, Inc.
32. Chindaprasirt P., Rattanasak U. Shrinkage behavior of structural foam lightweight concrete containing glycol compounds and fly ash. *Materials & Design*. 2011. No. 32(2). Pp. 723-727. doi:10.1016/j.matdes.2010.07.036
33. Patent RU 2479518 C1, Russian Federation, IPC C04B 18/06. Raw mix for the production of lightweight concrete aggregate (penosol): No. 2011137771/03, Appl. 09/13/2011: Published. 04/20/2014 / V.A. Kutolin, V.A. wide; patentee(s): Establishment of the Russian Academy of Sciences Institute of Geology and Mineralogy im. V.S. Sobolev of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, IGM SB RAS).
34. Lesovik V.S., Fedyuk R.S. Povysheniye effektivnosti malopronitsayemykh tsementnykh kompozitov [Improving the efficiency of low-permeability cement composites]. *Vestnik MGSU*. 2021. Vol. 16. No. 10. Pp. 1346-1356. (rus)
35. Popov S.V., Braginskiy V.G., Davidenko V.P. Issledovaniye spetsial'nykh svoystv betona na zapolnitelyakh iz zoloshlakovykh smesey TES [Investigation of the special properties of concrete on aggregates from ash and slag mixtures at TPPs]. *Vestnik Donbasskoy natsional'noy akademii stroitel'stva i arkhitektury*. 2010. No. 5-1(85). Pp. 135-139. (rus)
36. Patent RU 2717436 C1, Russian Federation, IPC C04B 28/36, C01B 17/00, C04B 7/28, C04B 111/20. Binder: No. 2019115562, Appl. 05/21/2019: Published. 03/24/2020 / R.T. Akhmetova, G.A. Medvedev, A.A. Yusupova, L.R. Baraeva, A.Yu. Akhmetova, A.I. Khatsrinov; patent holder: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kazan National Research Technological University" (FGBOU VO "KNRTU").
37. Patent RU 2482146 C2, Russian Federation, IPC C09D 5/00, C09D 1/00. High-temperature heat-shielding coating: No. 2011136161/05, Appl. 05/31/2011: Published. 05/20/2013 / Yu.A. Grigoriev; patent holder: Limited Liability Company "OVK-Russia"
38. Amran M., Debbarma S., Ozbakkaloglu T. Fly ash-based eco-friendly geopolymer concrete: A critical review of the long-term durability properties. *Construction and Building Materials*. 2021. No. 270. 121857. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.121857
39. Moghaddam S.C., Madandoust R., Jamshidi M., Nikbin I.M. Mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with crumb rubber and steel fiber under ambient and sulfuric acid conditions. *Construction and Building Materials*. 2021. No. 281. 122571. doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.122571
40. Shalayev A.G., Shalayeva M.A., Antonenko N.A. Ispol'zovaniye zoly-unosa dlya resheniya ekologicheskikh problem sukhikh stroitel'nykh smesey [The use of fly ash to solve the environmental problems of dry building mixtures]. *New technologies in the educational process and production: Proceedings of the XVIII International Scientific and Technical Conference*. Ryazan: Ryazan Institute (branch) of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Moscow Polytechnic University", (2020). Pp. 200-203. (rus)
41. Bondar' A.V., Koval'skiy V.P. Ispol'zovaniye otkhodov dlya proizvodstva stroitel'nykh materialov [The use of waste for the production of building materials]. *Northern Palmyra: IX Youth Ecological Conference: Conference Proceedings*. St. Petersburg: St. Petersburg Research Center for Environmental Safety of the Russian Academy of Sciences, 2018. Pp. 148-151. (rus)
42. Dvorkin L.I., Zhitkovskiy V.V. Sukhiye stroitel'nyye smesi s dobavkoy izvestkovo-karbonatnoy pyli [Dry construction mixtures with the addition of lime-carbonate dust]. *Sukhiye stroitel'nyye smesi*. 2018. No. 4. Pp. 13-16. (rus)
43. Badmayeva E.V., Urkhanova L.A., Lkhasaranov S.A. Issledovaniye vliyaniya mineral'nykh dobavok na vyazkost' kompozitsionnykh vyazhushchikh dlya sukhikh stroitel'nykh smesey [Investigation of the influence of mineral additives on the viscosity of composite binders for dry building mixtures]. *Topical issues of building materials science: Conference Proceedings*. Ulan-Ude: Buryat State University named after Dorzhi Banzarov, 2021. Pp. 6-9. (rus)
44. Urkhanova L.A., Lkhasaranov S.A., Badmayeva E.V. Issledovaniye vliyaniya mineral'nykh dobavok na svoystva i fazovyy sostav kompozitsionnykh vyazhushchikh dlya sukhikh stroitel'nykh smesey [Study of the influence of mineral additives on the properties and phase composition of composite binders for dry building mixtures]. *Vestnik VSGUTU*. 2021. No. 4(83). Pp. 79-84. (rus)
45. Rashchupkina M.A., Simacheva E.E., Skvortsova N.V. Polucheniye effektivnykh sukhikh stroitel'nykh smesey dlya kladochnykh i shtukaturnykh rabot [Obtaining effective dry building mixes for masonry and plastering]. *III International Scientific and Practical Conference "Architectural and construction and road transport complexes: problems, prospects, innovations": Conference Proceedings*. Omsk: Siberian State Automobile and Road University (SibADI), 2019. Pp. 385-390. (rus)
46. Chernysheva N.V., Murtazayev S.A.YU., Aslakhanova A.KH. Sukhiye stroitel'nyye smesi na osnove KGV [Dry building mixes based on KGV]. *Sukhiye stroitel'nyye smesi*. 2012. No. 1. Pp. 12-13. (rus)
47. Zakharov A., Puzatova A, Dmitrieva M., Leitsin V. Prospects for the Use of Fly Ash from a Thermal Power Plant of the Kaliningrad Region in the Construction Industry. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022. No. 168. Pp. 105-116. doi:10.1007/978-3-030-91145-4_11.

Информация об авторах:

Пузатова Анастасия Вячеславовна

ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта», г. Калининград, Россия,
старший преподаватель ОНК «Институт высоких технологий», зав. лабораторией строительных материалов.
E-mail: asharanova@kantiana.ru

Дмитриева Мария Александровна

ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта», г. Калининград, Россия,
доктор физико-математических наук, профессор ОНК «Институт высоких технологий».
E-mail: ADmitrieva@kantiana.ru

Захаров Александр Анатольевич

ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта», г. Калининград, Россия,
студент магистратуры направления «Современные строительные материалы и технологии».
E-mail: zakhorov2@gmail.com

Лейцин Владимир Нояхович

ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта», г. Калининград, Россия,
доктор физико-математических наук, профессор ОНК «Институт высоких технологий».
E-mail: VLeitsin@kantiana.ru

Information about authors:

Puzatova Anastasiia V.

Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia,
senior lecturer of the Institute of High Technologies, head of building materials laboratory.
E-mail: asharanova@kantiana.ru

Dmitrieva Maria Al.

Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia,
doctor of physical and mathematical sciences, professor of the Institute of High Technologies.
E-mail: ADmitrieva@kantiana.ru

Zakharov Alexander An.

Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia,
master's degree student of Modern building materials and technologies.
E-mail: zakhorov2@gmail.com

Leitsin Vladimir N.

Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia,
doctor of physical and mathematical sciences, professor of the Institute of High Technologies.
E-mail: VLeitsin@kantiana.ru

Уважаемые авторы!
Просим Вас ознакомиться с основными требованиями
к оформлению научных статей

- Представляемый материал должен быть **оригинальным, не опубликованным ранее** в других печатных изданиях.
- Объем материала, предлагаемого к публикации, измеряется числом знаков с учетом пробелов. Рекомендуемый объем статей: **от 15000 до 45000 знаков с пробелами**.
- Статья должна быть набрана на листах формата А4 шрифтом Times New Roman, размер 12 pt с одинарным интервалом, текст выравнивается по ширине; абзацный отступ – 1,25 см, правое поле – 2 см, левое поле – 2 см, поля внизу и сверху – 2 см; все страницы рукописи должны иметь сплошную нумерацию.
- Статья предоставляется в электронном виде по электронной почте или через систему электронной редакции.
- В одном сборнике может быть опубликована только **одна статья одного автора**, включая соавторство.
- Если статья возвращается автору на доработку, исправленный вариант следует прислать в редакцию повторно, приложив письмо с ответами на замечания рецензента. Доработанный вариант статьи рецензируется и рассматривается редакционной коллегией вновь. Датой представления материала считается дата поступления в редакцию окончательного варианта исправленной статьи.
- Аннотации всех публикуемых материалов, ключевые слова, информация об авторах, списки литературы будут находиться в свободном доступе на сайте соответствующего журнала и на сайте Российской научной электронной библиотеки – РУНЭБ (Российский индекс научного цитирования).

В тексте статьи не рекомендуется применять:

- обороты разговорной речи, техницизмы, профессионализмы;
- для одного и того же понятия различные научные термины, близкие по смыслу (синонимы), а также иностранные слова и термины при наличии равнозначных слов и терминов в русском языке;
- произвольные словообразования;
- сокращения слов, кроме установленных правилами русской орфографии, соответствующими стандартами.
- Сокращения и аббревиатуры должны расшифровываться по месту первого упоминания (вхождения) в тексте статьи.

Обязательные элементы:

- **заглавие (на русском и английском языке)** публикуемого материала должно быть точным и емким, слова, входящие в заглавие, должны быть ясными сами по себе, а не только в контексте; следует избегать сложных синтаксических конструкций, новых словообразований и терминов, а также слов узкопрофессионального и местного значения;
- **аннотация (на русском и английском языке)** кратко описывает объект исследования, мотивацию к проведению исследования, результаты исследования (рекомендуется указывать конкретные результаты и зависимости, полученные в исследовании), выводы (кратко); рекомендуемый объем – от 200 до 250 слов;
- **ключевые слова (на русском и английском языке)** – это текстовые метки, по которым можно найти статью при поиске и определить предметную область текста; обычно их выбирают из текста публикуемого материала, достаточно 5-10 ключевых слов.
- **список литературы**, на которую автор ссылается в тексте статьи; рекомендуемый объем списка литературы – не менее 20 источников.

В информации об авторах рекомендуется указывать ORCID, Scopus ID и SPIN-код, присвоенный в РИНЦ.

Редакция не взимает плату с авторов за подготовку, рецензирование и размещение в открытом доступе статей.

Право использования произведений предоставлено авторами на основании п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации.

С полной версией требований к оформлению научных статей
Вы можете ознакомиться на сайте <https://construction.elpub.ru/jour/index>

Адрес издателя:

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»
302026, Орловская область, г. Орел, ул. Комсомольская д. 95
+7 (4862) 75-13-18

www.oreluniver.ru
E-mail: info@oreluniver.ru

Адрес редакции

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»
302030, Орловская область, г. Орел, ул. Московская, 77.
+79065704999
<http://oreluniver.ru/science/journal/sir>
E-mail: str_and_rek@mail.ru

Материалы статей печатаются в авторской редакции.
Право использования произведений предоставлено авторами на основании
п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации

Технический редактор О.В. Юрова
Компьютерная верстка О.В. Юрова

Подписано в печать
Дата выхода в свет
Формат 70×108/16. Печ. л. 9,3
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.