

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

Заместители главного редактора:
Гордон В.А., советник РААСН, д-р техн. наук, проф. (Россия)
Коробко В.И., д-р техн. наук, проф. (Россия)
Савин С.Ю., канд. техн. наук, доц. (Россия)
Финадеева Е.А., канд. техн. наук, доц. (Россия)

Редакция:
Акимов П.А., акад. РААСН, д-р техн. наук, проф. (Россия)
Бакаева Н.В., советник РААСН, д-р техн. наук, проф. (Россия)
Бок Т., д-р техн. наук, проф. (Германия)
Булгаков А.Г., д-р техн. наук, проф. (Германия)
Данилевич Д.В., канд. техн. наук, доц. (Россия)
Ерофеев В.Т., акад. РААСН, д-р техн. наук, проф. (Россия)
Есаулов Г.В., акад. РААСН, д-р арх., проф. (Россия)
Карпенко Н.И., акад. РААСН, д-р техн. наук, проф. (Россия)
Колесникова Т.Н., д-р арх., проф. (Россия)
Колчунов В.И., д-р техн. наук, проф. (Россия)
Коробко А.В., д-р техн. наук, проф. (Россия)
Король Е.А., чл.-корр. РААСН, д-р техн. наук, проф. (Россия)
Кривошапко С.Н., д-р техн. наук, проф. (Россия)
Кудряшов Н.Н., канд. арх., проф. (Россия)
Лефай З., д-р техн. наук, проф. (Франция)
Мелькумов В.Н., д-р техн. наук, проф. (Россия)
Орлович Р.Б., д-р техн. наук, проф. (Польша)
Птичникова Г.А., д-р арх., проф. (Россия)
Ребож 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:
Амелина М.А., (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 объединенному каталогу «Пресса России»
на сайтах www.ppressa-ru.ru и www.akc.ru

© ОГУ имени И.С. Тургенева, 2024

Содержание

Теория инженерных сооружений. Строительные конструкции

- Надольский В.В.** Несовершенства для расчета стальных конструкций методом конечных элементов. Часть 2..... 3
- Трекин Н.Н., Горбачевский В.П.** Распределение усилий в точках строповки железобетонных модулей..... 12

Безопасность зданий и сооружений

- Дьяков И.М., Дьяков М.И.** Силовое взаимодействие отдельно стоящих фундаментов с основанием при быстром догрузении..... 21
- Колчунов В.И., Ильющенко Т.А., Федорова Н.В., Савин С.Ю., Тур В.В., Лизогуб А.А.** Живучесть конструктивных систем зданий и сооружений: аналитический обзор исследований..... 31
- Тамразян А.Г., Черник В.И.** Тепломассоперенос в железобетонных колоннах при огневом воздействии с учетом стадии охлаждения..... 72

Архитектура и градостроительство

- Воличенко О.В., Цурик Т.О.** Реновация объектов промышленной архитектуры на основе иммерсивного подхода..... 83
- Енин А. Е. , Грошева Т. И.** Разработка моделей ландшафтно-рекреационных пространств в условиях реконструкции центральной исторической части города..... 98

Строительные материалы и технологии

- Абдрахимов В.З., Абдрахимов Д.В.** Исследование влияния золошлаковой смеси на сушильные свойства керамического образца с использованием метода регрессионного анализа..... 113
- Родин А.И., Ермаков А.А., Кяшкин В.М., Астахов А.М., Буянкин Д.А.** Пористая стеклокерамика из опоки, кальцинированной соды и корректирующих добавок..... 123

Editor-in-Chief
Kolchunov V.I., doc. sc. tech., prof. (Russia)

Editor-in-Chief Assistants:
Gordon V.A., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Korobko V.I., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Savin S.Yu., candidate sc. tech., docent (Russia)
Finadeeva E.A., candidate sc. tech., docent (Russia)

Editorial Board
Akimov P.A., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Bakaeva N.V., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Bock T., doc. sc. tech., prof. (Germany)
Bulgakov A.G., doc. sc. tech., prof. (Germany)
Danilevich D.V., candidate sc. tech., docent (Russia)
Erofeev V.T., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Esaulov G.V., doc. arc., prof. (Russia)
Karpenko N.I., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Kolesnikova T.N., doc. arc., prof. (Russia)
Kolchunov V.I., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Korobko A.V., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Korol E.A., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Krivoshapko S.N., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Kudryashov N.N., candidate arc., prof. (Russia)
Lafhaj Z., doc. sc. tech., prof. (France)
Melkumov V.N., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Orlovic R.B., doc. sc. tech., prof. (Poland)
Ptichnikova G.A., doc. arc., prof. (Russia)
Rebolj D., doc. sc. tech., prof. (Slovenia)
Rimshin V.I., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Tamrazyan A.G., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Travush V.I., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Treshev 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:
Amelina M.A., (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 г.

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

© Orel State University, 2024

Contents

Theory of engineering structures. Building units

- Nadolski V.V.** Imperfections for the calculation of steel structures by the finite element method. Part 2..... 3
Trekin N.N., Gorbachevskii V.P. Investigation of force distribution at slinging nodes of reinforced concrete modules..... 12

Building and structure safety

- Diakov I.M., Diakov M.I.** Interaction of pillar foundations with the basement under dynamic loading..... 21
Kolchunov V.I., Ilyushchenko T.A., Fedorova N.V., Suvin S.Y., Tur V.V., Lizahub A.A. Structural robustness: an analytical review..... 31
Tamrazyan A.G., Chernik V.I. Heat and mass transfer in reinforced concrete columns under fire action with consideration of the cooling stage..... 72

Architecture and urban planning

- Volichenko O.V., Tsurik T.O.** Renovation of industrial architectural objects based on an immersive approach 83
Enin A.E., Grosheva T.I. Development of models of landscape and recreational spaces in the context of reconstruction of the central historical part of the city..... 98

Construction materials and technologies

- Abdrakhimov V.Z., Abdrakhimov D.V.** Study of influence of ash-slag mixture on drying properties of ceramic sample using regression analysis method..... 113
Rodin A.I., Ermakov A.A., Kyashkin V.M., Astashov A.M., Buyankin D.A. Porous glass ceramics from opoka, soda ash and corrective additives..... 123

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.

В.В. НАДОЛЬСКИЙ^{1,2}

¹УО «Брестский государственный технический университет», г. Брест, Республика Беларусь

²Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

НЕСОВЕРШЕНСТВА ДЛЯ РАСЧЕТА СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ. ЧАСТЬ 2.

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

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

V.V. NADOLSKI¹

¹Brest State Technical University, Brest, Republic of Belarus

¹Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

IMPERFECTIONS FOR THE CALCULATION OF STEEL STRUCTURES BY THE FINITE ELEMENT METHOD. PART 2.

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

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

Введение

Важность и необходимость изучения несовершенств стальных конструкций представлена в исследованиях [1 - 9]. Повышенную актуальность этот вопрос приобретает в связи с интенсивным применением компьютерного моделирования стальных элементов и узлов в повседневном проектировании. Доминирующее влияние на несущую способность оказывают геометрические несовершенства и остаточные напряжения, которые могут быть смоделированы как отдельные несовершенства или как эквивалентные несовершенства [8-11]. Эквивалентные несовершенства в большинстве случаев представляют в виде геометрического несовершенства с увеличенным значением амплитуды, поэтому также используется термин эквивалентное геометрическое несовершенство [12]. Определение амплитуды (значения) эквивалентного несовершенства имеет большое значение и в большинстве случаев может быть определено только на основании калибровки численных моделей по экспериментальным данным. Ниже представлены результаты наиболее значимых и последних исследований в этой области.

Целью данного исследования является аналитический обзор литературы и систематизация результатов исследований несовершенств применительно к расчету стальных конструкций посредством технологии компьютерного моделирования несущей способности, в том числе методом конечных элементов. Статья состоит из двух частей. Первая часть посвящена вопросам изучения геометрических несовершенств, остаточных напряжений и правилам комбинации несовершенств, вторая часть статьи – *эквивалентным несовершенствам сечений (стеки, полки, отсеки пластин, ограниченные ребрами жесткости), элементов и конструкций.*

Представлены результаты научных исследований несовершенств для расчета стальных конструкций методом конечных элементов на основании аналитического обзора и анализа научной и технической литературы с последующим синтезом и выработкой рекомендаций по заданию форм и значений эквивалентных несовершенств.

Эквивалентные несовершенства элементов

Значение эквивалентных несовершенств для элементов конструкции зависит от применяемого типа анализа и метода проверки несущей способности элемента. Различают принципиально два разных набора эквивалентных несовершенств элементов [13-15]:

- для определения эффектов второго порядка. Устойчивость элемента может быть проверена посредством анализа поперечного сечения по «прочности» с изгибающими моментами, вычисленными в соответствии с теорией второго порядка для стержня с начальным изгибным несовершенством. Данное несовершенство элементов называется несовершенством для геометрически нелинейного упругого (физически линейного) анализа или несовершенством для определения эффектов второго порядка (дополнительного изгибающего момента). В рамках данного способа проверка элемента по устойчивости сводится к проверке сечения по прочности.

- для прямой оценки несущей способности. Данные несовершенства применяют для геометрически нелинейного неупругого (физически нелинейного) анализа, на основании которого оценивают несущую способность.

Эквивалентные несовершенства элементов для определения эффектов второго порядка. Анализ значений эквивалентных несовершенств для определения эффектов второго порядка выполнен в работах [13, 14], результаты данного исследования положены в разработку второго поколения стандарта EN 1993-1-1. Значения несовершенств были откалиброваны по кривым потери устойчивости. Эти значения несовершенств обеспечивают точное решение, если геометрически нелинейный упругий анализ выполняется посредством численной модели,

а несущая способность при потере устойчивости определяется дополнительными проверками сечения.

Согласно исследованию [13] значение эквивалентных изгибных несовершенств предлагается определять по выражению:

$$e_{0,E} = \alpha (\lambda - 0.2) M_{Rk} / N_{Rk} , \quad (1)$$

где, $e_{0,E}$ – значение эквивалентного несовершенства элемента для определения эффектов второго порядка; α – коэффициент несовершенства для соответствующей кривой потери устойчивости; λ – гибкость элемента; M_{Rk} – характеристическое значение несущей способности для изгибающего момента; N_{Rk} – характеристическое значение несущей способности для продольной силы.

Выражение было получено на основе линейного критерия взаимодействия осевой силы (N) и изгибающего момента второго порядка $M = M_0 + N \cdot e_0 \{1/(1-N/N_{cr})\}$ [13]:

$$N / N_{Rk} + M / M_{Rk} = 1 , \quad (2)$$

при этом, если используется проверка в предположении упругой работы сечения, то $N_{Rk} = N_{pl}$ (N_{pl} – несущая способность сечения для осевой силы, равная $A \cdot f_y$, где A – площадь сечения, f_y – предел текучести), и $M_{Rk} = M_{el}$ (M_{el} – несущая способность сечения для изгибающего момента в упругой стадии, равная $W_{el} \cdot f_y$, где W_{el} – упругий момент сопротивления сечения). Аналогично, если используется проверка сечения в предположении развития пластических деформаций, то $N_{Rk} = N_{pl}$ и $M_{Rk} = M_{pl}$ (M_{pl} – несущая способность сечения для изгибающего момента в пластической стадии, равная $W_{pl} \cdot f_y$, где W_{pl} – пластический момент сопротивления сечения).

Несовершенство, рассчитанное в предположении пластической работы сечения, больше, чем рассчитанное в предположении упругой работы сечения, для того чтобы компенсировать потерю жесткости из-за развития пластических деформаций, которые не учитываются в упругом (физически линейном) анализе. Следует обратить внимание, что применение нелинейного критерия взаимодействия осевой силы и изгибающего момента совместно с несовершенствами, полученными на основании уравнений (1) и (2), даст неверные решения, так как уравнение было выведено на основе линейного критерия взаимодействия осевой силы и изгибающего момента.

В развитие вышеотмеченного подхода исследователи [14] обосновали табличные значения эквивалентных несовершенств элементов для определения эффектов второго порядка, которые зависят только от типа сечения, оси потери устойчивости и стадии работы сечения. Эти несовершенства предназначены для аппроксимации точного решения [13], оставаясь при этом безопасными и снижая сложность расчета за счет отсутствия зависимости от гибкости и, следовательно, эффективной длины потери устойчивости, которую на практике бывает трудно определить. Табличные значения определяются с помощью следующего выражения:

$$e_{0,E} = \alpha \cdot L \cdot \beta_E / \varepsilon , \quad (3)$$

где, L – длина элемента; α – коэффициент несовершенства для соответствующей кривой потери устойчивости, учитывающий влияние остаточных напряжений для соответствующего типа сечения; ε – параметр, учитывающий прочность материала (равный $\sqrt{235/f_y}$); β_E – относительное изгибное несовершенство, которое зависит от оси потери устойчивости и стадии работы сечения (упругая или пластическая), см. таблицу 1.

Таблица 1 – Значения относительного изгибного несовершенства β_E [14]

Ось, относительно которой рассматривается потеря устойчивости	Упругая проверка поперечного сечения	Пластическая проверка поперечного сечения
y	1/110	1/75
z	1/200	1/68

Подводя итог, стоит отметить, что эквивалентные несовершенства, полученные в работах [13, 14], основаны на линейном критерии взаимодействия осевой силы и изгибающего момента. Однако применение этих несовершенств для определения усилий с помощью упругого анализа второго порядка и последующая проверка прочности сечения дает тот же результат, что и проверка устойчивости на основе усилий из упругого линейного расчета и кривых потери устойчивости, если используются вычисленные значения несовершенств, или близкий, но безопасный, если используются табличные значения несовершенств.

Эквивалентные несовершенства элементов для прямой оценки несущей способности сжатых элементов. Результаты работы [15] доказывают, что эквивалентные несовершенства, полученные на основе упругого анализа второго порядка, не подходят для использования при проектировании с помощью неупругого анализа второго порядка (геометрически и физически нелинейных расчетов). Для расчета требуемых эквивалентных несовершенств авторами работы [15] была выполнена подгонка (калибровка), значений эквивалентного несовершенства до тех пор, пока предельная (пиковая) нагрузка не совпадала с целевой (эталонной) нагрузкой. Целевая предельная нагрузка была определена на основании конечно-элементных моделей, разработанных с геометрическими несовершенствами в виде полусинусоиды с амплитудой $L/1000$ и остаточными напряжениями. Авторы установили, что требуемое значение эквивалентного несовершенства зависит от гибкости элемента. Однако, чтобы устранить сложность вычисления эффективной длины элемента, значения эквивалентных несовершенств были обобщены с определенным уровнем консерватизма. На основании результатов численного параметрического исследования эквивалентные несовершенства элементов для геометрически и физически нелинейного анализа определяются следующим выражением:

$$e_{0,R} = \alpha L \beta_{R,N}, \quad (4)$$

где, $e_{0,R}$ – значение эквивалентного несовершенства элемента для прямой оценки несущей способности; $\beta_{R,N}$ – относительное изгибное несовершенство для прямой оценки несущей способности сжатых элементов.

Исходя из полученных численных результатов [15] предлагается принять $\beta_{R,N} = 1/150$ для использования при проектировании для всех рассмотренных материалов и сечений. Более подробную информацию о результатах исследования можно найти в [15].

Эквивалентные несовершенства элементов для прямой оценки несущей способности изгибаемых элементов. Исследования несовершенств (начального искривления оси балки в плоскости наименьшей жесткости) для прямой оценки несущей способности изгибаемых элементов (при потере устойчивости изгибаемого элемента) были выполнены в работе [16]. В результате численного параметрического исследования предлагается определять несовершенство согласно выражению (4) с заменой α на α_z (кривая потери устойчивости относительно оси z) и эталонного значения относительного несовершенства $\beta_{R,M} = 1/150$ для форм несовершенств, определенных на основании упругого анализа потери устойчивости (бифуркационного анализа). Данное несовершенство было подтверждено для различных эпюр изгибающего момента, для горячекатаной и нержавеющей стали, и для всех значений

гибкостей элементов и сечений, если в качестве формы несовершенства применяется первая форма потери устойчивости. Для всех случаев выбрано одно значение $\beta_{R,M}$, не зависящее от гибкости элемента, чтобы сохранить простоту. Поэтому для некоторых случаев допускается определенный уровень консерватизма.

В качестве альтернативной рекомендации авторы работы [16] предлагают назначать форму эквивалентного изгибного несовершенства на основе predetermined функций. Однако, чтобы охватить диапазон возможных диаграмм изгибающего момента, предлагается комбинирование двух форм несовершенств: одной – в виде полусинусоиды, которая советует деформированной форме элементов при равномерном изгибе, и второй – в виде полной синусоиды, соответствующей форме деформации элементов при антисимметричном изгибе (на концах элемента приложены моменты с противоположными знаками). Амплитуда несовершенства полной синусоиды принимается равной $1/215$, что приблизительно равно 70% от амплитуды несовершенства полусинусоиды. Следовательно, эквивалентное несовершенство определяется как сумма полусинусоидальной волны с амплитудой $\alpha_z L / 150$ и полной синусоидальной волны с амплитудой $\alpha_z L / 215$, при этом несовершенство задается как искривление оси балки в плоскости наименьшей жесткости.

Эквивалентные несовершенства для частей поперечного сечения

Анализ чувствительности несущей способности, вычисленной посредством конечно-элементных моделей, при разных значениях несовершенств стенки и сравнение с экспериментальными данными [17] показали, что для стенок балочных элементов эквивалентные несовершенства необходимо задавать в диапазоне $b/200 \dots b/100$, где b – расчетный размер отсека. Статистический анализ показал, что задание несовершенств в предложенном диапазоне, обеспечивает хорошее совпадение экспериментальных и компьютерных результатов. Значение $b/100$ приводит к небольшому консерватизму в оценивании несущей способности. Результаты исследования [18] показали, что применение эквивалентного несовершенства $b/200$ обеспечивает значение несущей способности близкое к значениям, полученным на основе формульных моделей несущей способности (кривых потери устойчивости, приведенных в стандарте EN 1993-1-5), независимо от предела текучести и гибкости пластин.

Эквивалентные несовершенства для продольных ребер жесткости. В работе [19] провели численные исследования влияния несовершенств на продольно подкрепленные пластины (панели) и сравнили соответствующие численные результаты с аналитическими кривыми потери устойчивости для подкрепленных пластин. Для всех анализируемых геометрий панелей выполнялись два расчета: (i) с геометрическими несовершенствами и остаточными напряжениями и (ii) с эквивалентными несовершенствами. В численной модели прикладывали как глобальные (на всей панели, включая продольные ребра жесткости), так и локальные (на подпанелях между ребрами жесткости) геометрические несовершенства. Форма несовершенств была синусоидальной в пределах исследуемой панели в обоих направлениях. Исследованы два различных значения амплитуды несовершенства:

- глобальное геометрическое несовершенство продольных ребер жесткости из плоскости панели с амплитудой равной $a/1000$ (прикладывается вместе с остаточными напряжениями) или $a/400$ (применяется как эквивалентное несовершенство), где a – длина ребра жесткости;

- локальное геометрическое несовершенство подпанели между продольными ребрами жесткости с амплитудой, равной $b/500$ (прикладывается вместе с $a/1000$ и остаточными напряжениями) или $b/200$ (прикладываемой вместе с $a/400$ эквивалентными несовершенствами), где b – ширина подпанели.

В тех случаях, когда остаточные напряжения моделировались напрямую, максимальное растягивающее остаточное напряжение принималось равным пределу текучести в зоне шва, а

максимальное сжимающее остаточное напряжение, равное 25% от предела текучести между сварными зонами, как схематично представлено на рисунке 1.

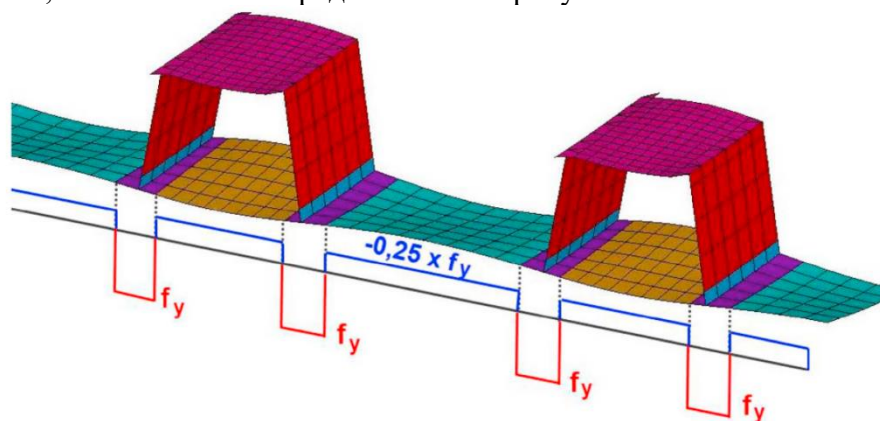


Рисунок 1 – Эюры остаточных напряжений согласно [19]

Каждый расчет выполнялся дважды, при этом глобальные несовершенства имели положительный и отрицательный знаки, а затем минимальное значение из двух расчетов принималось как предельное значение несущей способности. Полученные значения несущей способности сравнивались между двумя моделями с использованием геометрических несовершенств плюс остаточные напряжения и только с эквивалентным несовершенством. Результаты расчетов показали, что применение глобальных геометрических несовершенств (с амплитудой $a/1000$) с сопутствующими остаточными напряжениями приводит к близким значениям несущей способности, полученным с эквивалентным несовершенством с амплитудой $a/400$ без остаточных напряжений. В зависимости от того, какой набор геометрических параметров рассматривается, разница между этими двумя вариантами составляла $\pm 1...2\%$.

Таким образом, полученные результаты подтверждают общепризнанный принцип [3, 6, 7], что следует прикладывать либо геометрическое несовершенство с реалистичной амплитудой (значением) (в данном случае, например, $a/1000$) вместе с реалистичными остаточными напряжениями, либо эквивалентное несовершенство (в данном случае, например, $a/400$) без остаточных напряжений.

Эквивалентные несовершенства для строительной конструкции

В большинстве исследований эквивалентные несовершенства для конструкций приняты согласно EN 1993-1-1 [20-22]. Это несовершенство разработано и рекомендовано для проектирования стальных рам, чувствительных к потере устойчивости, сопровождающейся поперечным отклонением. Оно отражает влияние остаточных напряжений и геометрических несовершенств, таких как отсутствие вертикальности, отсутствие прямолинейности и случайные эксцентриситеты, присутствующих в соединениях ненагруженной конструкции.

Выводы

На основании выполненного исследования в области применения несовершенств стальных конструкций для прямой оценки несущей способности посредством численных методов можно сделать следующие выводы:

– Эквивалентные несовершенства элементов для проверки устойчивости сжатого или изгибаемого элемента могут быть приняты с амплитудой $\alpha L / 150$ и с формой несовершенства, назначенной на основании упругого анализа потери устойчивости (бифуркационного анализа). В качестве альтернативной рекомендации задание формы эквивалентного несовершенства для изгибаемого элемента можно осуществлять на основе предопределенных

функций. Однако, чтобы охватить диапазон возможных диаграмм изгибающего момента, необходимо комбинирование двух форм несовершенств: одной – в виде полусинусоиды с амплитудой $\alpha_z L / 150$, и второй – в виде полной синусоиды с амплитудой $\alpha_z L / 215$;

– для стенок балочных элементов эквивалентные несовершенства необходимо задавать в диапазоне $b/200 \dots b/100$;

– для пластинчатых конструкций с ребрами жесткости возможны два альтернативных способа значения несовершенства. Первый – глобальное геометрическое несовершенство продольных ребер жесткости из плоскости панели с амплитудой, равной $a/1000$, плюс локальное геометрическое несовершенство подпанели между продольными ребрами жесткости с амплитудой, равной $b/500$, плюс остаточные напряжения. Второй – несовершенство продольных ребер жесткости из плоскости панели с амплитудой, равной $a/400$, (применяется как эквивалентное несовершенство), плюс несовершенство подпанели между продольными ребрами жесткости с амплитудой, равной $b/200$ (применяется как эквивалентное несовершенство).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Graciano C., Ayestarán A. Steel plate girder webs under combined patch loading, bending and shear // Journal of Constructional Steel Research. 2013. Vol. 80. P. 202–212. DOI: 10.1016/j.jcsr.2012.09.018.
2. Kövesdi B., Alcaine J., Dunai L., Braun B. Interaction behaviour of steel I-girders Part I: Longitudinally unstiffened girders // Journal of Constructional Steel Research. 2014. Vol. 103. P. 327–343. DOI: 10.1016/j.jcsr.2014.06.018.
3. Kövesdi B., Alcaine J., Dunai L., Braun B. Interaction behaviour of steel I-girders; part II: Longitudinally stiffened girders // Journal of Constructional Steel Research. 2014. Vol. 103. P. 344–353. DOI: 10.1016/j.jcsr.2014.06.017.
4. Nadolski V., Marková J., Podymako V., Sykora M. Pilot numerical analysis of resistance of steel beams under combined shear and patch loading // Proceedings of conference Modelling in Mechanics 2022, Ostrava, 26-27 May 2022. Ostrava: VSB – Technical University of Ostrava, Faculty of Civil Engineering, Fakulta stavební, 2021, p. 21-29.
5. Kovacevic S., Markovic N., Sumarac D., Salatic R. Influence of patch load length on plate girders. Part II: Numerical research // Journal of Constructional Steel Research. 2019. Vol. 158. P. 213–229. DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.03.025.
6. Sinur F., Beg D. Moment–shear interaction of stiffened plate girders—Tests and numerical model verification // Journal of Constructional Steel Research. 2013. Vol. 85. P. 116–129. DOI: 10.1016/j.jcsr.2013.03.007.
7. Надольский В.В. Параметры численных моделей несущей способности для стальных элементов // Строительство и реконструкция. 2023. № 1(1). С. 43-56. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-105-1-43-56.
8. Надольский В. В., Вихляев А.И. Оценка несущей способности балок с гофрированной стенкой методом конечных элементов при действии локальной нагрузки // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 6. С. 693–706. DOI: 10.22227/1997-0935.202.
9. Надольский В. В., Подымако В.И. Оценка несущей способности стальной балки методом конечных элементов при совместном действии локальных и сдвиговых усилий // Строительство и реконструкция. 2022. №2 (100). С.26-43.
10. Fieber A., Gardner L., Macorini L. Design of structural steel members by advanced inelastic analysis with strain limits // Engineering Structures. 2019. Vol. 199. Paper 109624. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109624.
11. Gardner L., Yun X., Fieber A., Macorini L. Steel design by advanced analysis: material modelling and strain limits // Engineering. 2019. Vol. 5. P. 243–249. DOI: 10.1016/j.eng.2018.11.026.
12. Chacon R., Serrat M., Real E. The influence of structural imperfections on the resistance of plate girders to patch loading // Thin-Walled Struct. 2012. Vol. 53. P. 15–25. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2011.12.003>.
13. Lindner J., Kuhlmann U., Just A. Verification of flexural buckling according to EN 1993-1-1 using bow imperfections // Steel Construction. 2016. Vol. 9. P. 349-362. DOI:10.1002/stco.201600004.
14. Lindner J., Kuhlmann U., Jörg F. Initial bow imperfections e_0 for the verification of flexural buckling according to Eurocode 3 Part 1-1 – additional considerations // Steel Construction. 2018. Vol. 11. P. 30-41. DOI: 10.1002/stco.20170.
15. Walport F., Gardner L., Nethercot D.A. Equivalent bow imperfections for use in design by second order inelastic analysis // Structures. 2020. Vol. 26. P. 670–685. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.03.065.

16. Quan Ch., Walport F., Gardner L. Equivalent imperfections for the out-of-plane stability design of steel beams by second-order inelastic analysis // *Engineering Structures*. – 2021. Vol. 251. Paper 113481. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.113481.
17. Надольский В.В. Статистические характеристики погрешности численных моделей несущей способности для стальных элементов // *Строительство и реконструкция*. 2023. №3 (107). С.17-34. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-107-3-17-34.
18. Radwan M., Kövesdi B. Local plate buckling type imperfections for NSS and HSS welded box-section columns // *Structures*. 2021. Vol. 34. P. 2628-2643. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.09.011.
19. Haffar Z.M., Kövesdi B., Ádány S. On the buckling of longitudinally stiffened plates, part 2: Eurocode-based design for plate-like behaviour of plates with closed-section stiffeners // *Thin-Walled Structures*. 2019. Vol. 145. Paper 106395. DOI: 10.1016/j.tws.2019.106395.
20. Kala Z. Geometrically non-linear finite element reliability analysis of steel plane frames with initial imperfections // *Journal of Civil Engineering and Management*. 2012. Vol. 18. P. 81–90. DOI: 10.3846/13923730.2012.655306.
21. Yang H., Liu S., Fang Z., Zhao J. Investigation of intermediate-height horizontal brace forces under horizontal and vertical loads including random initial imperfections // *Buildings*. 2023. Vol. 13. Paper 180. DOI: 10.3390.
22. Zhang H., Shayan S., Rasmussen K.J.R., Ellingwood B.R. System-based design of planar steel frames, I: Reliability framework // *Journal of Constructional Steel Research*. 2016. Vol. 123. P. 135-143. DOI: 10.1016/j.jcsr.2016.05.004.

REFERENCES

1. Graciano C., Ayestarán A. Steel plate girder webs under combined patch loading, bending and shear. *Journal of Constructional Steel Research*. 2013. Vol. 80. P. 202–212. DOI: 10.1016/j.jcsr.2012.09.018.
2. Kövesdi B., Alcaine J., Dunai L., Braun B. Interaction behaviour of steel I-girders Part I: Longitudinally unstiffened girders. *Journal of Constructional Steel Research*. 2014. Vol. 103. P. 327–343. DOI: 10.1016/j.jcsr.2014.06.018.
3. Kövesdi B., Alcaine J., Dunai L., Braun B. Interaction behaviour of steel I-girders; part II: Longitudinally stiffened girders. *Journal of Constructional Steel Research*. 2014. Vol. 103. P. 344–353. DOI: 10.1016/j.jcsr.2014.06.017.
4. Nadolski V., Marková J., Podymako V., Sykora M. Pilot numerical analysis of resistance of steel beams under combined shear and patch loading. *Proceedings of conference Modelling in Mechanics 2022*, Ostrava, 26-27 May 2022. Technical University of Ostrava, Faculty of Civil Engineering, Fakulta stavební. 2021, p. 21-29.
5. Kovacevic S., Markovic N., Sumarac D., Salatic R. Influence of patch load length on plate girders. Part II: Numerical research. *Journal of Constructional Steel Research*. 2019. Vol. 158. P. 213–229. DOI: 10.1016/j.jcsr.2019.03.025.
6. Sinur F., Beg D. Moment–shear interaction of stiffened plate girders—Tests and numerical model verification. *Journal of Constructional Steel Research*. 2013. Vol. 85. P. 116–129. DOI: 10.1016/j.jcsr.2013.03.007.
7. Nadol'skij V.V. Parametry chislennyh modelej nesushchej sposobnosti dlya stal'nyh elementov [Parameters of numerical models of bearing capacity for steel elements] *Stroitel'stvo i rekonstrukciya*. 2023. № 1(1). S. 43-56. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-105-1-43-56. (rus)
8. Nadol'skij V.V., Vihlyayev A.I. Ocenka nesushchej sposobnosti balok s gof-rirovannoj stenкой metodom konechnykh elementov pri dejstvii lokal'noj nagruzki [Assessment of the bearing capacity of beams with a corrugated wall by the finite element method under local load] *Vestnik MGSU*. 2022. T. 17. Vyp. 6. S. 693–706. DOI: 10.22227/1997-0935.202. (rus)
9. Nadol'skij V.V., Podymako V.I. Ocenka nesushchej sposobnosti stal'noj balki metodom konechnykh elementov pri sovmestnom dejstvii lokal'nyh i sdvigovykh usilij [Assessment of the bearing capacity of a steel beam by the finite element method under the combined action of local and shear forces] *Stroitel'stvo i rekonstrukciya*. 2022. №2 (100). S.26-43. (rus)
10. Fieber A., Gardner L., Macorini L. Design of structural steel members by advanced inelastic analysis with strain limits. *Engineering Structures*. 2019. Vol. 199. Paper 109624. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109624.
11. Gardner L., Yun X., Fieber A., Macorini L. Steel design by advanced analysis: material modelling and strain limits. *Engineering*. 2019. Vol. 5. P. 243–249. DOI: 10.1016/j.eng.2018.11.026.
12. Chacon R., Serrat M., Real E. The influence of structural imperfections on the resistance of plate girders to patch loading. *Thin-Walled Struct.* 2012. Vol. 53. P. 15–25. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tws.2011.12.003.
13. Lindner J., Kuhlmann U., Just A. Verification of flexural buckling according to EN 1993-1-1 using bow imperfections. *Steel Construction*. 2016. Vol. 9. P. 349-362. DOI:10.1002/stco.201600004.

14. Lindner J., Kuhlmann U., Jörg F. Initial bow imperfections e_0 for the verification of flexural buckling according to Eurocode 3 Part 1–1 – additional considerations . Steel Construction. 2018. Vol. 11. P. 30–41. DOI: 10.1002/stco.20170.
15. Walport F., Gardner L., Nethercot D.A. Equivalent bow imperfections for use in design by second order inelastic analysis . Structures. 2020. Vol. 26. P. 670–685. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.03.065.
16. Quan Ch., Walport F., Gardner L. Equivalent imperfections for the out-of-plane stability design of steel beams by second-order inelastic analysis . Engineering Structures. – 2021. Vol. 251. Paper 113481. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.113481.
17. Nadol'skij V.V. Statisticheskie harakteristiki pogreshnosti chislennyh modelej nesushchej sposobnosti dlya stal'nyh elementov [Statistical characteristics of the error of numerical models of bearing capacity for steel elements] Stroitel'stvo I rekonstrukciya. 2023. №3 (107). С.17–34. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-107-3-17-34. (rus).
18. Radwan M., Kövesdi B. Local plate buckling type imperfections for NSS and HSS welded box-section columns . Structures. 2021. Vol. 34. P. 2628–2643. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.09.011.
19. Haffar Z.M., Kövesdi B., Ádány S. On the buckling of longitudinally stiffened plates, part 2: Eurocode-based design for plate-like behaviour of plates with closed-section stiffeners . Thin-Walled Structures. 2019. Vol. 145. Paper 106395. DOI: 10.1016/j.tws.2019.106395.
20. Kala Z. Geometrically non-linear finite element reliability analysis of steel plane frames with initial imperfections . Journal of Civil Engineering and Management. 2012. Vol. 18. P. 81–90. DOI: 10.3846/13923730.2012.655306.
21. Yang H., Liu S., Fang Z., Zhao J. Investigation of intermediate-height horizontal brace forces under horizontal and vertical loads including random initial imperfections . Buildings. 2023. Vol. 13. Paper 180. DOI: 10.3390.
22. Zhang H., Shayan S., Rasmussen K.J.R., Ellingwood B.R. System-based design of planar steel frames, I: Reliability framework . Journal of Constructional Steel Research. 2016. Vol. 123. P. 135–143. DOI: 10.1016/j.jcsr.2016.05.004.

Информация об авторе:

Надольский Виталий Валерьевич

УО «Брестский государственный технический университет» (БрГТУ), г. Брест, Республика Беларусь, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технологии строительного производства».

И доцент кафедры «Строительных конструкций», Белорусский национальный технический университет (БНТУ), г. Минск, Республика Беларусь

E-mail: nadolskivv@mail.ru

Information about author:

Nadolski Vitali V.

Brest State Technical University, Brest, Belarus,

candidate of technical science (PhD), docent, associated professor of the department of Building constructions, and Associate Professor of the Department of Building Structures, Belarusian National Technical University (BNTU), Minsk, Republic of Belarus

E-mail: nadolskivv@mail.ru

Н.Н. ТРЕКИН¹, В.П. ГОРБАЧЕВСКИЙ²^{1,2}ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
Москва, Россия

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ В ТОЧКАХ СТРОПОВКИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ МОДУЛЕЙ

Аннотация. Объектом исследования являются железобетонные модули, применяемые для высокоскоростного строительства мало-, средне- и многоэтажных зданий и сооружений различного назначения. Предметом исследования являются усилия в точках строповки железобетонных модулей. Для анализа характера распределения усилий взята выборка с распределением усилий пятиста модулей, реализованных по запатентованной технологии Группы компаний «МонАрх». Анализ выборки осуществлялся методом Брандона. Аналитическое определение усилий в точках строповки выбранного модуля осуществлялось приближенным методом – по грузовым площадям. Характер фактического распределения усилий обусловлен полученной в результате регулировки строповщиком длины строп, а также разницей отпускной и проектной прочности бетона несущих конструкций модулей. По результатам расчета получено, что наиболее нагруженными являются угловые точки строповки. Правильно подобранная и подогнанная длина строп позволяет более равномерно распределять усилия по конструкции и избежать перенапряжения отдельных конструктивных элементов модуля.

Ключевые слова: модульное строительство, объемные блоки, железобетонные модули, крупномодульное домостроение, крупногабаритные железобетонные модули.

N.N. TREKIN¹, V.P. GORBACHEVSKII²^{1,2} National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MSUCE), Moscow, Russia

INVESTIGATION OF FORCE DISTRIBUTION AT SLINGING NODES OF REINFORCES CONCRETE MODULES

Abstract. The object of the study is reinforced concrete modules used for high-speed construction of low-, medium- and multi-storey buildings and structures for various purposes. The subject of the study is the forces in the nodes of slinging of reinforced concrete modules. A sample with the distribution of forces of five hundred modules is taken to analyze the nature of force distribution, It's sample is realized according to the patented technology of Group of companies "MonArch". The sample was analyzed by the Brandon's method. Analytical determination of forces in slinging nodes of the selected module was carried out by approximate method – by cargo areas. The character of the actual distribution of forces is conditioned by the sling length obtained as a result of the slinger's adjustment, as well as by the difference between the tempering and design strength of concrete of the module load-bearing structures. According to the results of the calculation it was obtained that the most loaded are the corner nodes of slinging. Properly selected and adjusted length of slings allows to distribute forces more evenly over the structure and avoid overstressing of individual structural elements of the module.

Keywords: modular construction, volumetric blocks, reinforced concrete modules, large modular house building, large-size reinforced concrete modules.

Введение

Одними из наиболее важных нагрузок и воздействий, имеющих место в начале жизненного цикла железобетонного изделия, являются нагрузки, возникающие в стадии изготовления, а также в период монтажа.[1] Указанные виды нагрузок вызывают напряжённое состояние, нехарактерное на последующей стадии жизненного цикла изделия – эксплуатационной. Краткий обзор исследований в области объемно-блочного домостроения представлен в [2-4]. Традиционно в строительстве строповка железобетонных изделий (стеновые панели, плиты перекрытия и т.д.) как в ходе их внутризаводской перестановки, так и в ходе монтажа в проектное положение на объекте застройки, осуществляется преимущественно за 4 и менее точки. Транспортирование и монтаж объёмных модулей становится более сложным и рискованным. Несмотря на свою значимость, проблема, связанная с подъёмом тяжёлых модулей, получила относительно мало внимания в исследованиях, посвящённых железобетонным объёмным блокам и модулям заводского изготовления [5-10]. Для активно развивающегося в России крупномодульного домостроения характерно применение средне- и крупногабаритных железобетонных модулей, масса которых может достигать порядка 80 тонн. Принципиальные конструктивные решения таких модулей частично описаны в работе [11]. При этом, возникает необходимость строповки за 4, 6 и 8 точек (рис. 1) в зависимости от весогабаритных характеристик модулей и предельно допустимой нагрузки на одну точку строповки.

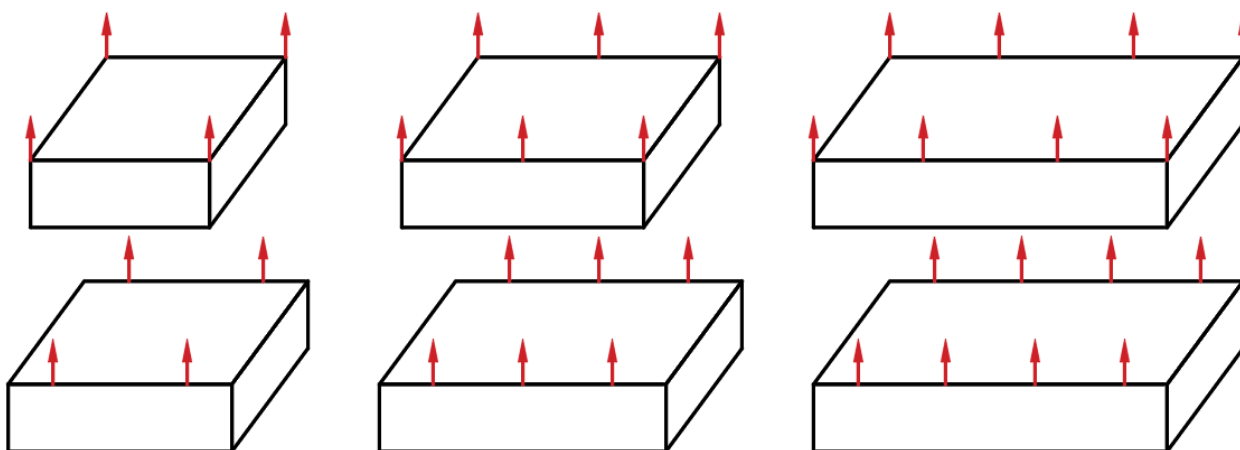


Рисунок 1 – Варианты строповки железобетонных модулей (модуль показан условно): слева – для мало- и среднегабаритных модулей, по центру и справа – для средне- и крупногабаритных модулей

ГК «МонАрх» реализует масштабный проект Технополиса модульного домостроения в Новой Москве. В настоящее время функционирует Экспериментальный завод, построенный для апробации новых технологий модульного домостроения ГК «МонАрх» по выпуску готовой продукции в виде модулей среднегабаритных (до 50 кв.м. по площади) и крупногабаритных (от 50 до 120 кв.м. по площади) размеров.

В заводских условиях модули поднимаются и транспортируются, переставляются порталным транспортером (рис. 2), в условиях стройплощадки модули поднимаются и монтируются стропами, либо траверсой (рис. 3,4) с грузозахватным устройством, разработанным специалистами Группы компаний «МонАрх» [12]. Варианты монтажа описаны в [13,14].

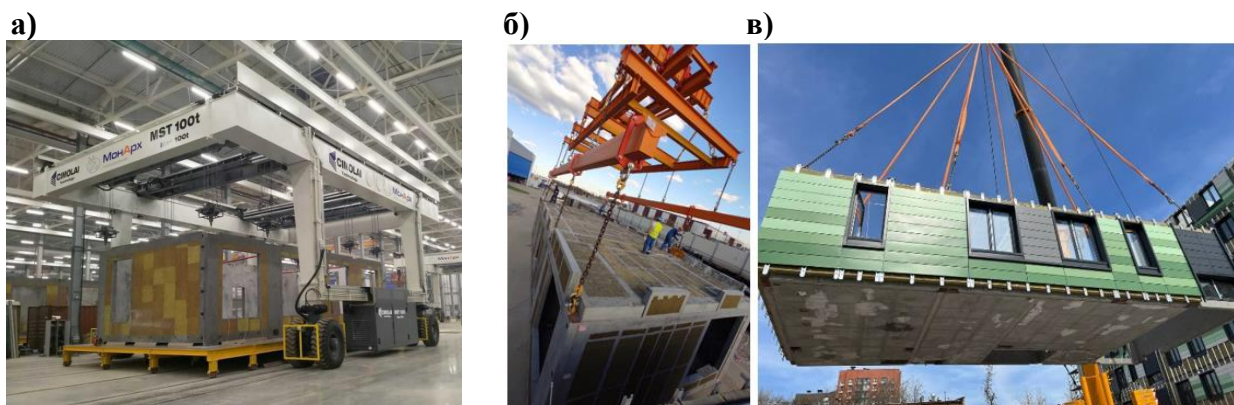


Рисунок 2 – Портальный транспортер (а); подъем модулей с помощью траверсы (б) и стропами (в)

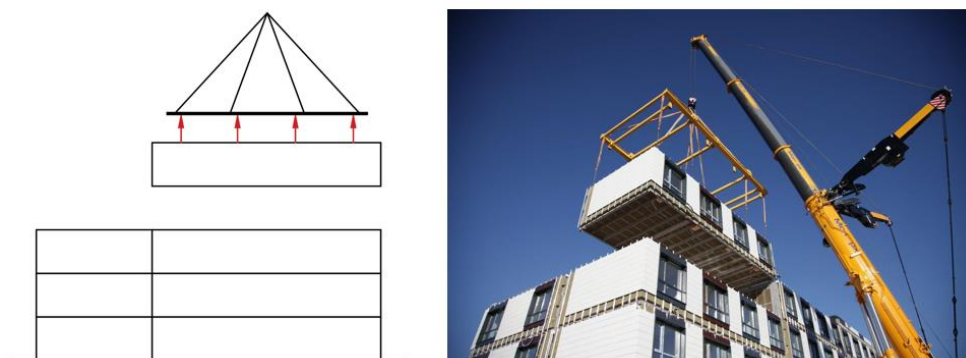


Рисунок 3 – Схема установки модуля в проектное положение (стрелками показаны точки строповки модуля)

В средне- и крупногабаритных модулях нагрузка на строповочные элементы может в разы превышать нагрузку, возникающую при строповке сборных железобетонных изделий, традиционно применяемых в строительстве. Поэтому одним из важных направлений исследований в области модульного домостроения является исследование и анализ напряжённого состояния модулей при изготовлении и монтаже, в частности исследование распределения усилий в точках строповки модулей.

Схема крупногабаритного модуля, а также расположение грузозахватного устройства в системе модуля представлено на рис. 3. Варианты применения грузозахватного устройства [12] представлены на рис. 4.

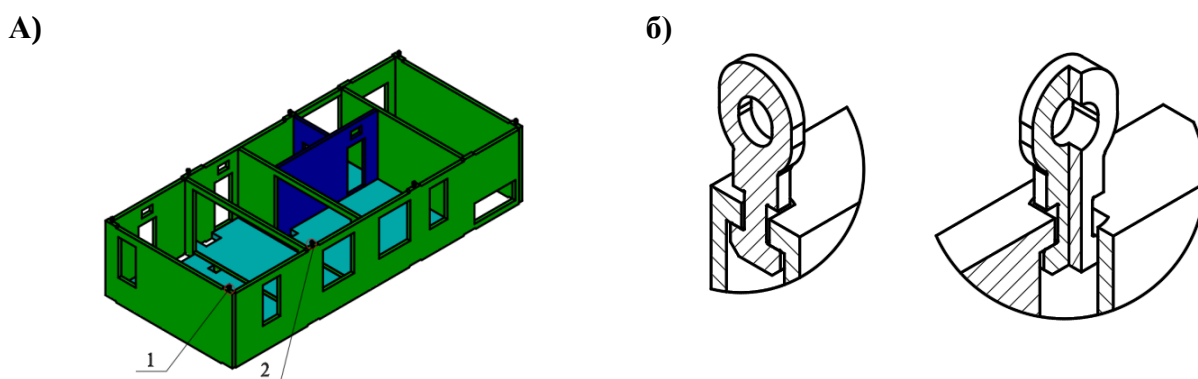


Рисунок 4 –Схема крупногабаритного модуля с грузозахватными устройствами: 1 – угловая точка строповки, 2 – «центральная» точка строповки(а); варианты применения грузозахватного устройства (б)

Модели и методы

Для анализа характера распределения усилий взята выборка с распределением усилий пятиста модулей, реализованных по запатентованной технологии ГК «МонАрх» [15]. Анализ выборки осуществлялся методом Брандона. Аналитическое определение усилий в точках строповки выбранного модуля осуществлялось приближенным методом – по грузовым площадям.

Одним из объектов исследования выбран крупногабаритный модуль реального объекта строительства в г. Москве. С целью проведения дальнейшего сравнительного анализа усилий создана расчетная модель в виде пространственной объемной конструкции – модуля (рис.5). Исходными данными для численного расчета усилий послужили геометрические параметры элементов модуля, а также физико-механические характеристики материалов модуля (бетона, арматуры и стали).

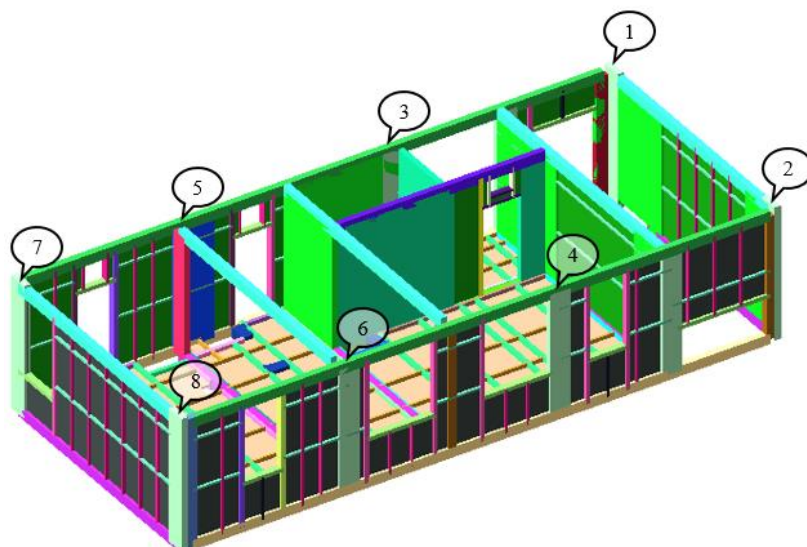


Рисунок 5 – Пространственная модель крупногабаритного модуля:
1...8 – номера точек строповки

Результаты исследования и их анализ

Результаты обработки статистических данных о распределении усилий в точках подъема модулей и основных параметров и весовых характеристиках модулей представлены в табл. 1. Фактическая масса модуля зависит от удельного веса изделий модуля, на который влияет конструктивное решение изделий и фактический процент армирования.

Таблица 1 – Распределение усилий в точках подъема и основные параметры и весовые характеристики модулей

Наименование параметра/характеристики	среднегабаритный модуль	крупногабаритный модуль
мин... макс. Габариты, м:		
длина	6595...15500	7840...15800
ширина	2260...6630	3290...6900
высота	550...3850	550...3850
мин...макс. Площадь по ГНС (габаритам наружных стен), м ² , при кол-ве точек строповки 6 (8)	26 (28)...49 (47)	51 (51)...101 (103)
мин...макс. Усилия в угловых точках строповки, т, при кол-ве точек строповки 6 (8)	0,7 (1,3)...10,8 (9,1)	0,9 (0,9)...11,8 (11,7)

Наименование параметра/характеристики	среднегабаритный модуль	крупногабаритный модуль
мин...макс. усилия в центральных точках строповки, т при кол-ве точек строповки 6 (8)	2 (0,5)...12,3 (6,2)	0,9 (1,7)...11,7 (11,8)
мин...макс. масса модуля, т (типы модулей: кровельный, типового этажа, подвальный)	10,5...52,7	24,9...77,8

Распределение усилий в угловых и центральных точка строповки при 6-ти точках строповки представлено на рис. 6 и 7, при 8-ми точках – на рис. 8 и 9 соответственно. Частота нормального распределения масштабирована в 1000 раз. Совокупность является достаточно однородной.

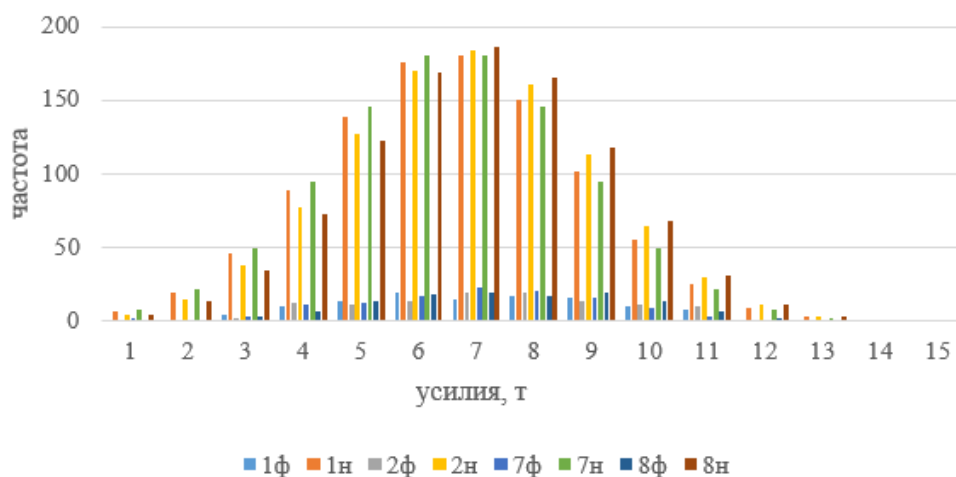


Рисунок 6 – Распределение усилий в угловых точках строповки при 6-ти точках:
индекс ф – фактическое распределение, индекс н – нормальное распределение; 1...8 – номера угловых точек строповки

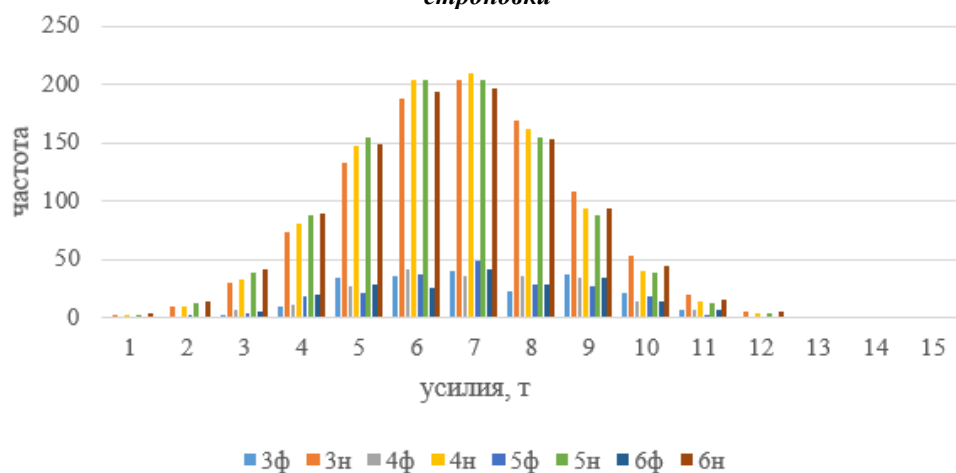


Рисунок 7 – Распределение усилий в центральных точках строповки при 6-ти точках:
индекс ф – фактическое распределение, индекс н – нормальное распределение; 3...6 – номера центральных точек строповки

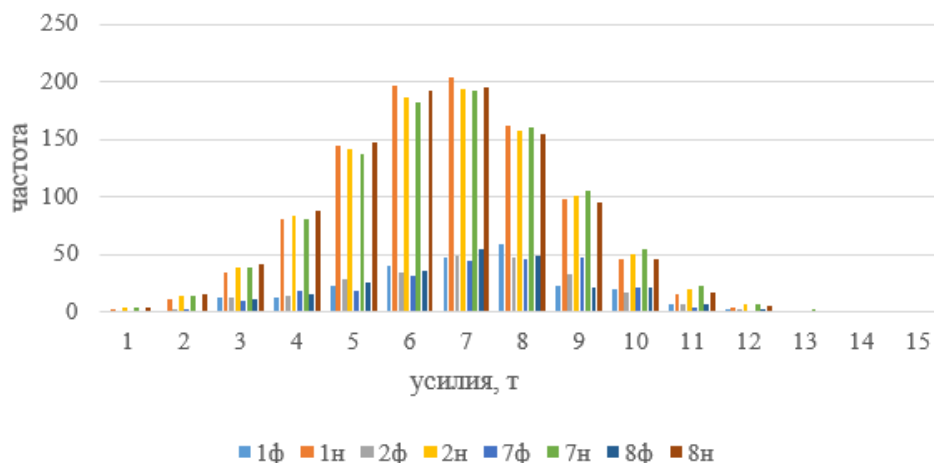


Рисунок 8 – Распределение усилий в угловых точках строповки при 8-ми точках:
индекс ф – фактическое распределение, индекс н – нормальное распределение; 1...8 – номера угловых точек строповки

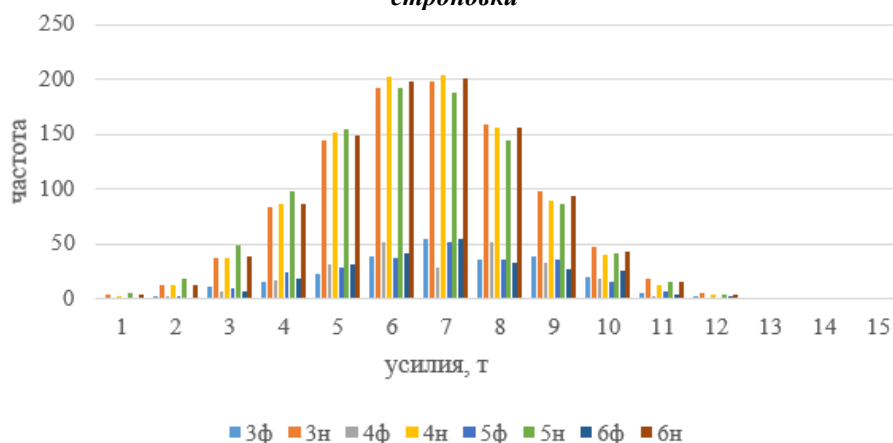


Рисунок 9 – Распределение усилий в центральных точках строповки при 8-ми точках:
индекс ф – фактическое распределение, индекс н – нормальное распределение; 3...6 – номера центральных точек строповки

Максимальная нагрузка на подъемный узел по результатам расчета по грузовым площадям и по пространственной модели составила 13,6 и 14,3 т соответственно (см. табл. 2, номера точек строповки указаны на рис. 7).

Таблица 2 – Результаты расчетного анализа и фактических замеров усилий в точках строповки и массы модулей

№ п/п		Усилия, т, в точке строповки №								А, т	Б, т	А+Б, т
		1	2	3	4	5	6	7	8			
1	Результаты расчета по грузовым площадям	13,6	12,8	6,1	6,3	8,4	8,1	11,7	12,5	50,5	28,9	79,4
2	Результаты расчета по пространственной модели при вертикальной строповке	9,0	8,6	10,3	10,4	14,3	10,6	9,1	9,1	35,8	45,6	81,4
3	Результаты замеров портального транспортера в заводских условиях	10,4	7,5	8,1	8,0	9,9	9,6	10,4	8,2	36,5	35,6	72,1

Примечания. А – сумма усилий, приходящихся на угловые точки строповки, Б – сумма усилий, приходящихся на центральные точки строповки

Выводы

1. Характер фактического распределения усилий обусловлен полученной в результате регулировки стропильщиком длины строп, а также разницей отпускной и проектной прочности бетона несущих конструкций модулей.

2. Результаты расчета показали, что наиболее нагруженными являются угловые точки строповки.

3. Правильно подобранная и подогнанная длина строп позволяет более равномерно распределить усилия по конструкции и избежать перенапряжения отдельных конструктивных элементов модуля. Модули, поднимаемые за шесть и восемь точек с помощью балансирующей траверсы или стропов, следует рассчитывать в предположении неодинакового наклона стропов и неравенства вследствие этого вертикальных составляющих усилий, приложенных к монтажным узлам. Для подтверждения данной гипотезы ведется подготовка к экспериментальным исследованиям распределения усилий, возникающих в точках строповки модуля при монтаже в условиях строительной площадки. При этом, предполагается учет ветрового воздействия, возникающего при монтаже модулей многоэтажного здания, а также подгонка длины строп в зависимости от проектного смещения центра масс модуля. Будучи, полученные результаты послужат базисом для разработки методики расчета подъемных узлов железобетонных модулей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. E. Fuchs. Design of inserts for lifting and handling of precast concrete elements – state of the art // *Otto-Graf-Journal*. 2019. Vol. 18. Pp. 89-100. URL: https://www.mpa.uni-stuttgart.de/institute/publikationen/otto-graf-journal/new_downloadgallery/08_Fuchs.pdf (date of application: 02.04.2024).
2. Ряжских Б.Е. Испытания статической нагрузкой объемного железобетонного блока 17-этажного объемно-блочного здания (ОБД) // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 10. С. 20–34. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-10-20-34.
3. Тамов М.А., Тамов М.М., Усанов С.В., Табагуа Г.Р. Прочность и трещиностойкость объемного блока типа «колпак» без панели пола // Инженерный вестник Дона. 2015 №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/prochnost-i-treschinostoykost-obemnogo-bloka-tipa-kolpak-bez-paneli-pola> (дата обращения: 02.04.2024).
4. Gunawardena, T., Ngo, T.D., Mendis, P. Behavior of Multi-Storey Prefabricated Modular Buildings under seismic loads // *Earthquakes and Structures*. 2016. Vol. 11. No. 6. Pp. 1061-1076. URL: <https://dx.doi.org/10.12989/eas.2016.11.6.1061> (date of application: 02.04.2024).
5. Khodabandelu A., Park J.W., Choi J. O., Sanei M. Analysis of a Long Volumetric Module Lift Using Single and Multiple Cranes // *The 9th International Conference on Construction Engineering and Project Management*. 2022. Pp.563-570.
6. Khodabandelu A., Choi J.O., Park J., Sanei M. Developing a Simulation Model for Lifting a Modular House // in *Construction Research Congress 2020: Computer Applications*, 2020, pp. 145–152. URL: doi.org/10.1061/9780784482865.016 (date of application: 02.04.2024).
7. Амбарцумян С.А., Манукян А.В., Мкртычев О.В., Андреев М.И. Верификация расчетных методик на основе экспериментальных исследований фрагментов железобетонных блоков // Промышленное и гражданское строительство. 2023. № 6. С. 73-77.
8. Хлопов И.С., Широков В.С., Соловьев А.В., Макаров Ю.Д. Анализ напряженно-деформированного состояния быстровозводимого модульного здания // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 6. С. 15-19.
9. Тамов М.М. Контрольные испытания нагружением объемных блоков новой серии // Научные труды Кубанского государственного технологического университета. 2016. № 6. С. 83-93. URL: <http://ntk.kubstu.ru/file/1007>
10. Tachkov M., Scherbatyuk P., Kirik E., Gravit M., Kotlyarskaya I. Design solutions for residential multi-storey steel modular building // *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2022. Vol. 101. Article No 10102. doi: 10.4123/CUBS.101.2. (rus)
11. Лапидус А.А., Амбарцумян С.А., Долгов О.С., Колпаков А.М., Мещеряков А.С., Горбачевский В.П. Исследование влияния технологических и функциональных особенностей мобильных конвейерных роботизированных технологических линий на конструкцию железобетонных стен и перекрытия мобильных

крупногабаритных модулей // Строительное производство. 2022. №3. С. 2-10. URL: https://doi.org/10.54950/26585340_2022_3_2.

12. Амбарцумян С.А., Мещеряков С.А., Агарцев Е.В., Горбачевский В.П. Грузозахватное устройство/ Патент на изобретение № 2751379 от 13.07.2021. – М.: Роспатент, 2021.

13. Пахомова Л.А., Горбачевский В.П. О подготовке и эксплуатации траверс для перемещения крупногабаритных объемных блоков // Строительное производство. 2021. №1. С. 39-47.

14. Амбарцумян С.А., Мартиросян А.С. Способ защиты секций здания при выполнении монтажа здания из готовых крупногабаритных объемных модулей (варианты)/ Патент на изобретение № 2803606 от 18.09.2023. – М.: Роспатент, 2023.

15. Амбарцумян С.А., Мещеряков А.С. Способ изготовления крупногабаритного готового объемного модуля и способ строительства здания из крупногабаритных готовых объемных модулей/ Патент на изобретение № 2712845 от 31.01.2020. – М.: Роспатент, 2020.

REFERENCES

1. E. Fuchs. Design of inserts for lifting and handling of precast concrete elements – state of the art. *Otto-Graf-Journal*. 2019. Vol. 18. Pp. 89-100. URL: https://www.mpa.uni-stuttgart.de/institute/publikationen/otto-graf-journal/new_downloadgallery/08_Fuchs.pdf (date of application: 02.04.2024).

2. Riazhsikh B.E. Static load testing of a volumetric precast reinforced concrete module of a 17-storey residential modular building. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2023. No. 10. Pp. 20–34. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-10-20-34. (rus)

3. Tamov M.A., Tamov M.M., Usanov S.V., Tabagua G.R. Prochnost' I treshchinostoykost' ob'yemnogo bloka tipa "Kolpak" bez paneli pola [Strength and crack resistance of a volumetric block of the "Cap" type without a floor panel] *Nauchnyy zhurnal "Inzhenernyy vestnik Dona"* [Electronic scientific journal Engineering Journal of Don] 2015. No. 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/prochnost-i-treshchinostoykost-obemnogo-bloka-tipa-kolpak-bez-paneli-pola> (date of application: 02.04.2024). (rus)

4. Gunawardena, T., Ngo, T.D., Mendis, P. Behavior of Multi-Storey Prefabricated Modular Buildings under seismic loads. *Earthquakes and Structures*. 2016. Vol. 11. No. 6. Pp. 1061-1076. URL: <https://dx.doi.org/10.12989/eas.2016.11.6.1061> (date of application: 02.04.2024).

5. Khodabandelu A., Park J.W., Choi J. O., Sanei M. Analysis of a Long Volumetric Module Lift Using Single and Multiple Cranes. The 9th International Conference on Construction Engineering and Project Management. 2022. Pp. 563-570. URL: https://www.researchgate.net/publication/363614739_Analysis_of_a_Long_Volumetric_Module_Lift_Using_Single_and_Multiple_Cranes (date of application: 02.04.2024).

6. Khodabandelu A., Choi J.O., Park J., Sanei M. Developing a Simulation Model for Lifting a Modular House. in *Construction Research Congress 2020: Computer Applications*, 2020, pp. 145–152. URL: doi.org/10.1061/9780784482865.016 (date of application: 02.04.2024).

7. Ambartsumyan S.A., Manukyan A.V., Mkrtichev O.V., Andreev M.I. Verifikatsiya raschetnykh metodik na osnove eksperimental'nykh issledovaniy fragmentov zhelezobetonnykh blokov [Verification of calculation methods based on experimental studies of fragments of reinforced concrete blocks] *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering]. 2023. No. 6. Pp. 73-77. (rus)

8. Kholopov I.S., Shirokov V.S., Solov'ev A.V., Makarov Yu. D. Analiz napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya bystrovovodimogo modul'nogo zdaniya [The strain-stress state analysis of a prefab building] *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering]. 2015. No. 6. Pp. 15-19. (rus)

9. Tamov M.M. Kontrol'nyye ispytaniya nagruzheniyem ob'yemnykh blokov novoy serii [Loading tests of new type room units] *Nauchnyye Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2016. Pp. 83-93. URL: <http://ntk.kubstu.ru/file/1007> (rus)

10. Tachkov M., Scherbatyuk P., Kirik E., Gravit M., Kotlyarskaya I. Design solutions for residential multi-storey steel modular building. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2022. Vol. 101. Article No 10102. doi: 10.4123/CUBS.101.2. (rus)

11. Lapidus A.A., Ambartsumyan S.A., Dolgov O.L., Kolpakov A.M., Mescheryakov A.S., Gorbachevskii V.P. Issledovaniye vliyaniya tekhnologicheskikh I funktsional'nykh osobennostey mobil'nykh konveyernykh robotizirovannykh tekhnologicheskikh liniy na konstruktuyu zhelezobetonnykh sten I perekrytiy mobil'nykh krupnogabaritnykh moduley [Investigation of the Influence of Technological and Functional Features of Mobile Conveyor Robotic Production Lines on the Design of Reinforced Concrete Walls and Floors of Mobile Large-Sized Modules] *Nauchno-tekhnicheskij zhurnal Stroitel'noye proizvodstvo* [Scientific and technical journal Construction production]. 2022. No. 3. Pp. 2-10. doi: 10.54950/26585340_2022_3_2 (rus)

12. Patent RF 2751379. Gruzozakhvatnoye ustroystvo [Load-gripping apparatus]. Ambartsumian S.A., Meshcheriakov A.S., Agartsev E.V., Gorbachevskii V.P. Published 13.07.2021. (rus)

13. Pakhomova L.A., Gorbachevskii V.P. O podgotovke k ekspluatatsii travers dlya peremeshcheniya krupnogabaritnykh ob'yemnykh blokov [About Crosspieces Preparation and Operation for Moving Large-Scale Roomy Blocks] *Nauchno-tekhnicheskii zhurnal Stroitel'noye proizvodstvo* [Scientific and technical journal Construction production]. 2021. No. 1. Pp. 39-47. (rus)

14. Patent RF 2803606. Sposob zashchity sektsiy zdaniya pri vypolnenii montazha zdaniya iz gotovykh krupnogabaritnykh ob'yemnykh moduley (varianty) [Method for protection of building sections during erection of a building from ready-made large-sized modules (variants)]. Ambartsumian S.A., Martirosian A.S. Published 18.09.2023. (rus)

15. Patent RF 2712845. Sposob izgotovleniya krupnogabaritnogo gotovogo ob'yemnogo modulya i sposob stroitel'stva zdaniya iz krupnogabaritnykh gotovykh ob'yemnykh moduley [Method of manufacturing large-sized finished three-dimensional module and method of building construction from large-size finished 3d modules]. Ambartsumian S.A., Meshcheriakov A.S. Published 31.01.2020. (rus)

Информация об авторах

Трекин Николай Николаевич

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»:

г. Москва, Россия,

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры железобетонных и каменных конструкций

E-mail: nik-trekin@yandex.ru

Горбачевский Валентин Петрович

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

Москва, Россия,

аспирант кафедры Железобетонных и каменных конструкций,

E-mail: vgline@mail.ru

Information about authors

Trekin Nikolay N.

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,

Doctor of Tech. Sc., Professor, Professor of the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures.

E-mail: nik-trekin@yandex.ru

Gorbachevskii Valentin P.

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,

Post graduate student of the department of Reinforced Concrete and Masonry Structures.

E-mail: vgline@mail.ru

И.М. ДЬЯКОВ¹, М.И. ДЬЯКОВ¹

¹ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского», г. Симферополь, Россия

СИЛОВОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ОТДЕЛЬНО СТОЯЩИХ ФУНДАМЕНТОВ С ОСНОВАНИЕМ ПРИ БЫСТРОМ ДОГРУЖЕНИИ

Аннотация. Приведены результаты экспериментальных исследований силового взаимодействия моделей отдельно стоящих фундаментов с песчаным основанием при быстрых догрузках. Исследования выполнены на железобетонных моделях фундаментов и металлическом штампе в песчаном лотке. Анализ затронул такие факторы работы системы «фундамент-грунт» при наличии быстрого догружения как изменение несущей способности фундамента на изгиб, осадка основания, трансформация эпюры нормальных контактных напряжений. Выявлены причины снижения несущей способности фундаментов на изгиб при быстром догружении, основной из которых является изменение формы эпюры нормальных контактных напряжений. Определены факторы, влияющие на концентрацию нормальных контактных напряжений у краевых зон подошвы фундамента, среди которых: разная скорость протекания составляющих процесса перераспределения напряжений в основании, развитие дилатансии и др.

Ключевые слова: силовое взаимодействие фундаментов с основанием, осадка фундаментов, нормальные контактные напряжения, деформации, отдельно стоящий фундамент, прогрессирующее обрушение.

I.M. DIAKOV¹, M.I. DIAKOV¹

¹Crimean Federal University named after V.I. Vernadsky, Simferopol, Russia

INTERACTION OF PILLAR FOUNDATIONS WITH THE BASEMENT UNDER DYNAMIC LOADING

Abstract. The results of experimental studies of the force interaction of models of free-standing foundations with a sandy base under rapid additional loading are presented. The studies were carried out on reinforced concrete foundation models and a metal stamp in a sand tray. The analysis touched upon such factors of the operation of the “foundation-soil” system in the presence of rapid additional loading as a change in the bearing capacity of the foundation for bending, foundation settlement, transformation of the diagram of normal contact stresses. The reasons for the decrease in the bearing capacity of foundations for bending during rapid additional loading have been identified, the main one of which is a change in the shape of the diagram of normal contact stresses. Factors influencing the concentration of normal contact stresses near the edge zones of the foundation base have been identified, including: different rates of components of the stress redistribution process in the foundation, the development of dilation, etc.

Keywords: Force interaction of foundations with soil, settlement of foundations, normal contact stresses, deformations, free-standing foundation, progressive collapse.

Введение

В последние годы значительное внимание уделяется изучению работы конструкций и основания при особых нагрузках и сложных силовых воздействиях.

© Дьяков И.М., Дьяков М.И., 2024

Широко известны исследования поведения системы «фундамент-грунт» при циклических, динамических, вибрационных и других нагрузках [1-5]. При этом не уделено внимание изучению влияния на работу системы «фундамент-грунт» быстрого догружения. Под быстрым догружением в проведенных исследованиях понимается увеличение нагрузки на фундамент, скорость возрастания которой выше, чем скорость полного перераспределения напряжений в грунтовом массиве от увеличившейся внешней нагрузки [6,7].

Наиболее характерными причинами возникновения быстрого догружения являются: реконструкция зданий с заменой фундаментов, аварийные либо запредельные нагрузки, в том числе: концентрация грузов у колонны, падение груза на перекрытие, воздействие на здание природных факторов и экзогенных процессов (обрушение откоса грунта, сход оползня) и др. Из анализа результатов имеющихся лабораторных и натурных исследований изменения физико-механических и прочностных характеристик грунта при возрастании скорости нагружения [8-10] можно предположить, что быстрое догружение может приводить к преждевременному разрушению фундаментов, неравномерной сверхнормативной осадке, а, соответственно, к повреждениям здания, что обуславливает актуальность исследований в данной сфере. Особый интерес представляет изучение работы системы «фундамент-основание» при быстрых догружениях в контексте прогрессирующего обрушения. Исследованию сопротивления зданий прогрессирующему обрушению, разработке методик расчета посвящено значительное количество публикаций [11-13]. Вместе с тем, работа системы «фундамент-грунт» в этих исследованиях рассматривается с использованием нормативного подхода без учета влияния скорости увеличения нагрузки.

Целью исследования является выявление на основе экспериментальных данных особенностей силового взаимодействия отдельно стоящих фундаментов с грунтовым основанием при быстром догружении, создающих условия для формирования методики расчета фундаментов на изгиб с учетом реальной формы эпюры нормальных контактных напряжений.

Задачи исследований:

- на основании анализа результатов экспериментальных исследований выявить особенности осадки фундаментов и трансформации эпюры нормальных контактных напряжений при быстрых догружениях, установить факторы, влияющие на их формирование;
- определить причины изменения несущей способности фундаментов на изгиб при быстрых догружениях.

Модели и методы

Для выявления особенностей силового взаимодействия отдельно стоящих фундаментов с грунтовым основанием при быстрых догружениях были выполнены экспериментальные исследования в грунтовой лотке размерами 2,2х2,2х2,2 м, заполненной песком средней крупности (см. рисунок 1). Испытано 12 моделей железобетонных фундаментов размерами в плане 0,5х0,5 м с толщиной плиты 0,07-0,082 м, 5 моделей размерами в плане 0,5х0,4 м с толщиной плиты 0,07-0,082 м (см. рисунок 2). Прочность бетона образцов 2 серии на сжатие 33 МПа, площадь сечения арматуры 0,71 см², сопротивление арматуры растяжению 717,6 МПа. Прочность бетона образцов 3 серии на сжатие 30 МПа (Ф-3.1, Ф-3.4, Ф-3.5) и 40 МПа (Ф-3.2, Ф-3.3, Ф-3.6), площадь сечения арматуры 0,34 см², сопротивление арматуры растяжению 750 МПа. Также проведено 12 экспериментов с металлической моделью размерами в плане 0,425х0,425 м.

В процессе экспериментов измеряли уровень внешней нагрузки, нормальные контактные напряжения под подошвой, осадку и деформацию плиты железобетонных фундаментов. Испытания железобетонных моделей проводили до разрушения с традиционным (медленным) нагружением, а также быстрым догружением после

предварительного медленного преднагружения уровнем 25, 50 и 75% от расчетной разрушающей нагрузки. Испытания металлических моделей выполняли по аналогичной схеме до заданной нагрузки с учетом несущей способности основания.

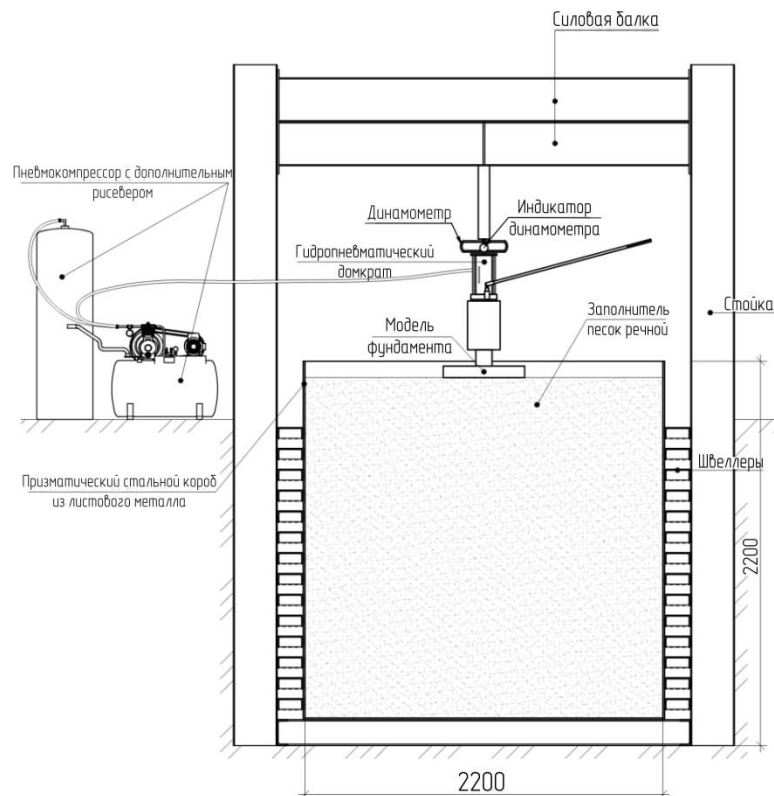


Рисунок 1 – Схема грунтового лотка и оборудования для испытания моделей фундамента

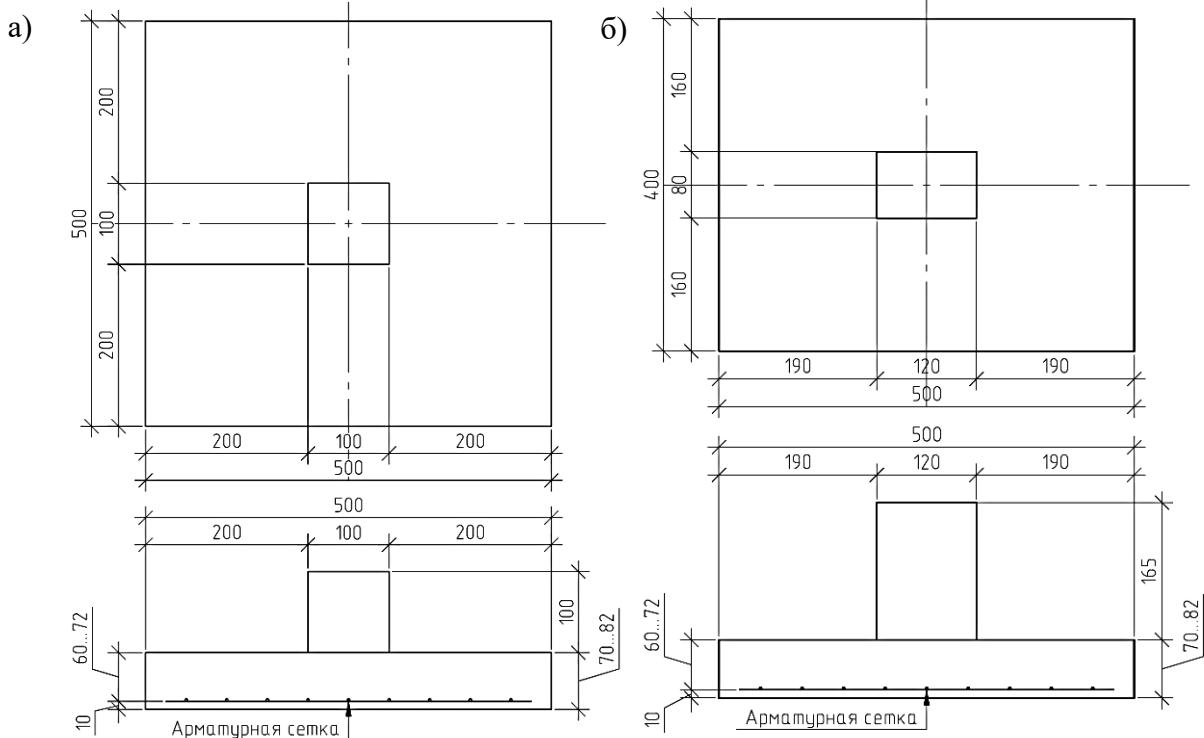


Рисунок 2 – Конструкция опытных образцов: а – 1 и 3 серии, б – 2 серия

Скорость нагружения в экспериментах (по среднему значению нормальных контактных напряжений) составляла 0,5...1,0 МПа/мин. В основу выбора скорости нагружения положены работы, обосновывающие скорость нагружения песчаного основания 0,05...3,0 МПа/мин., как оказывающую наибольшее влияние на деформации грунтов [14, 15]. Влияние быстрого нагружения на осадку фундаментов, несущую способность конструкции изучали на железобетонных моделях фундамента. Особенности трансформации эпюры нормальных контактных напряжений в процессе быстрого догружения и после стабилизации нагрузки исследовали на металлических моделях.

Результаты исследования и их анализ

Все опытные модели железобетонных фундаментов разрушились от изгиба по нормальным сечениям. При этом наблюдалось снижение несущей способности конструкций при наличии быстрого догружения на 14,7 – 24,8% относительно моделей с равными параметрами, испытанных при традиционном медленном нагружении (результаты 1 серии представлены в [6], 2 и 3 серий – в таблице 1). Разница несущей способности конструкций увеличивалась при более высоком уровне нагруженности основания (модели серии 2 и 3). Изучение характера разрушения фундаментов (см. рисунок 3) не выявило каких-либо специфических особенностей при наличии быстрого догружения.

Таблица 1 – Расчетная и опытная несущая способность моделей фундаментов 2 и 3 серии

№ образ-ца	Размеры в плане, высота плитной части, см	Расчетная несущая способность фундаментов, на изгиб $P_{из}$, кН	Уровень предварительного медленного нагружения (кН)	Наличие быстрого догружения	Опытная несущая способность, P_i (кН)	$P_i/P_{из}$	Снижение несущей способности и относительно условного базового фундамента (%)
2-я серия экспериментов							
Ф-2.1	40x50x7	47,6	36	да	48,0	1,01	21,7
Ф-2.2	40x50x8	55,8	48	да	54,1	0,97	24,8
Ф-2.3	40x50x8,2	57,4	4	да	63,6	1,1	14,7
Ф-2.4	40x50x8	55,8	-	нет	75,0	1,34	-
Ф-2.5	40x50x8	55,8	-	нет	72,0	1,29	-
3-я серия экспериментов							
Ф-3.1	50x50x7	23,85	-	нет	61,0	2,56	-
Ф-3.2	50x50x8	27,96	18,3	да	55,0	1,96	20,5
Ф-3.3	50x50x8,2	28,77	7,32	да	59,0	2,05	16,8
Ф-3.4	50x50x8	27,88	-	нет	66,0	2,37	-
Ф-3.5	50x50x8	27,88	28,9	да	56,0	2,01	18,4
Ф-3.6	50x50x7,6	26,35	26,7	да	51,0	1,93	21,7

Существенное влияние быстрое догружение оказывало на осадку фундаментов. С момента начала быстрого догружения развитие осадки с увеличением нагрузки замедлялось, что прослеживается как на графиках абсолютной осадки (см. рисунок 4 а, б), так и графиках относительного приращения осадки (см. рисунок 4 г, д). На момент разрушения железобетонных моделей, осадка у большинства образцов была меньше, чем осадка аналогичных образцов, испытанных при традиционном медленном нагружении. Наибольшее

снижение осадки наблюдалась в образцах Ф-2.3 и Ф-3.3, быстрое догружение которых осуществлялась при наименьшем преднагружении статической нагрузкой (см. рисунок 4). Сниженная величина осадки при быстром догружении объясняется отсутствием силового равновесия между внешней нагрузкой и опорной реакцией грунта на момент разрушения фундамента, а также запаздыванием процессов пластических деформаций в грунте относительно роста внешней нагрузки.

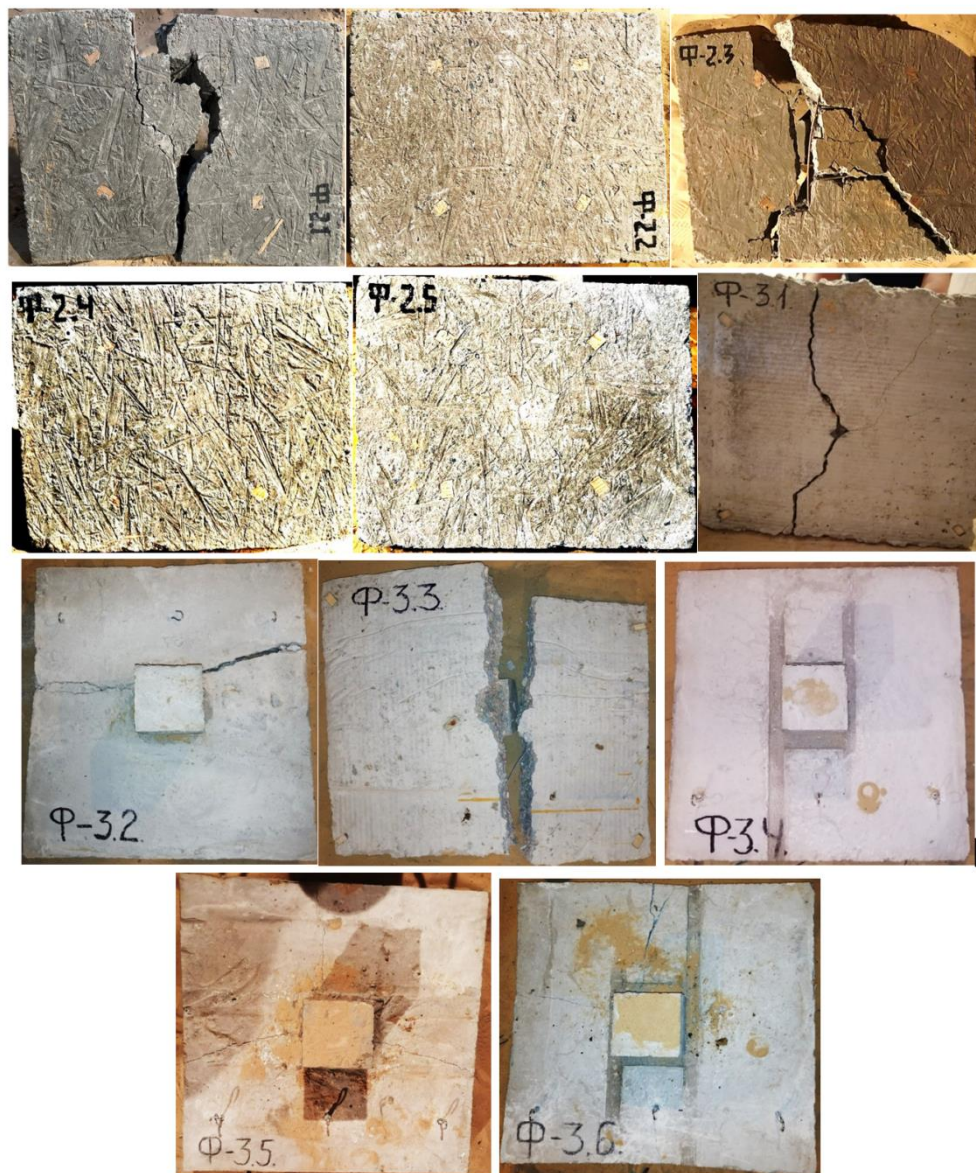


Рисунок 3 – Разрушение железобетонных моделей фундаментов

Приращения осадки образцов во время быстрого догружения носили волновой характер изменения (рисунок 4 г, д) в отличие от более равномерного приращения осадки у образцов с медленным нагружением (рисунок 4 в). Это можно объяснить развитием фрикционных автоколебаний системы «фундамент-грунт» и циклическим характером процесса дилатансии грунта у краевых зон подошвы фундаментов в виде циклов «уплотнение-разуплотнение». После стабилизации нагрузки быстрого догружения осадка металлических моделей полностью затухала в течении 10-15 минут. При этом наиболее интенсивные изменения происходили в период 10-30 секунд после стабилизации нагрузки.

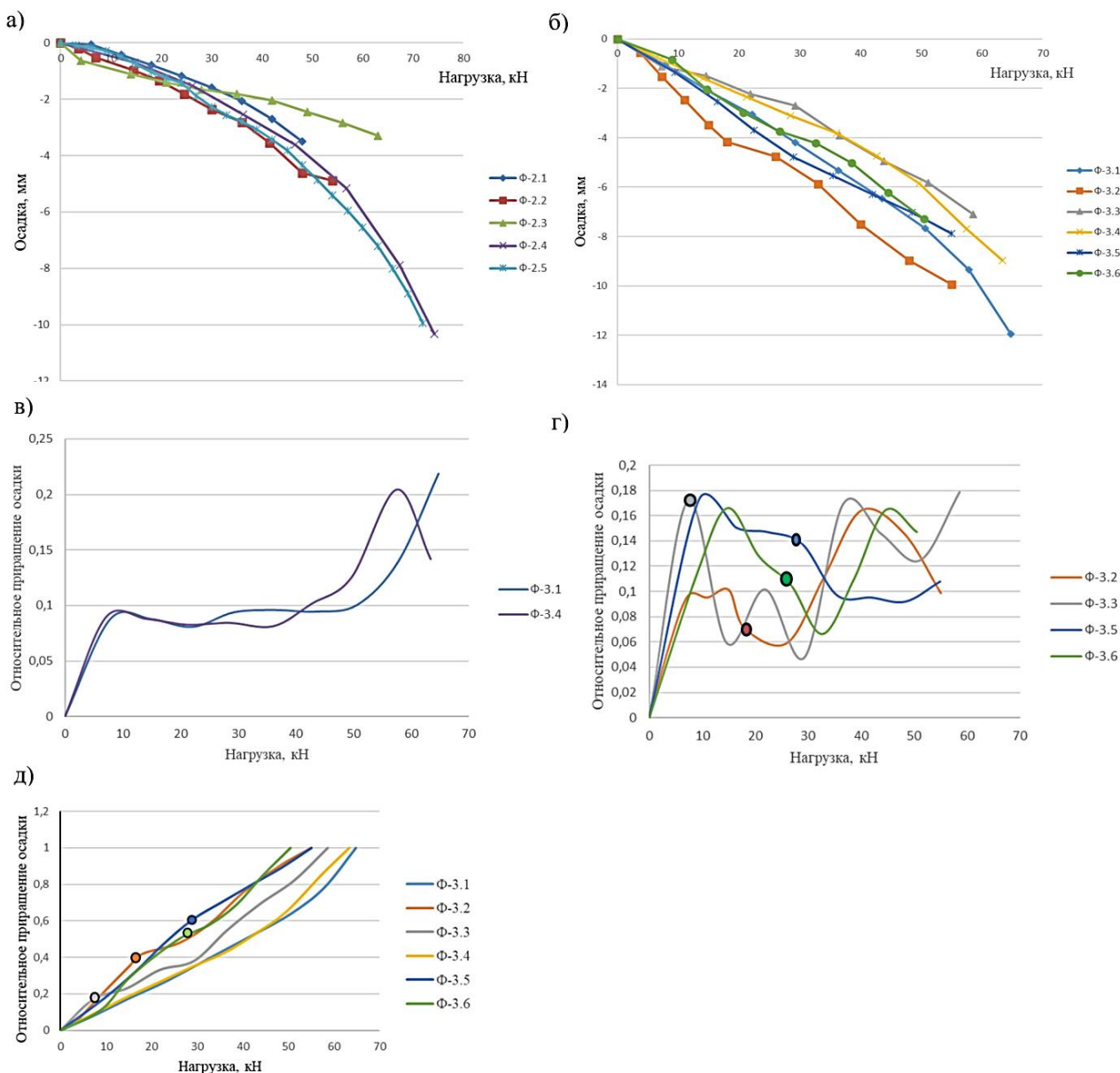


Рисунок 4 – Графики осадки фундаментов: абсолютная осадка фундаментов 2 и 3 серий экспериментов (а,б); пошаговое относительное приращение осадки фундаментов Ф-3.1 и Ф-3.4, испытанных при медленном нагружении (в); пошаговое относительное приращение осадки фундаментов Ф-3.2, Ф-3.3, Ф-3.5 и Ф-3.6, испытанных с быстрым догружением (г); относительное приращение осадки фундаментов 3-й серии (точками показано начало быстрого догружения) (д)

Форма эпюры нормальных контактных напряжений в центральных сечениях перед началом быстрого нагружения была близка к параболической как у железобетонных, так и металлических моделей. После быстрого догружения нормальные контактные напряжения у краевых зон подошвы металлических моделей имели более высокие значения относительно образцов, испытанных при традиционном медленном нагружении (см. рисунок 5 а). После стабилизации внешней нагрузки быстрого догружения под краевой зоной подошвы наблюдался непродолжительный во времени рост напряжений, после чего они стабилизировались либо снижались (см. рисунок 5 б, в).

Нормальные контактные напряжения под центральной частью подошвы фундамента, а также в промежуточной зоне после фиксации нагрузки быстрого нагружения в большинстве

экспериментов возрастали в течении более длительного времени (см. рисунок 5 в). С увеличением степени нагруженности основания величина прироста нормальных контактных напряжений под центральной частью подошвы была больше. В экспериментах с медленным нагружением прирост напряжений и осадки моделей после стабилизации нагрузки каждой ступени проявлялся лишь при высокой степени нагруженности основания и имел существенно меньшие значения, чем при наличии быстрого догружения.

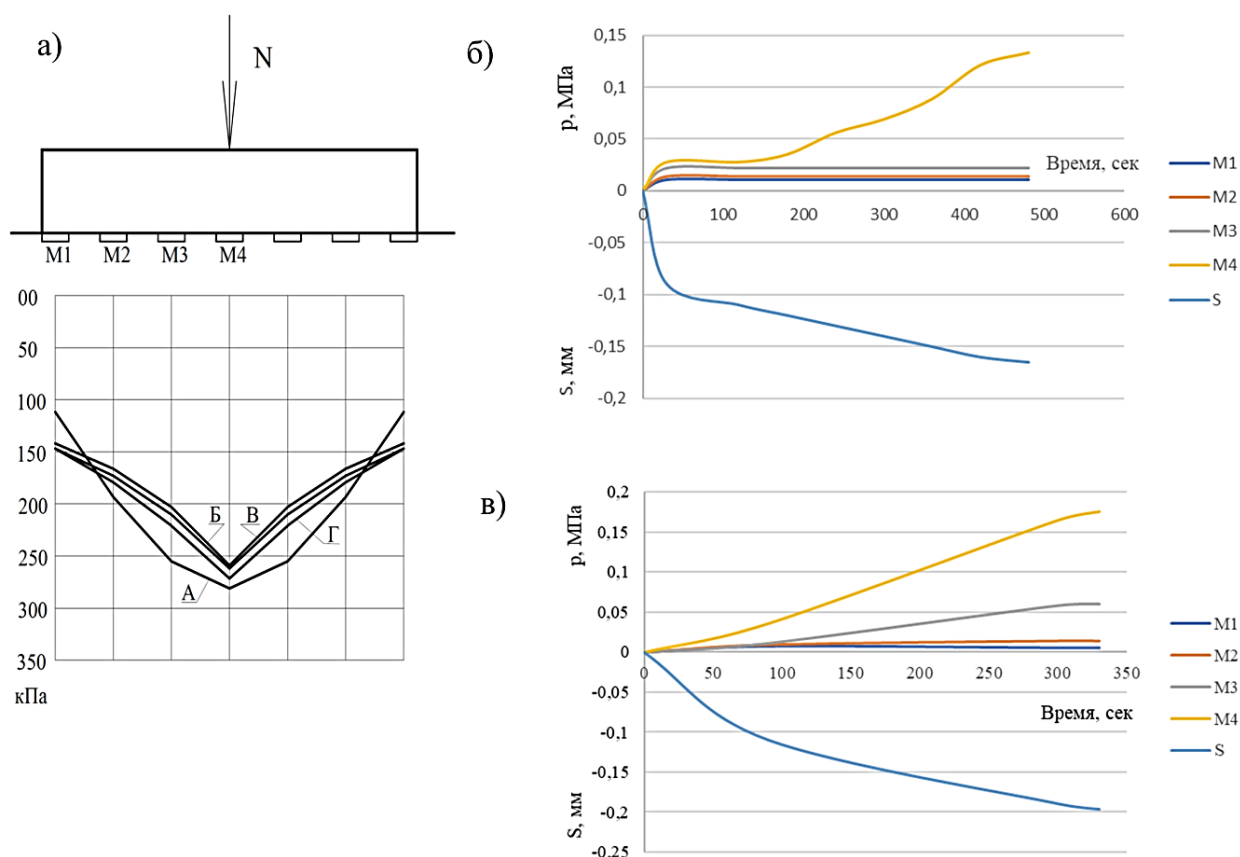


Рисунок 5 – Эпюры и ординаты нормальных контактных напряжений под подошвой железобетонных и металлических моделей: эпюры напряжений под подошвой металлической модели при нагрузке 30 кН (А- при медленном нагружении; Б, В и Г - при быстром догружении сразу после стабилизации нагрузки, через 10 и 30 секунд соответственно (а); прирост нормальных контактных напряжений после фиксации нагрузки быстрого догружения, увеличившей внешнее усилие с 15 до 60 кН (б); тоже с 60 до 67,3 кН(в)

Анализ результатов экспериментальных исследований позволил установить, что основными причинами более высокого уровня нормальных контактных напряжений под краевыми зонами подошвы фундамента на момент фиксации внешней нагрузки быстрого догружения относительно уровня напряжений при медленном нагружении при одинаковой внешней нагрузке являются развитие процесса дилатансии, более низкая скорость сдвиговых и пластических деформаций относительно скорости догружения, а также развитие неупругих деформаций под центральными зонами подошвы фундамента. Косвенно возможность влияния дилатансии на краевые контактные напряжения подтверждается в работах [16-20].

Увеличение нормальных напряжений в уплотненном грунте при дилатансии происходит в случае ограничения возможности перемещений. Учитывая, что перемещения в грунте имеют определенную скорость, при быстром нагружении создается кратковременный эффект ограничения перемещений. Кроме того, при предварительном нагружении фундамента статической нагрузкой грунт основания уплотняется, что необходимо для развития дилатансии. Наибольшее влияние дилатансии на эпюру нормальных контактных

напряжений проявляется у краевых зон подошвы и на некотором удалении от края, так как зоны сдвига и максимальные касательные напряжения концентрируются на данных участках.

С высокой долей вероятности в качестве фактора, влияющего на кратковременное повышение краевых нормальных контактных напряжений в процессе быстрого догружения, можно рассматривать фрикционные автоколебания. Возможность возникновения колебательных процессов в системе «гибкий фундамент-грунт» связана с взаимозависимостью ординат эпюры нормальных контактных напряжений с прогибом конструкции, а также циклическим характером дилатансии, описанном в [20].

Более высокий уровень нормальных контактных напряжений у краевой зоны подошвы фундамента, формирующий более высокие значения изгибающего момента в центральных сечениях подошвы, является основной причиной снижения несущей способности фундамента на изгиб при быстром догружении.

Выводы

1. Быстрое догружение фундаментов способствует изменению параметров силового взаимодействия отдельно стоящих фундаментов с основанием относительно медленного нагружения, что проявляется в изменении осадки фундамента и формы эпюры нормальных контактных напряжений, снижении несущей способности фундаментов на изгиб.
2. Основной причиной снижению несущей способности фундаментов на изгиб при быстром догружении фундаментов является относительное увеличение нормальных контактных напряжений под краевыми зонами подошвы фундамента и снижение под центральными зонами подошвы, что приводит к увеличению изгибающего момента в центральных нормальных сечениях конструкции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тер-Мартirosян, А. З. Осадки оснований сооружений при статическом, циклическом и вибрационном воздействиях / А. З. Тер-Мартirosян // Международный журнал «Геотехника». – М. – 2010. – С.77-81.
2. Алексеев В.М., Евдокимцев О.В., Леденев В.В. Экспериментальные исследования работы фундаментов при действии центральной и внецентренной многократно повторной нагрузки. ВНИИТПИ, № 11691. М., 1998. - 25 с.
3. Леденёв В. В., Основания и фундаменты при сложных силовых воздействиях (опыты): монография для научных работников, аспирантов и магистрантов строительного профиля: в 2 т. /– Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2015. Т. 2. – 2015. – 288 с.
4. Jia J. Dynamic and cyclic properties of soils // Soil dynamics and foundation modeling// Springer international publishing Ag. 2018.P. 75-108.
5. Леденёв В. В., Несущая способность и деформативность оснований и фундаментов при сложных силовых воздействиях: монография / – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2015. – 324 с. – 400 экз. – ISBN 978-5-8265-1444-3.
6. Diakov I N, Tsarenko N V, Diakov M I., Experimental studies of the “foundation-soil” system operation with sudden loading// IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 913 (2020) 022064 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/913/2/022064.
7. Дьяков И.М. Планирование экспериментальных исследований работы системы «фундамент-основание» при внезапных догружениях [Электронный ресурс]/ И.М. Дьяков, М.И. Дьяков, Б.Ю. Барыкин // Строительство и техногенная безопасность. — 2020. — № 19(71). — с.5-12. — DOI: 10.37279/2413-1873-2020-19-5-12.
8. Vesic, A. S. Analysis of ultimate loads of shallow foundations /A. S. Vesic // Journal of the soil mechanics and foundation division. – 1973. – V. 99, N SM1. – P. 45 – 73
9. Motra H.B., Stutz H., Wuttke F. Quality assessment of soil bearing capacity factor models of shallow foundations // Soils and Foundations. 2016. Volume 56. Issue 2. Pp. 265-276.
10. Сиразиев Л.Ф. Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния трехслойного грунтово-цементного основания при кратковременных штамповых испытаниях и наличии водонасыщенного слоя. Известия КГАСУ, 2017, № 4 (42). – Казань, С.228-236.

11. Колчунов В.И., Московцева В.С., Бушова О.Б., Жуков Д.И. Расчетный анализ способов защиты монолитных каркасов многоэтажных зданий с плоскими перекрытиями от прогрессирующего обрушения. *Строительство и реконструкция*. 2021;(4):35-44. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2021-96-4-35-44>
12. Колчунов В.И., Московцева В.С. Живучесть железобетонных каркасов многоэтажных зданий со сложнапряженными элементами // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2022. Т. 18. № 3. С. 195–203. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-3-195-203>.
13. Травуш, В. И. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения в рамках законодательных и нормативных требований / В. И. Травуш, В. И. Колчунов, Е. В. Леонтьев. - (Строительные конструкции, здания и сооружения). - Текст: непосредственный // *Промышленное и гражданское строительство*. - 2019. - № 2. - С. 46-54. - Библиогр.: с. 53-54 (19 назв.). - ISSN 0869-7019.
14. Тархута Н.Я., Васильев Ю.М. Прочность, устойчивость и уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог / Н.Я. Хархута, Ю.М. Васильев. - Москва : Транспорт, 1975. - 285 с.
15. Денисенко В. В., Ляшенко П. А. Исследование влияния скорости приложения постоянно возрастающей нагрузки на консолидацию грунтов после нагружения Научные труды КубГТУ №15.– 2016. – С. 1–15.
16. Т.М. Уласик. Влияние «стесненной» дилатансии на несущую способность свайных фундаментов/ *Вестник полочкого государственного университета. Строительство. Прикладные науки* 2015, №16. – С30-33.
17. Abouzar Sadrekarimi. Static liquefaction-triggering analysis considering soil dilatancy. *Soils and Foundations* 2014;54(5). С.955-966
18. Merita Tafili 1,2,*, Carlos Grandas Tavera 3, Theodoros Triantafyllidis 1 and Torsten Wichtmann. On the Dilatancy of Fine-Grained Soils / *Geotechnics/ Geotechnics* 2021, 1, 192–215. <https://doi.org/10.3390/geotechnics1010010/> <https://www.mdpi.com/journal/geotechnics>
19. John McDougall, Darren Kelly, Daniel Barreto/ Particle loss: An initial investigation into size effects and stress-dilatancy/ April 2019/ *SOILS AND FOUNDATIONS* 59(3) DOI:10.1016/j.sandf.2019.03.002 License CC BY-NC-ND 4.0
20. Muhammad Shehzad Khalid a, Mamoru Kikumoto b, Ying Cui b, Kiyoshi Kishida. The role of dilatancy in shallow overburden tunneling/ *ScienceDirect Underground Space* 4 (2019) 181–200

REFERENCES

1. Ter-Martirosyan, A. Z. Settlement of the foundations of structures under static, cyclic and vibration influences. A. Z. Ter-Martirosyan. *International Journal of Geotechnics*. – М. – 2010. – P.77-81.
2. Alekseev V.M., Evdokimtsev O.V., Ledenev V.V. Experimental studies of the operation of foundations under the action of central and eccentric repeated loads. VNIITPI, No. 11691. М., 1998. - 25 p.
3. Ledenev V. V. Foundations and foundations under complex force influences (experiments): monograph for scientists, graduate students and undergraduates in construction: in 2 volumes. Tambov: Publishing house of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "TSTU", 2015. Т. 2. - 2015. - 288 p.
4. Jia J. Dynamic and cyclic properties of soils. *Soil dynamics and foundation modeling*. Springer international publishing Ag. 2018.P. 75-108.
5. Ledenev V. V. Bearing capacity and deformability of bases and foundations under complex force influences: monograph. Tambov: Publishing house of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "TSTU", 2015. – 324 p. – 400 copies. – ISBN 978-5-8265-1444-3.
6. . Diakov I N, Tsarenko N V, Diakov M I. Experimental studies of the “foundation-soil” system operation with sudden loading. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 913 (2020) 022064 IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/913/2/022064.
7. Dyakov I.M. Planning of experimental studies of the operation of the “foundation-foundation” system under sudden additional loading [Electronic resource]. *Construction and technogenic safety*. - 2020. - No. 19(71). — p.5-12. — DOI: 10.37279/2413-1873-2020-19-5-12.
8. Vesic, A. S. Analysis of ultimate loads of shallow foundations .A. S. Vesic. *Journal of the soil mechanics and foundation division*. – 1973. – V. 99, N SM1. – P. 45 – 73.
9. Motra H.B., Stutz H., Wuttke F. Quality assessment of soil bearing capacity factor models of shallow foundations. *Soils and Foundations*. 2016. Volume 56. Issue 2. Pp. 265-276.
10. Siraziev L.F. Experimental studies of the stress-strain state of a three-layer soil base during short-term stamping tests and the presence of a water-saturated layer. *News of KGASU*, 2017, No. 4 (42). – Kazan, pp. 228-236.
11. Kolchunov V.I., Moskovtseva V.S., Bushova O.B., Zhukov D.I. Calculation analysis of methods for protecting monolithic frames of multi-story buildings with flat floors from progressive collapse. *Construction and reconstruction*. 2021;(4):35-44. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2021-96-4-35-44>.
12. Kolchunov V.I., Moskovtseva V.S. Vitality of reinforced concrete frames of multi-storey buildings with complexly stressed elements. *Structural mechanics of engineering structures and structures*. 2022. Т. 18. No. 3. pp. 195–203. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-3-195-203>.

13. Travush, V. I. Protection of buildings and structures from progressive collapse within the framework of legislative and regulatory requirements (Building structures, buildings and structures). *Industrial and civil construction*. - 2019. - No. 2. - P. 46-54. - Bibliography: p. 53-54 (19 titles). - ISSN 0869-7019.
14. Tarhuta N.Ya., Vasiliev Yu.M. Strength, stability and soil compaction of highway subgrades. Moscow: Transport, 1975. - 285 p.
15. Denisenko V.V., Lyashenko P.A. Study of the influence of the speed of application of a constantly increasing load on the consolidation of soils after loading *Scientific works of KubSTU*. No. 15. – 2016. – P. 1–15.
16. T.M. Ulasik. The influence of “constrained” dilatancy on the bearing capacity of pile foundations. *Bulletin of Polotsk State University. Construction. Applied Sciences* 2015, No. 16. – P. 30-33.
17. Abouzar Sadrekarimi. Static liquefaction-triggering analysis considering soil dilatancy. *Soils and Foundations* 2014;54(5). C.955-966.
18. Merita Tafili 1,2,*, Carlos Grandas Tavera 3, Theodoros Triantafyllidis 1 and Torsten Wichtmann. On the Dilatancy of Fine-Grained Soils. *Geotechnics* 2021, 1, 192–215. <https://doi.org/10.3390/geotechnics1010010/> <https://www.mdpi.com/journal/geotechnics>.
19. John McDougall, Darren Kelly, Daniel Barreto. Particle loss: An initial investigation into size effects and stress-dilatancy. April 2019. *SOILS AND FOUNDATIONS* 59(3) DOI:10.1016/j.sandf.2019.03.002 License CC BY-NC-ND 4.0.
20. Muhammad Shehzad Khalid a, Mamoru Kikumoto b, Ying Cui b, Kiyoshi Kishida. The role of dilatancy in shallow overburden tunneling. *ScienceDirect Underground Space* 4 (2019) 181–200.

Информация об авторах

Дьяков Игорь Михайлович

ФГАОУ ВО Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского, г. Симферополь, Россия,
канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой Геотехники и конструктивных элементов зданий,
E-mail: karta3@mail.ru

Дьяков Михаил Игоревич

ФГАОУ ВО Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского, г. Симферополь, Россия,
аспирант кафедры строительных конструкций,
E-mail: dyakov.info.aca@yandex.ru

Information about authors

Diakov Igor M.

Crimean Federal University named after V.I. Vernadsky, Simferopol, Russia,
candidate in tech. sc., docent, head of the department of geotechnics and structural elements of buildings
E-mail: karta3@mail.ru

Diakov Michael I.

Crimean Federal University named after V.I. Vernadsky, Simferopol, Russia,
postgraduate student of the Department of Building Structures
E-mail: dyakov.info.aca@yandex.ru

В.И. КОЛЧУНОВ¹, Т.А. ИЛЬЮЩЕНКО^{1,2}, Н.В. ФЕДОРОВА¹,
С.Ю. САВИН¹, В.В. ТУР³, А.А. ЛИЗОГУБ³

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

²Курский государственный университет, г. Курск, Россия

³Брестский государственный технический университет, г. Брест, Республика Беларусь

ЖИВУЧЕСТЬ КОНСТРУКТИВНЫХ СИСТЕМ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ: АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ

Аннотация. Проблеме живучести конструктивных систем зданий и сооружений уделяется все больше внимания во всем мире. Предлагаемая обзорная статья направлена на систематизацию, обобщение и анализ новых результатов исследований по вопросам, относящимся к разработке расчетных моделей статического, динамического и статико-динамического сопротивления конструктивных систем зданий и сооружений в условиях особых и аварийных воздействий, а также критериев, применяемых при проверках их живучести в особых расчетных ситуациях. Приведен критический обзор-анализ зарубежных и отечественных публикаций по вопросам, касающимся постановочных и концептуальных подходов к оценке механической безопасности зданий и сооружений на этапах жизненного цикла и при аварийных ситуациях, силовых и средовых факторов сопротивления конструктивных систем зданий при динамических нагрузках в аварийных ситуациях, а также расчетных моделей сопротивления несущих систем в целом. Особое внимание уделено анализу работ, относящихся к оценке живучести конструктивных систем зданий и сооружений полу вероятностными (детерминированными), вероятностными методами и методом оценки рисков. В заключении статьи сформулированы основные выводы и возможные направления развития исследований.

Ключевые слова: живучесть, особое предельное состояние, критерии особого предельного состояния, механическая безопасность, оценка риска

V.I. KOLCHUNOV¹, T.A. ILIUSHCHENKO^{1,2}, N.V. FEDOROVA¹,
S.Y. SAVIN¹, V.V. TUR³, A.A. LIZAHUB³

¹Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

²Kursk State University, Kursk, Russia

³Brest State Technical University, Brest, Belarus

STRUCTURAL ROBUSTNESS: AN ANALYTICAL REVIEW

Abstract. The problem of robustness of structural systems of buildings and structures is receiving more and more attention in the publications of Russian and foreign authors. In this regard, the presented review article is aimed at systematizing, summarizing and analyzing new research results on issues related to the development of calculation models of static, dynamic and static-dynamic resistance of buildings structural systems under conditions of special and emergency impacts, as well as criteria, used when testing their robustness in special design situations, seems relevant. To achieve this goal, a critical review and analysis of foreign and domestic publications is provided on the issues of formulation and conceptual approaches to assessing the mechanical safety of buildings and structures at the stages of the life cycle of buildings and in emergency situations, force and environmental resistance factors of buildings structural systems under dynamic loads in emergency situations as well as calculation models of the resistance of load-bearing.

Particular attention in the scientific review is paid to the analysis of works related to assessing the robustness of buildings structural systems using semi-probability (deterministic), probabilistic methods and risk assessment methods. The main conclusions and possible directions for the development of these studies are formulated in the conclusion of the article.

Key words: robustness, special limit state, criteria for special limit state, mechanical safety, risk assessment.

© Колчунов В.И., Ильющенко Т.А., Федорова Н.В., Савин С.Ю., Тур В.В., Лизогуб А.А., 2024

Введение

Проблема обеспечения живучести конструктивных систем зданий и сооружений в особой расчётной ситуации и разработка методов их защиты от прогрессирующего (непропорционального) обрушения являются новым направлением общей теории конструктивной безопасности. В последние два-три десятилетия после ряда аварий, вызванных особыми воздействиями природного, техногенного и террористического характера, исследования в этом направлении все более интенсивно проводятся во всем мире. Одним из *первых* зарегистрированных примеров прогрессирующего обрушения было разрушение колокольной башни при соборе *St Mark's Campanile* в июле 1902 года из-за появления трещин в каменной кладке вследствие пожара. А одним из самых *известных* – обрушение части здания *Ronan Point* (Лондон, 1968г.) из-за взрыва бытового газа в квартире на 18 этаже. Среди других случаев прогрессирующего обрушения можно отметить следующие:

- разрушение федерального здания имени Альфреда Мара (*Murrah Federal Office Building*) в Оклахома-Сити, США 19 апреля 1995 г. из-за взрыва заминированного грузовика вблизи от здания, в результате чего элементы несущей системы получили серьезные повреждения (168 погибших);
- обрушение Квебекского моста в 1907 году в Канаде из-за ошибок, допущенных при расчетном обосновании проектных решений (75 человек погибло, 11 пострадало),
- разрушение кровли на Таганрогском металлургическом заводе в 1995 году в Ростовской области, в результате нарушения норм строительства, допущенных при возведении предприятия (14 человек погибло, 17 пострадало);
- обрушение покрытия «Трансвааль-парка» на юго-западе Москвы в 2004 году, вызванное ошибками, допущенными при проектировании (28 погибших);
- обрушение покрытия Басманного рынка в 2006 году из-за ошибок при проектировании, нарушений при эксплуатации здания (68 погибших);
- разрушение комплекса *Rana Plaza* в Бангладеше в 2013 году из-за нарушений при строительстве и эксплуатации (1134 погибших);
- обрушение 12-этажного отеля в *Surfside Beach*, Флорида в 2021 году из-за нарушений при эксплуатации и коррозионного повреждения конструкций (98 погибших).

В результате расследования причин этих и других обрушений были накоплены знания о феномене прогрессирующего обрушения. Опубликованы российские и зарубежные обзорно-аналитические работы [1,2,3], в которых выполнена систематизация и обобщение используемой терминологии, классификация типов прогрессирующего обрушения, анализ существующих концептуально-методологических подходов к обеспечению конструктивной безопасности, представлены экспериментально-теоретические исследования сопротивления железобетонных конструктивных систем локальным повреждениям и отказам.

В то же время, постоянно появляются новые виды угроз, приводящих к локальным повреждениям и разрушениям в несущих системах зданий. В связи с отмечаемым в последние годы применением в вооруженных конфликтах беспилотных летательных аппаратов возрастает актуальность решения задач защиты от прогрессирующего обрушения несущих систем существующих зданий и сооружений. В частности, обрушение секции жилого здания в Белгороде (рисунок 1) является не только результатом террористической атаки, но и следствием отсутствия специальных конструктивных мероприятий по защите от прогрессирующего обрушения, поскольку здание было спроектировано и построено до введения соответствующих нормативных документов. Всё это требует переосмысления имеющегося опыта, выработки новых и совершенствования существующих подходов к обеспечению механической безопасности конструктивных систем зданий при особых

воздействиях с учетом возможности появления новых угроз в течение срока эксплуатации зданий и сооружений.



Рисунок 1 – Общий вид разрушенной секции жилого здания по ул. Щорса в г. Белгороде в результате террористической атаки 12 мая 2024 г.

В научной литературе и нормативных документах выделяется несколько подходов к решению проблемы снижения риска прогрессирующего разрушения. Согласно [7], можно выделить прямой и не прямой (косвенный) методы проектирования для обеспечения живучести конструктивных систем зданий. Прямое проектирование можно разделить на метод альтернативного пути передачи нагрузки (*Alternate load path method*), при котором конструктивная система должна сохранить живучесть после выключения одного из несущих элементов. В нормах некоторых зарубежных стран также используется метод локального сопротивления (*Specific load resistance method*), при котором ключевые элементы должны сохранить несущую способность после аварийного воздействия на них.

Непрямые методы включают превентивные мероприятия, предусматриваемые при проектировании зданий и сооружений и способствующие повышению защиты от прогрессирующего обрушения, в том числе контроль доступа, специальные устройства, ограничивающие подъезд к зданиям автомобилей и другой техники и др.

В исследованиях [8,9] рассмотрены различные методы и подходы прямого проектирования, используемые для предотвращения прогрессирующего обрушения вследствие отказа или повреждения одной из несущих конструкций. В [10] рассмотрено усиление элементов каркаса здания с помощью стальных пластин для обеспечения живучести конструктивной системы при отказе одной из колонн. В [11] показано, что конструктивные мероприятия по обеспечению сейсмостойкости несущих систем зданий оказывают благоприятное влияние и на сопротивление прогрессирующему обрушению.

Применительно к железобетонным каркасам многоэтажных зданий существует несколько подходов к решению проблемы обеспечения защиты от прогрессирующего обрушения. К ним относятся увеличение сечений несущих элементов каркаса здания [12], интенсивности и схемы их армирования [13], постановка дополнительных элементов в виде системы связей [5, 14, 15], исключение односторонних связей в соединениях элементов [16] и др.

Разработка теории живучести конструктивных систем зданий и сооружений связана с накоплением статистических данных об особенностях отклика сооружений при отказе

отдельных конструкций или их элементов, с проведением и анализом результатов экспериментальных и численных исследований.

В связи с этим в настоящей статье приведен обзор-анализ результатов исследований (1) в области концептуальных подходов к оценке механической безопасности зданий и сооружений на этапах жизненного цикла и при аварийных ситуациях; (2) в области учета силовых и средовых факторов сопротивления конструктивных систем зданий динамическим догрузениям в аварийных ситуациях; (3) особенностей построения расчетных моделей сопротивления элементов, узлов и конструктивных систем в целом. Особое внимание в обзоре уделено анализу новых интенсивно развивающихся исследований, относящихся к оценке живучести конструктивных систем зданий и сооружений полувероятностными (детерминированными), вероятностными методами и методом оценки рисков.

Расчетные ситуации и методы защиты конструктивных систем зданий от прогрессирующего обрушения

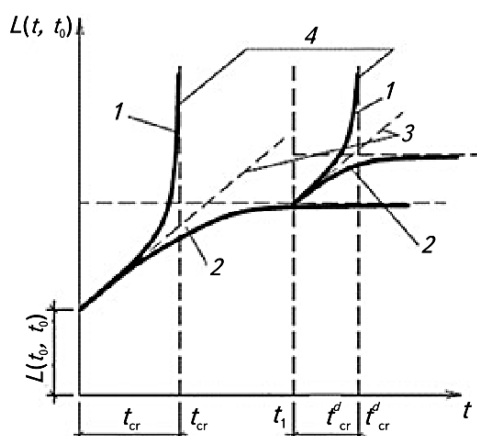
Согласно исследованиям [2, 7, 17] прогрессирующее обрушение может быть вызвано целым рядом угроз, включая ошибки при проектировании, строительстве и эксплуатации, деградацию свойств материалов под воздействием окружающей среды и др. В работе [18] приведен анализ аварийных воздействий, согласно которому основными причинами, приводящими к прогрессирующему обрушению, являются нарушение правил эксплуатации, большие человеческие ошибки при проектировании и возведении, низкое качество изготовления строительных конструкций.

В настоящее время существует два подхода к проверке сопротивления конструктивных систем зданий и сооружений особым или аварийным воздействиям. Первый подход – традиционный, применяется, когда известна или установлена величина и место приложения особого воздействия (проектный сценарий, основанный на идентифицированных воздействиях). Для этого случая разработана методика и исходные данные приведены в нормативном документе [19]. Однако в связи с постоянным ростом потенциального числа угроз, приводящих к начальному локальному разрушению/отказу этот подход не представляется перспективным. Второй и наиболее часто встречающийся подход – проектирование защиты от прогрессирующего обрушения, когда величина, направление, время приложения и продолжительность действия особого или аварийного воздействия неизвестны. Применительно к этому случаю принят ситуационный подход, предполагающий рассмотрение вторичной расчетной схемы сооружения, в которой рассматривается по отдельности последовательное удаление одного из несущих элементов. При этом проверка живучести поврежденной конструктивной системы должна показать, что не произойдет разрушения в «зоне возможного локального разрушения» [20] и тем более прогрессирующего (непропорционального) обрушения всего здания или большей его части. При таком расчете проверяется соответствие конструкций требованиям и критериям особого предельного состояния. Расчетный анализ защиты от прогрессирующего обрушения согласно [20, 21, 22, 23] может быть произведен в статической постановке (NLS-нелинейная статика), либо кинематическим методом теории предельного равновесия, а также в динамической постановке (NLD- нелинейная динамика).

В работе [24] показано, что при проверке особого предельного состояния эксплуатируемых зданий и сооружений появляется необходимость учета дополнительных особенностей, таких как изменение свойств материалов, схем приложения воздействий, длительности эксплуатации конструктивных систем, наличия сформировавшегося напряженно-деформированного состояния в несущих элементах к моменту реализации особой расчетной ситуации. К исследованиям в этом направлении можно отнести публикации Г.А. Гениева, А.В. Забегаева, Э.Н. Кодыша, В.И. Колчунова, А.Г. Тамразяна, Н.В. Федоровой, Važant Z.P., Li S. В них рассматриваются вопросы статической и динамической прочности,

устойчивости и надежности железобетонных конструкций. При этом в качестве наиболее часто применяемых физических моделей силового сопротивления железобетона здесь используются модели жесткопластического типа, каркасно-стержневые, блочные и другие. В работе [25] сформулированы отдельные направления развития деформационных моделей теории железобетона при особых воздействиях, представлена общая модель кинетики неравновесных процессов деформирования бетона при внезапных структурных перестройках, связанных с внезапным изменением уровня напряженного состояния (рисунок 2).

В исследованиях В.М. Бондаренко, Вл.И. Колчунова [26] развивается общая теория расчета железобетонных конструкций с учетом совместного влияния различных факторов. В этом направлении можно также отметить работы [27,28], в которых предложена достаточно эффективная расчетная модель квазисплошного тела, обеспечивающая устранение разрыва в функции жесткости после образования трещин в железобетоне. За расчетное принимается не сечение с трещиной, а сечение между трещинами с линейным распределением деформаций в сечении по его высоте. Однако данные модели не учитывают специфику поведения конструкций при особых и аварийных воздействиях, когда возникает запредельное или, следуя российским нормам, особое предельное состояние в конструктивных системах. Учет режима нагружения при структурной перестройке, вызванной начальным повреждением или разрушением выполнен в работе [3]. В зарубежных исследованиях [29,30] оценивается также влияние мембранного, цепного эффекта при внезапном удалении из конструктивной системы несущей колонны.



1 – кинетика неустойчивого состояния $m < 0$ и $\sigma_b > R_f$; 2 – кинетика безразличного состояния $m = 0$ и $\sigma_b = R_f$; 3 – область устойчивого состояния $m \geq 1$ и $\sigma_b \leq R_f$; 4 – асимптота по L

Рисунок 2 - Схема кинетики неравновесного процесса деформирования бетона в зависимости от знака и величины параметра m , согласно работе [25]

В российских и зарубежных нормативных документах [19, 21, 22, 31] устанавливаются требования по обеспечению живучести зданий и сооружений при гипотетическом удалении одного из несущих элементов. При проектировании многоэтажных зданий чаще всего в качестве таких элементов выступают угловые колонны и колонны средних рядов здания.

В-строительной отрасли, в отличие от авиастроения и кораблестроения, до настоящего времени нет устоявшегося определения термина «живучесть». В авиационных конструкциях это понятие уже широко используется в научных публикациях и включено в нормы [32]. Согласно [32] «под живучестью понимают свойство объекта, состоящее в его способности противостоять развитию критических отказов из-за дефектов и повреждений при установленной системе технического обслуживания и ремонта, или свойство объекта сохранять ограниченную работоспособность при воздействиях, не предусмотренных

условиями эксплуатации, или свойство объекта сохранять ограниченную работоспособность при наличии дефектов или повреждений определенного вида, а также при отказе некоторых компонентов».

Что касается строительных конструкций, зданий и сооружений, то в работах [0, 5, 6] под живучестью понимается *«характеристика сопротивляемости конструктивной системы прогрессирующему разрушению при внезапных особых (запроектных) воздействиях»*. В качестве количественной меры, характеризующей способность системы сопротивляться прогрессирующему обрушению, может быть использован относительный индекс живучести *RPI*, предложенный Fallon et al. [153]:

$$RRI = \frac{\lambda_{damaged} - \lambda_{design}}{\lambda_{intact} - \lambda_{design}}; \quad (1)$$

$$\lambda_{damaged} = \frac{L_{damaged}}{L_{design}}, \quad \lambda_{intact} = \frac{L_{intact}}{L_{design}},$$

где L_{design} – проектная нагрузка, L_{intact} – несущая способность неповрежденной конструктивной системы по первичной расчетной схеме, $L_{damaged}$ – несущая способность поврежденной несущей системы по вторичной расчетной схеме.

Параметры $\lambda_{damaged}$ и λ_{intact} являются множителями к проектной нагрузке, аналогичные параметру λ по работе [5]. Поиск значений параметров осуществляется в предположении, что несущая способность конструктивной системы здания исчерпана, если в ее первичной (применительно к λ_{intact}) или модифицированной в результате удаления несущего элемента расчетной схеме (применительно к $\lambda_{damaged}$) наблюдаются вторичные разрушения. При этом для конструкций перекрытий допускается разрушение одного или нескольких сечений по длине элемента при условии частичного сохранения несущей способности за счет перехода к мембранному или цепному механизму сопротивления.

Методы проверки живучести конструктивных систем зданий и сооружений

Согласно исследованиям [6] для проверок живучести конструктивных систем в особых расчётных ситуациях применяют следующие методы: полу вероятностный метод частных и глобальных коэффициентов; полностью вероятностные; методы, основанные на систематической оценке рисков.

В тех случаях, когда параметры воздействий и сопротивления элементов конструктивной системы при рассматриваемой особой расчетной ситуации наперед известны, расчет на прогрессирующее обрушение в нелинейной постановке можно рассматривать как детерминированный или полувероятностный. При этом надежность конструкций при проектировании обеспечивается путем введения системы частных коэффициентов (коэффициенты надежности по нагрузке, по материалу, коэффициент условия работы) [34]. Такая ситуация возможна при проектировании и реконструкции зданий и сооружений, когда геометрические параметры конструкций, прочность и деформативность материалов могут быть установлены в результате обследования. Однако на практике значения ряда параметров, как правило, не могут быть однозначно установлены заранее, что требует вариации расчетных моделей для различных аварийных расчетных ситуаций с целью выявления среди них наиболее невыгодных, т.е. нельзя получить ответ на вопрос о том, какова вероятность безотказной работы конструкции в данный промежуток времени. Поэтому дальнейшее развитие теории расчета конструктивных систем связано с вероятностными методами прогнозирования их живучести, к которым можно отнести нормируемые значения допустимых мер надёжности, применяемые при оценке живучести конструктивных систем при особых и аварийных воздействиях. Хотя следует заметить, что понятия «живучесть» и «надежность» технических систем не эквивалентны [33, 35].

В последние годы всё большую актуальность приобретает вероятностный метод, который во многих исследованиях предлагается использовать для количественной оценки безопасности конструкций зданий и сооружений при внезапном выключении из работы одного из несущих элементов. Так, в работе [33, 34, 36] рассмотрены методы теории вероятности технических и строительных систем и показана возможность применения теории случайных процессов к решению ряда задач теории надежности.

В работе [37] Тур В.В. и Надольский В.В. говорят о несовершенстве результата, полученного через численное моделирование, который содержит неопределенности, обусловленные идеализациями и упрощениями, принятыми в процессе создания модели. Они предлагают для их учета и обеспечения требуемого уровня надёжности разработать формат проверки безопасности с соответствующими значениями частных и глобальных (при выполнении нелинейных расчётов) коэффициентов безопасности.

Вероятностная оценка риска для многоэтажных зданий, подвергающихся особым воздействиям рассмотрена в исследовании Bassam A. и других [38]. Здесь была применена схема определения вероятности событий на основе модели, включающей основные требования описания неопределенности особых воздействий, связанного с ними локального разрушения, а также последствий прогрессирующего обрушения. Упрощенный вариант вероятностной оценки железобетонных рамно-стержневых конструктивных систем при внезапном удалении несущей колонны с учетом возникающих динамических эффектов предложен в исследовании [40]. В [41] для оценки сопротивления конструктивной системы в особой расчетной ситуации используется индекс надежности (R_i).

В исследовании [42] приведена методика расчета железобетонных конструктивных систем, учитывающая риски финансовых потерь, связанных с возможным возникновением аварийной ситуации в результате выключения из работы несущего элемента. Здесь, на основе метода конечных элементов предложены упрощенные подходы, позволяющие моделировать горизонтальное воздействие с последующим полным или частичным исключением из эксплуатации части бетонного сечения.

В настоящее время во многих зарубежных исследованиях используется метод симуляций Монте-Карло. В работах [38, 44, 45] рассмотрен вероятностный подход к оценке живучести на основе метода Монте-Карло для выполнения анализа конструкций, в котором учтены вероятностные формулировки моделей нагрузок и воздействий, силового сопротивления материалов, наличие возможных ошибок и неопределенностей в расчетных моделях.

Однако использование метода Монте-Карло предполагает решение задачи живучести численным методом. В отличие от этого метода в работе Г.А. Гениева [47] построена аналитическая расчетная модель и алгоритм оптимизации параметров живучести железобетонных балочных и стержневых систем в особых предельных состояниях при внезапном (хрупком) выключении в них отдельных связей или сечений и показана возможность использования метода прямого аналитического анализа в замкнутом виде. Предлагаемая в работе [47] методика оптимизации параметра живучести железобетонных стержневых конструктивных систем строится на основе принципа эквиградиентности Г.А. Гениева [48] и применения прямого метода вероятностного анализа, позволяет учитывать изменчивость свойств материалов, характеристик сечений, нагрузок и других факторов, определяющих несущую способность конструкций.

В [47] исследовано влияние топологии конструктивных систем на их живучесть в особой расчетной ситуации на примере шпренгельной фермы. Варьируя углом наклона крайних стержней α , определена вероятность неразрушения конструкции фермы при удалении стойки шпренгеля (рисунок 3).

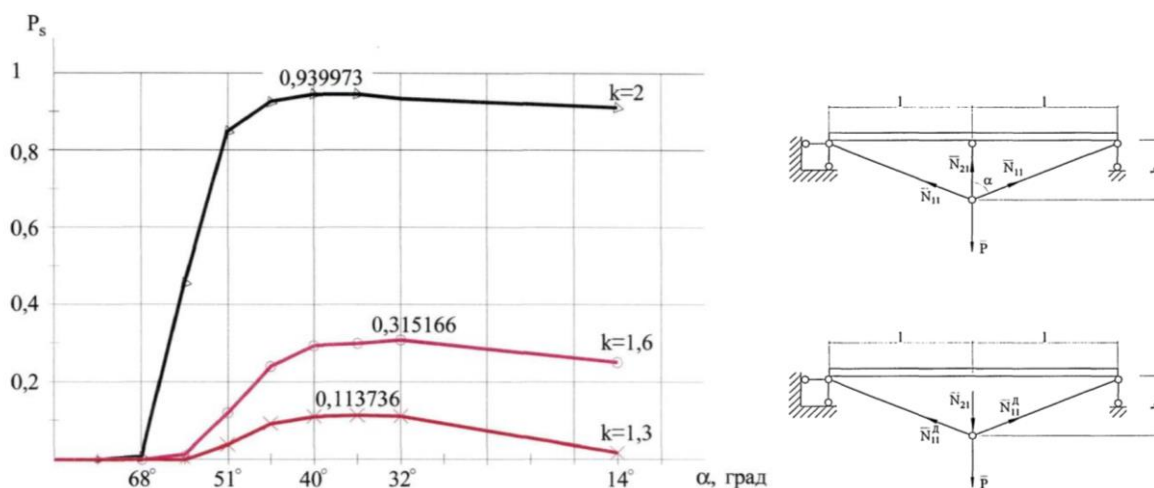


Рисунок 3 - Графики изменения вероятности неразрушения фермы в предельном состоянии при варьировании угла наклона раскосов согласно [48]

Оценка риска и надежности конструктивных систем зданий и сооружений при особых и аварийных воздействиях является третьим подходом в классификации [6] для измерения живучести. Согласно [49] под риском понимается вероятностная мера опасности, установленная для данного объекта в виде возможных потерь за определенный период времени (рисунок 4). В зависимости от закона распределения времени безотказной работы применяют расчеты надежности при экспоненциальном, нормальном, вейбулловском и других законах распределения [50]. В простейшем варианте [49] риск отказа, обусловленного опасностью H определенной интенсивности, может быть определен по формуле (2):

$$P(F) = P(H) \cdot P(F|H), \quad (2)$$

где $P(F)$ – вероятность риска, $P(H)$ – вероятность(частота) появления опасности, $P(F|H)$ – условная вероятность отказа.

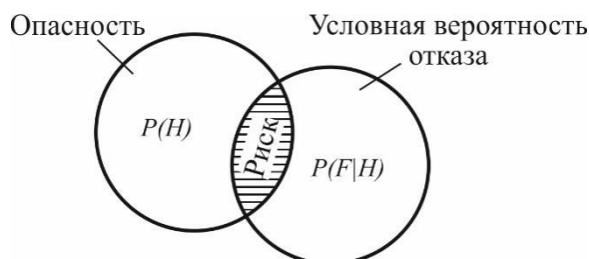


Рисунок 4 - Геометрическая интерпретация понятия риска согласно [49]

Следует также отметить, что в анализируемом исследовании [6] предлагается оценка как прямого риска, связанного с прямыми последствиями, так и косвенного риска, соответствующего косвенным последствиям. Кроме того, в этой работе предложен индекс живучести, определяемый на основе прямого и косвенного риска, и принимающий значения от 0 до 1, где 0 – соответствует потере живучести конструктивной системой.

В нормативном документе США ASCE 76—23 [21] принята схожая с рассмотренной в работе [6] формула для оценки прямого риска:

$$R_{Dir} = P(E) \times P(D|E) \times P(\bar{C}|D) \times C_{Dir}, \quad (3)$$

где $P(E)$ — вероятность возникновения события, которое может привести к повреждению конструкции; $P(D|E)$ – условная вероятность повреждения конструкции с учетом воздействия

на нее E ; $P(C|D)$ — вероятность разрушения при условии повреждения D , C_{Dir} — прямые последствия соответственно. По величине риска и в зависимости от принятой категории риска здание относят к одной из 4-х категорий стойкости к прогрессирующему обрушению.

Согласно нормативным документам Республики Беларусь [52,53] проектирование строительных конструкций необходимо выполнять на основе целевых значений уровней надежности, выраженных в допустимых значениях индексов надежности или же эквивалентных им вероятностей отказа. В [53] приведены допустимые значения риска для разработанных и разрабатываемых расчетных моделей.

В ТКП EN 1990-2011 [54] рассмотрены значения индекса надежности в зависимости от параметра нагружения для изгибаемого железобетонного элемента при значении процента армирования 1%, основанные на применении формулы [53]. В результате были выявлены несоответствия в концепции надежности для периодов отнесения (базовых периодах) 1 год, 20 и 50 лет, соответственно.

В исследовании В.И. Колчунова, В.В. Тура [55] рассмотрены предложения, относящиеся к проблеме рисков конструктивных систем при особых воздействиях на вероятностной основе и предложено нормативно устанавливать допустимые меры надежности, выраженные в целевых значениях вероятностей отказа (индексов надежности). Отмечено также, что для оценки живучести вероятностным методом недостаточно имеющихся результатов экспериментальных исследований.

Что касается зарубежных исследований, можно отметить работу Fu and Frangopol [56], в которой был предложен параметр оценки живучести конструктивной системы, основанный на соотношении вероятностей отказа поврежденных и неповрежденных конструкций. Chen Y, Yang G. P и др. [57] оценили коэффициент надежности для каждого элемента конструктивной системы, связав ее несущую способность до особого воздействия с несущей способностью после внезапного удаления одного из элементов.

Подходы, основанные на риске, учитывают не только вероятность, но и последствия прогрессирующего обрушения. Учет потенциальных потерь является важным показателем по сравнению с полувероятностными коэффициентами и коэффициентами, основанными на надежности, но требуют дополнительных вычислений, основанных на риске. Одной из первых зарубежных работ, в которой был предложен параметр живучести, как параметр, определяемый соотношением между прямыми и косвенными рисками повреждения конструктивной системы, была, судя по публикациям, работа [58]. Здесь, под косвенным риском подразумевается риск последствий от прогрессирующего обрушения, поэтому надежность системы определяется совокупностью этих двух видов рисков.

В недавно проведенном исследовании [59] представлена оценка риска прогрессирующего обрушения на примере рамной конструктивной системы при особом воздействии. Повреждение конструктивной системы включало в себя разрушение балок от образования пластических шарниров и разрушение одной или нескольких колонн. Сравнивались параметры живучести конструкций, полученные в результате расчета методом альтернативного пути (*Alternate Path Method (APM)*) [21] и на основе метода оценки риска для различных уровней вероятности отказа, предложенного в работе [57]. В рамках принятых в исследовании ограничений метод оценки риска позволил получить более высокие значения параметра живучести рассматриваемых конструкций, чем при использовании метода альтернативного пути передачи нагрузки.

Механизмы сопротивления конструктивных систем зданий прогрессирующему обрушению

В обзорно-аналитической работе [1] выделено несколько механизмов прогрессирующего разрушения несущих систем зданий и сооружений после появления начального локального разрушения (рисунок 5, а): «застежка – молния» (zipper-type) (рисунок 5, б), «пирог» (pancake-type) (рисунок 5, в), «домино» (рисунок 5, г) и их комбинацию.

Однако реализации любого из перечисленных механизмов распространения разрушений во многих случаях предшествует разрушение конструкций над удаленным элементом (связью), в так называемой зоне возможного локального разрушения. Поскольку в нормативных документах [2,3] распространение цепочки отказов несущих элементов за пределы локальной зоны разрушения считается недопустимым, то значительное число исследований механизмов сопротивления прогрессирующему обрушению, представленные в научной литературе сконцентрированы на анализе деформирования и разрушения подконструкций, ограниченных 1-2 пролетами и 1-2 этажами над удаленной конструкцией (связью).

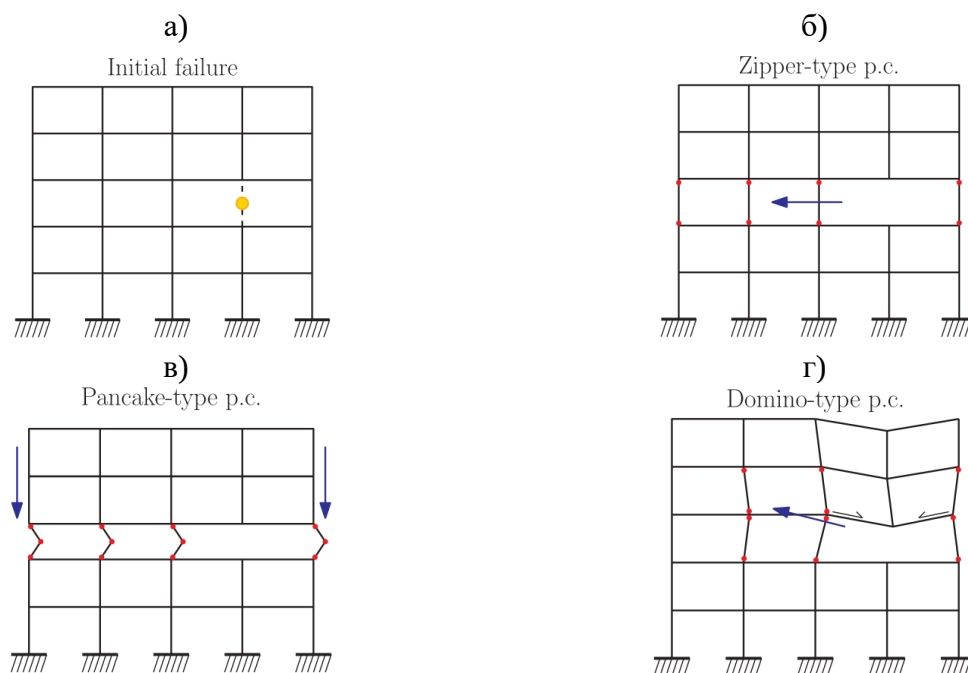


Рисунок 5 - Наиболее распространенные механизмы прогрессирующего обрушения каркасов зданий и сооружений: initial failure (а); zipper-type (б), pancake-type (в), domino-type (г)

Так, в работах [4,5] выделено три основных механизма сопротивления прогрессирующему обрушению для элементов перекрытий и покрытий:

- арочный / оболочковый (рисунок 6, а);
- цепной / мембранный (рисунок 6, б);
- ферма Виренделя.

Almusallam и другие [63] отмечают, что реализация тех или иных механизмов сопротивления зависит от многих факторов. Ими исследовано влияние величины усилий в колоннах многоэтажного каркаса здания на реализацию арочного механизма сопротивления разрушению. Показано, что при недостаточной жесткости поперечных сечений колонн арочный и вантовый механизмы сопротивления разрушению могут не реализоваться. В целом, рассмотренные выше механизмы разрушений элементов конструктивной системы после выключения одного из её несущих элементов связаны с исчерпанием прочности ряда сечений.

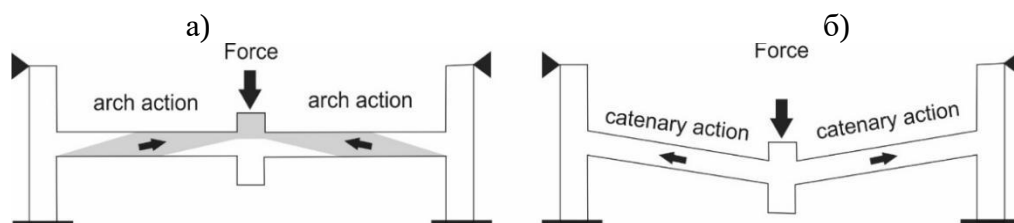


Рисунок 6 - Механизмы сопротивления прогрессирующему разрушению конструкций перекрытий и покрытий: а) арочный / оболочковый; б) цепной / мембранный

В дополнение к проверке прочности сечений элементов в нормах UFC-4-023-03 [6] предусмотрены дополнительные требования по проверке механизма разрушения, связанного с потерей устойчивости с учетом эффектов от геометрической нелинейности первого рода (или Р-Δ эффектов, следуя терминологии, принятой в документах [6,7]). Как отмечается в нормативном документе ACI-318-19 [7] влияние геометрической нелинейности мало для большей части железобетонных конструктивных систем и их элементов и начинает сказываться на характере деформирования и разрушения по мере роста гибкости конструктивных элементов. Abdelazim W, Mohamed H, Benmokrane в работе [8] для бетонных колонн круглого сечения, армированных стеклопластиковой арматурой, отмечают, что гибкость $\lambda = 50$ является пороговым значением, после которого разрушение колонн по материалу (исчерпание прочности сечений) сменяется разрушением от потери устойчивости. Если для внецентренно сжатых элементов с гибкостью $\lambda < 50$ точка предельного равновесия на диаграмме «продольная сила – изгибающий момент» лежит на линии, соответствующей прочности сечений (т.е. $\lambda = 0$), то с увеличением гибкости разрушение происходит при значениях усилий меньших, чем из условия прочности сечений (рисунок 7). При этом авторы отмечают, что полученные ими границы существенно отличаются от полученных для железобетонных колонн [9].

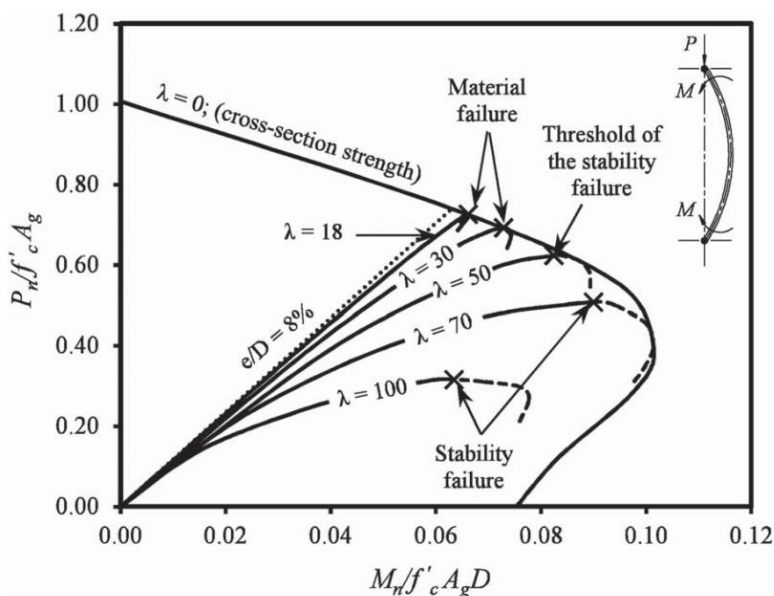


Рисунок 7 - Границы разрушения внецентренно сжатых бетонных колонн, армированных стеклопластиковой арматурой от исчерпания прочности сечений и потери устойчивости согласно [8]

Российские нормы СП 385.132580.2018 (Изм. №2, №3) [3] не дают четкого разделения механизмов разрушения элементов, оперируя интегральным понятием несущей способности, включающем в себя как разрушение от потери прочности, так в связи с потерей устойчивости или приобретением геометрической изменяемости конструктивной системы. Для железобетонных сжатых и внецентренно сжатых элементов СП 63.13330.2018 в п. 5.2.9

указывает на необходимость учета влияния продольного изгиба, что может быть классифицировано как учет Р-Δ эффекта в терминах нормативных документов [6,10]. Однако приведенные в СП 63.13330.2018 формулы учитывают лишь увеличение изгибающих моментов вследствие продольного изгиба и не учитывают снижение несущей способности в зависимости от гибкости элементов и переход к потере устойчивости для элементов с большой гибкостью, при том, что предельная гибкость для железобетонных колонн зданий в п. 10.2.1 ограничена $\lambda = 120$ (для сравнения, ACI 318-19 [7] устанавливает ограничение $\lambda = 100$ в связи с потерей устойчивости элементов). Применительно к расчету железобетонных несущих систем на прогрессирующее обрушение в СП 63.13330.2018, п. В.10 установлено требование обеспечить в том числе устойчивость формы конструктивной системы в целом при выходе из строя одного из её элементов (начального локального разрушения).

При аварийных ситуациях, вызванных внезапным удалением из каркаса здания одного из несущих элементов, в сечениях внецентренно сжатых конструктивных элементов (колонны, пилоны, раскосы и пояса ферм и т.д.) вследствие резкого роста эксцентриситетов приложения нагрузок может быть реализовано напряженно-деформированное состояние более невыгодное по сравнению с их НДС на стадии нормальной эксплуатации от действия основных и особых сочетаний нагрузок по СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия». К ухудшению условий силового сопротивления таких конструктивных элементов приводит также деградация условий их закрепления в процессе аварийного догружения или увеличение расчетных длин при удалении раскрепляющего конструктивного элемента. В тех случаях, когда догружаемые в результате аварийной ситуации внецентренно сжатые элементы конструктивной системы обладают «изящным» сечением (например, при применении высокопрочного железобетона), либо приобрели средовые (коррозия) или механические (сколы, погиби) повреждения в процессе эксплуатации, в качестве возможного сценария истощения их несущей способности может стать потеря устойчивости.

Экспериментальные исследования В.И. Колчунова и Н.О. Прасолова [11], выполненные на масштабных моделях плоских железобетонных рам каркасов зданий, продемонстрировали возможность реализации данного сценария разрушения конструктивных элементов при внезапном удалении связей в сжатой колонне. Однако конструктивные особенности испытанной модели и параметры воздействия охватывают ограниченную область конструктивных решений каркасов зданий и возможных начальных локальных разрушений. В связи с этим требуются дополнительные экспериментальные исследования живучести железобетонных рам других конструкций при запроектных воздействиях, вызванных внезапным отказом одного из несущих элементов, для получения дополнительных данных о характере их деформирования и разрушения.

Анализ критериев особого предельного состояния

Для оценки несущей способности конструкций в запредельных состояниях, вызванных внезапным исключением одного из несущих элементов конструктивной системы в СП 385.1325800.2018 введено понятие особого предельного состояния. В зарубежных нормативных документах, например, [6,12,13] для оценки сопротивления конструкций прогрессирующему обрушению используется термин “ultimate limit state”, что можно перевести как «предельное состояние несущей способности». Однако применительно к расчету на прогрессирующее обрушение в документе вводятся дополнительные условия, ограничения и расчетные ситуации, что отличает «предельное состояние несущей способности» при оценке сопротивления несущих систем прогрессирующему обрушению от «предельное состояние несущей способности» при оценке несущей способности элементов конструкций, эксплуатируемых в нормальных условиях, и делает их более близким к особому предельному состоянию ГОСТ 27751-2014 [14]. В этой связи выделение особого предельного

состояния в СП 385.1325800.2018[3] и ГОСТ 27751-2014 [14], учитывая принятую в России методологию нормирования первой и второй групп предельных состояний и физический смысл рассматриваемого явления представляется оправданной и целесообразной. В качестве критериев особого предельного состояния в СП 385.1325800.2018 приняты предельные деформации в сечениях элементов несущей системы, а также предельные прогибы элементов. В отличие от норм на проектирование конструкций для целей нормальной эксплуатации критерии несущей способности для особого предельного состояния установлены по нормативным характеристикам прочности и деформативности материалов, а для случая внезапного начального разрушения, приводящего к динамическому догружению сохранившихся конструкций допускается учитывать динамическое упрочнение материала путем умножения его нормативного сопротивления на соответствующий коэффициент, приведенный в нормативном документе.

Следуя СП 385.1325800.2018, прогибы изгибаемых элементов конструктивной системы для особого предельного состояния при условии обеспечения минимально допустимой длины зоны опирания и анкеровки растянутой арматуры не должны превышать $1/30$ длины пролета, за исключением железобетонных конструкций, армированных высокопрочной арматурой с условным пределом текучести, для которых прогибы не должны превышать $1/50$ длины пролета. Нормы UFC-4-023-03 [6] и GSA-2016 [12] в качестве критериев «предельного граничного состояния» устанавливает предельные деформации и усилия в сечениях элементов, а также в качестве интегрального параметра для железобетонных балочных конструкций - углы поворота при упруго-пластическом деформировании.

В [43] отмечается, что при применении нелинейных расчётов не корректно опираться на характеристические(нормативные) свойства материалов, т.к. это ведёт к искажению матрицы жесткостей. В СП 5.03.01 полная диаграмма деформирования, используемая в нелинейных расчётах, опирается на средние (наиболее вероятные) характеристики свойств материалов.

В представленных в научной литературе исследованиях, как правило, в качестве критериев исчерпания несущей способности используются предельные деформации материалов с учетом влияния скорости деформаций [15–17].

Применительно к железобетонным элементам, на деформирование и разрушение которых существенное влияние оказывают эффекты, обусловленные большой гибкостью и, вследствие этого, геометрической нелинейностью нормы [6,7,12] предусматривают проверку критериев, связанных с устойчивостью, поскольку разрушение элементов может происходить при усилиях меньших, чем прочность сечений. При этом в качестве критерия предельного граничного состояния (аналог особого предельного состояния по [14]) устанавливается 5% снижение несущей способности элемента по продольному усилию (рисунок 7). Европейские нормы допускают 10 % снижение несущей способности элемента по продольному усилию при учете эффектов, вызванных геометрической нелинейностью. Российские нормы СП 63.13330.2018 предусматривают расчет железобетонных элементов с учетом физической, геометрической и конструктивной нелинейности, однако в качестве критериев несущей способности устанавливают преимущественно критерии, связанные с прочностью сечений.

В научной литературе по вопросу устойчивости железобетонных внецентренно сжатых элементов [18,19] и, в более общем случае, стержневых элементов из упругопластических материалов [19,20] предлагается использовать критерий нулевой отпорности $dP/df = 0$ (рисунок 8). Под отпорностью понимается способность сечения, элемента или системы противодействовать возмущениям состояния равновесия.

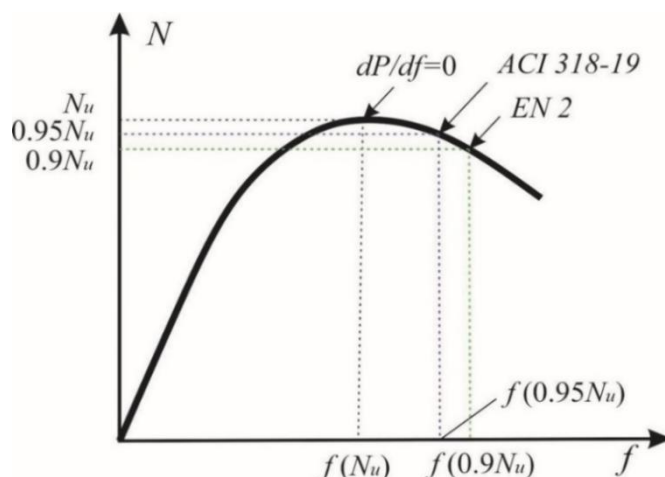


Рисунок 8 - Критерии несущей способности элементов при потере устойчивости

В работах Санжаровского Р.С. [21] на основе допущения о характере деформирования стержневого элемента по полуволне синусоиды получено решение задачи для условий нелинейной ползучести, а также на основе критерия нулевой отпорности даны предложения по оценке несущей способности элементов при их динамическом нагружении [18]. Следует заметить, что при возникновении начального локального разрушения в несущей системе эксплуатируемого здания длительное силовое сопротивление внецентренно сжатых элементов резко сменяется их сопротивлением динамическому нагружению без предварительной разгрузки [22,23]. Комплексное исследование проблемы в такой постановке, по-видимому, в научной литературе отсутствует.

В работе Голышева А.Б. и др. [19] указывается на необходимость учета не только физической, но и геометрической нелинейности в расчетах внецентренно сжатых железобетонных элементов, а также даются конкретные рекомендации по определению жесткости сечений.

Подход, предложенный в работах Геммерлинга А.В. [20], предполагает оценку устойчивости равновесия деформированных состояний элемента с учетом первого и второго расчетных сечений, параметры которых устанавливаются для деформированных состояний с учетом секущего и касательного модулей деформаций. При этом потеря устойчивости предполагается в момент, когда происходит пересечение кривой деформирования по направлению характерного перемещения (для первого расчетного сечения) и кривой критических сил, определяемых для деформированных состояний элементов (для второго расчетного сечения). Следуя данному подходу, в качестве критериев несущей способности, связанных с потерей устойчивости формы, для отдельных элементов каркасов зданий можно рассматривать критическую силу N_{cr} , вычисленную для вторых расчетных сечений по формуле (4) (рисунок 9):

$$N \leq N_{cr}, \quad (4)$$

или другие производные от нее параметры (критическая жесткость, критический эксцентриситет).

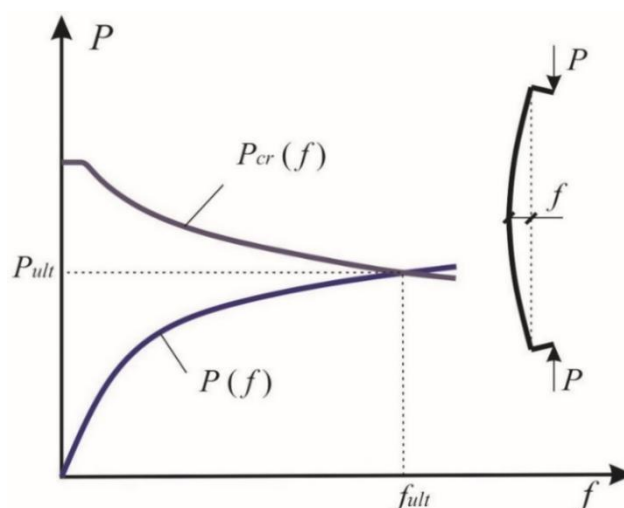


Рисунок 9 - Определение критической нагрузки при потере устойчивости согласно [20]

В работе [24] предложены критерии оценки закритической работы элементов из упругопластического материала при потере устойчивости, основанные на сопоставлении отпорности элемента и отпорности системы по направлению характерного перемещения. Если отпорность системы выше абсолютного значения отпорности элемента при его деформировании по ниспадающей ветви диаграммы, то процесс потери устойчивости происходит медленно, и система как бы поддерживает элемент, не способный воспринимать приращения продольных усилий. В противном случае потеря устойчивости согласно [24] будет происходить практически мгновенно - хлопком. Однако применительно к железобетонным элементам, учитывая их особенности, комплексных исследований в такой постановке, по-видимому, не проводилось.

Перельмутер А.В. [25] рассматривает возможность расширения применения критерия отпорности с учетом некоторых коэффициентов запаса для оценки несущей способности элементов при напряженно-деформированных состояниях отличных от продольного изгиба.

Для выявления наиболее опасных с точки зрения потери устойчивости элементов конструктивной системы могут быть использованы энергетические критерии, предложенные А.В. Александровым и В.И. Травушем [78], определяемые работой узловых изгибающих моментов и поперечных сил A (M , Q) в процессе изгиба (3).

Трекиным Н.Н. и Кодышем Э.Н. в работе [79] в качестве интегральных критериев особого предельного состояния изгибаемых железобетонных элементов каркасов зданий и сооружений рассмотрены деформационные критерии, ограничивающие относительные предельные прогибы конструкций $[f/l]$. Представляется, что подобные интегральные критерии могут быть также введены и для оценки особого предельного состояния внецентренно сжатых стержневых элементов железобетонных несущих систем. Однако деформирование, потеря устойчивости и разрушение таких элементов имеет свою специфику, которая должна быть учтена при построении деформационных критериев их особого предельного состояния. В частности, необходимо учитывать соотношения размеров и структуру сечений элементов конструктивной системы, условия сопряжения в узлах, а также соотношение усилий, действующих в элементе.

Подходы к моделированию несущих систем, уровни детализации моделей

Одним из эффективных инструментов исследования особенностей сопротивления конструктивных систем прогрессирующему обрушению является численное моделирование. В работах Белостоцкого А.М., Акимова П.А. и других [82,83] было проведено расчетное исследование параметров механической безопасности железобетонных высотных и большепролетных зданий с использованием программного комплекса ANSYS Mechanical.

Расчет на прогрессирующее обрушение проводился для сценария мгновенного выключения из работы угловой колонны первого этажа. По результатам расчета при принятой конструктивной схеме и принятым материалам железобетонные конструкции каркаса здания устойчивы к прогрессирующему обрушению (рисунок 10).

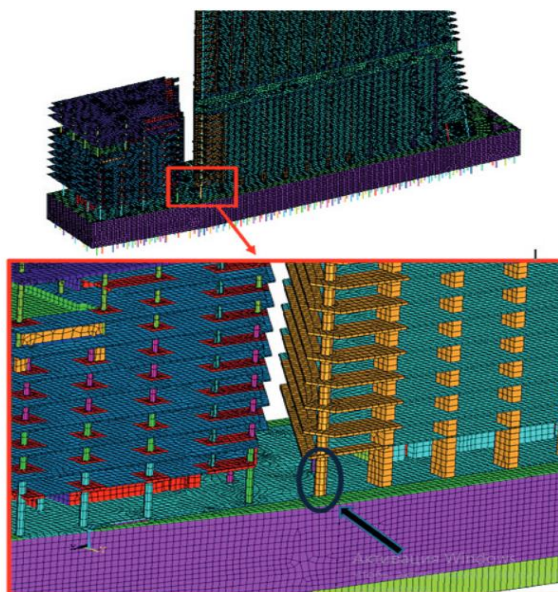


Рисунок 10 - Фрагмент конечноэлементной модели конструкций 400-метрового небоскреба

В исследовании Травуша В.И., Белостоцкого А.М. и других [84] разработана методика численного моделирования динамической реакции физически нелинейной пространственной системы «основание - высотное здание» на особое сочетание нагрузок, включающее интенсивное сейсмическое воздействие уровня максимальное расчетное землетрясение. Методика, реализованная с помощью верифицированного программного комплекса Abaqus, применена для конечноэлементного анализа проектного варианта 400-метрового небоскреба с несущими железобетонными конструкциями при 9,5 балльном сейсмическом воздействии (рисунок 11).

Применительно к железобетонному каркасу многоэтажного здания в публикации [85] представлены конечноэлементная модель и основные положения для расчета с использованием программного комплекса SCAD OFFICE.

Интересный вариант численного анализа влияния количества этажей в плоских железобетонных рамных каркасах на способность сопротивляться прогрессирующему разрушению при удалении колонны представлен в исследовании Marchis A. G., Botez M. D [86] и на его основе предложен упрощенный подход к определению максимальной нагрузки, которую могут выдержать плоские рамы каркаса без разрушения.

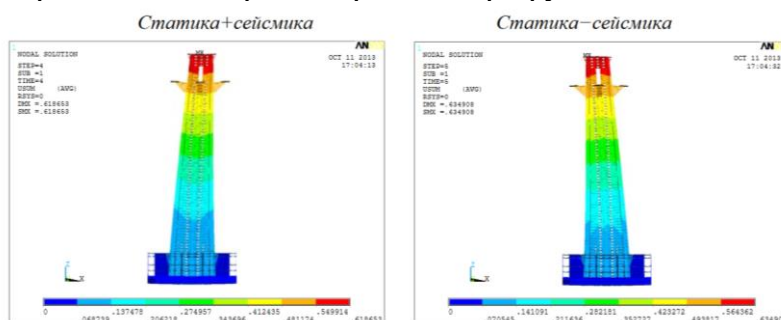


Рисунок 11 - Суммарные перемещения, м. Расчет на особое сочетание. Сейсмика ПЗ (8,5 баллов) по линейно-спектральной теории [84]

В работе Angew и Marjanishvili [87] двухэтажная четырехпролетная железобетонная рама была смоделирована с использованием программного обеспечения конечных элементов SAP2000 (CSI, 2009) при удалении центральной колонны в линейной и нелинейной динамической постановке. На основе многочисленных расчетов сделан вывод о том, что динамический анализ более точен, так как прогрессирующее обрушение по физической сущности носит динамический характер. Этот метод моделирования использовался также и другими авторами, например, Kaewkulchai G [88], Izzuddin B.A [89]. Вместе с тем, нелинейный динамический расчёт имеет ряд серьёзных неопределенностей, включая историю нагружения, логарифмический декремент затухания.

Одним из важных параметров при оценке прогрессирующего обрушения конструкций по вторичной расчетной схеме является коэффициент динамичности. McKay [91] в своем исследовании смоделировал несколько железобетонных каркасов зданий для исследования этого коэффициента и по результатам исследования сделал важный вывод о том, что коэффициент динамичности может принимать различные значения в отличие от американских норм [64]. Также как и в исследованиях российских ученых [14], автором был предложен новый подход к принятию значения коэффициента динамичности для проектирования методом альтернативного пути передачи нагрузки (Alternate load path method).

Mohamed [92] исследовал поведение 8-этажного монолитного железобетонного каркаса здания в случае удаления угловой колонны. Согласно его исследованиям для предотвращения прогрессирующего обрушения путем увеличения интенсивности армирования, площадь арматуры потребовалось бы увеличить на 216%. В связи с этим были рассмотрена установка дополнительных связей для повышения сопротивления прогрессирующему обрушению. Mohamed также пришел к выводу, что трехмерное моделирование конструктивных элементов важно при учете в элементах каркаса кручения с изгибом. К последнему выводу пришел и Brain при исследовании двух- и трехмерной модели каркаса здания [93]

Fu [94] исследовал поведение 20-этажного каркаса здания с использованием Abaqus. При удалении из каркаса колонны он пришел к выводу о том, что ее удаление вызывает большее вертикальное смещение по мере увеличения этажности.

Salem смоделировал трехмерную модель многоэтажного железобетонного каркаса здания [95] с использованием метода прикладных элементов (Applied Element Method). После расчета на прогрессирующее обрушение был сделан вывод о том, что удалении одной колонны не приводит к прогрессирующему обрушению здания. Однако разрушение более одной колонны приводит к постепенному обрушению значительной части здания.

Анализируя результаты отмеченных и других исследований живучести конструктивных систем зданий и сооружений численными методами можно отметить, что их использование для такого анализа, особенно для сложных конструктивных систем из железобетона, сопряжено с определенными сложностями, связанными с учетом перераспределения усилий и деформаций при трещинообразовании. В связи с этим для дальнейшего развитие исследований может быть связано с применением численно-аналитических методов расчета, когда на первом этапе строится стержневая система, а на втором этапе детализируются напряженно-деформированное состояние фрагментов рам каркасов зданий в зонах возможного разрушения, как, например, это показано в работе [86].

Учет влияния факторов длительного силового и средового сопротивления эксплуатируемых зданий при оценке их живучести

Разрушения железобетонных конструкций несущих систем зданий и сооружений во многих случаях происходят по истечению нескольких лет, а в отдельных случаях - десятилетий с момента завершения их возведения и ввода в эксплуатацию. Обрушение эксплуатируемых зданий представляет наибольшую опасность, поскольку приводит к катастрофическим последствиям: значительному числу человеческих жертв и значительному материальному ущербу. В связи с этим при развитии расчетных моделей живучести зданий и

сооружений нормального и повышенного уровней ответственности на особые и аварийные воздействия неустановленной природы в рамках принятого в нормативных документах ситуационного подхода, на стадии расчетного обоснования принятых проектных решений по защите от прогрессирующего разрушения необходимо учитывать не только физическую нелинейность материалов и геометрическую нелинейность элементов при их кратковременном нагружении, но также и деформации ползучести, средовые или механические повреждения, накапливаемые при эксплуатации.

Для учета особенностей эксплуатируемых конструкций при расчете реконструируемых объектов в [98, 99] предложено, наряду с понятием «живучесть», ввести дополнительно понятие «экспозиция живучести». Под экспозицией живучести подразумевается продолжительность сохранения потенциала живучести строительной системы во времени при неравновесной постановке задачи, подразумевающей наложение и развитие во времени деформаций ползучести и коррозионных повреждений.

Теорией ползучести строительных материалов в разное время занималось большое количество ученых по всему миру. Среди них можно отметить работы Александровского С.В., Арутюняна Н.Х., Блинкова В.В., Бондаренко В.М., Васильева П.И., Гвоздева А.А., Маслова Г.Н., Прокоповича И.Е., Работнова Ю.Н., Ржаницына А.Р., Санжаровского Р.С., Улицкого И.И., Харлаба В.Д., Bažant Z.P., Dilger W. H., Gilbert R.I., Hamed E., Marzouk H, Rossi P. и многие другие. Все существующие теории ползучести носят феноменологический характер. Кроме того, судя по имеющимся публикациям, до настоящего времени не проведены экспериментальные исследования по решению задач сохранения потенциала живучести железобетонных конструктивных систем во времени с учетом накопления повреждений неравновесного характера. Отличие предложенных различных вариантов теории ползучести определяется видом зависимостей между напряжениями и деформациями. В исследовании [100] показано, что точность феноменологических теорий ограничивается точностью принятых допущений (гипотез), которые по мере накопления новых экспериментальных данных уточняются или отвергаются. Кроме того, в работе [100] на основе экспериментальных исследований характера деформирования железобетона во времени и характере перераспределения напряжений между арматурой и бетоном предложен метод прогнозирования перераспределения напряжений между бетоном, арматурой и герметичной облицовкой в сооружениях из железобетона.

В работе [101] систематизированы и классифицированы основные разновидности феноменологической теории ползучести на следующие категории: наследственная теория старения (теория упруго-ползучего тела) – НТС; теория упругой наследственности – ТУН; теория старения ТС и «модернизированная» теория старения – МТС, учитывающая частичную обратимость деформаций ползучести.

Среди относительно недавних исследований по теории ползучести А.Д. Бегловым и Р.С. Санжаровским [73] отмечено, что по существу в теории ползучести бетонных и железобетонных конструкций последовательно рассматриваются три основных проблемы. Первая проблема состоит в построении уравнений ползучести бетона при переменных (режимных) нагружениях. Вторая – в получении решения уравнения ползучести. Третья проблема заключается в расчете железобетонных конструкций при длительном нагружении, в том числе и при особом воздействии.

В работе [102], на основе теории линейной ползучести стареющего материала (модель Маслова – Арутюняна) с учетом формулы принятой в [103] построен график зависимости меры ползучести от времени нагружения (рисунок 12), который качественно совпадает с графиком, приведенным в работе [104]. В этой же работе построен алгоритм для определения меры ползучести коррозионно повреждаемого бетона и железобетона и определения параметра «экспозиция живучести» железобетонной статически неопределимой

конструктивной системы с учетом неравновесных и нелинейных процессов ее деформирования во времени и рассмотрен пример определения потенциала живучести однопролетной жестко защемленной железобетонной балки с позиции критерия особого предельного состояния. В исследовании [104] рассмотрено изменение деформаций и напряжений в изгибаемом железобетонном элементе при воздействии внешней нагрузки, как при кратковременном, так и при длительном нагружении с учетом времени воздействия. Показано, что в процессе эксплуатации железобетонных конструкций происходит изменение модуля упругости бетона относительно начального значения и одновременно, даже при неизменной нагрузке, происходит нарастание деформаций железобетонных конструкций, вызванное явлением ползучести. Методика позволяет прогнозировать состояние деформационных и прочностных характеристик в изгибаемой железобетонной конструкции в любой конкретный момент времени.

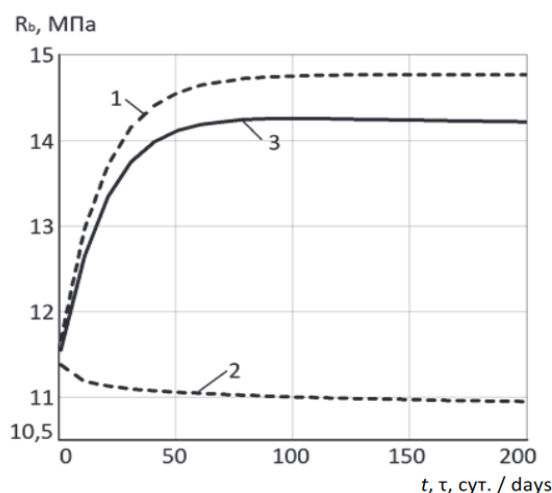


Рисунок 12 - График изменения предела прочности бетона R_b во времени согласно [102]: 1 – процесс нарастания прочности бетона во времени t (старение бетона); 2 – процесс нейтрализации бетона агрессивной средой во времени τ (коррозия бетона); 3 – одновременно процесс «старения» и коррозии бетона

Неравновесные процессы силового и средового сопротивления бетона во времени применительно к оценке экспозиции живучести описываются единой математической моделью (5), предложенной В.М. Бондаренко и В.И. Колчуновым [4] на основе нелинейного обобщения закона Гольдберга-Вааге.

$$\frac{\Delta[\Delta L(t, t_0)]}{dt} = -\alpha[\Delta L(t, t_0)]^m, \quad (5)$$

где ΔL – относительный дефицит текущего значения исследуемого фактора неравновесного силового сопротивления $L(t, t_0)$ по отношению к предельному значению $L_{пр}$; t, t_0 – текущее время наблюдения, время начала наблюдения; α – эмпирический параметр скорости изменения ΔL ; m – эмпирический параметр нелинейной связи между значением дефицита ΔL и скоростью его изменения во времени.

Аналогичная зависимость применительно к железобетонным конструктивно нелинейным системам получена в работе [105]. В международных нормативных документах [106] ползучесть железобетона учитывается только в виде линейной ползучести бетона и мгновенных линейных свойств. Однако в Еврокоде, кратковременная диаграмма бетона «напряжение-деформация» имеет ниспадающий участок и ограниченную его протяженность. В работах известных российских ученых Гвоздева А.А., В.М. Бондаренко, Арутюняна Н.Х., Александровского С.В., Васильева П.И. указывалось, что деформации ползучести бетона нелинейно зависят от напряжений, начиная с самых низких их уровней нагружения.

В развитие исследований российской научной школы по теории ползучести Ларионовым Е.А. и Римшиным В.И. [107] предложена модификация принципа суперпозиции Больцмана Л., позволяющая применять его при нелинейной зависимости деформаций ползучести от напряжений. В.М. Бондаренко и др. [108] исследована ползучесть железобетонных балок из высокопрочного бетона. Модель балки построена в программном комплексе Abaqus, а поведение бетона учитывалось с помощью вязкоупругой модели, реализованной в программном комплексе Digimat.

Интересное предложение для учета деформаций ползучести при расчете железобетонных конструкций рассмотрено в работе [109], где на основе принципа разделения полных деформаций бетона на обратимые и необратимые и предложено реологическое уравнение для железобетонного элемента конечных размеров.

Решением проблемы оценки работоспособности и остаточного ресурса несущих железобетонных конструкций зданий и сооружений, подверженных средовым воздействиям занимались многие российские и зарубежные ученые. Здесь накоплены определенные результаты исследований для развития и совершенствования физических и расчетных моделей силового и средового сопротивления железобетонных конструкций в задачах живучести сооружений.

Существует несколько феноменологических теорий количественного описания деградационного процесса коррозии бетона. Все они строятся на предложенных авторами формулах с эмпирическими коэффициентами, вычисленными путем аппроксимаций опытных данных для конкретных случаев воздействия агрессивных сред [110,111]. Так, например, А.И. Минас в своей работе [112] принял условие о существовании границы между коррозированным и неповрежденным бетоном, основываясь на том, что потеря прочности бетона, находящегося в агрессивной среде, происходит с наружных поверхностных слоев и постепенно распространяется на более глубокие слои.

В исследованиях А.И. Попеско [113] построены нелинейные модели (зависимости) для оценки и прогнозирования степени изменения нормативной прочности бетонов в агрессивных средах на основе обобщения результатов опытных данных, в основе которых лежат лабораторные испытания бетонных образцов, помещенных в агрессивную среду, и определение их прочности через определенные промежутки времени.

Расчетная модель сопротивления бетонных и железобетонных конструкций, предложенная В.М. Бондаренко [117,118], учитывает влияние не только коррозионных, но и силовых нагружений, поскольку последние связаны с изменением пористости (проницаемости) бетона, при этом за основу были приняты точки О.Я. Берга и Ю.Н. Хромца. Согласно этой модели если коррозионные повреждения вначале носят затухающий, кольматационный характер, то при увеличении напряжений и в следствии изменения структуры материала, они сначала будут развиваться фильтрационно, а затем передут в лавинные.

В.М. Бондаренко, Н.В. Ключева [116] предложили график изменения прочностных свойств бетона, в том числе для сооружений, меняющих расчетную схему, корректировать влиянием коррозионных повреждений в переходной зоне введением к пределу прочности коэффициентов сохранения K_{xc}^* .

Значительный вклад в развитие методов расчета и проектирования железобетонных конструкций, эксплуатируемых в агрессивных средах внес Е.А. Гузев [114,115]. Им установлено и экспериментально обосновано существенное влияние одновременного проявления внешних воздействий агрессивной среды и силовых воздействий на НДС и перераспределение усилий в стержневых железобетонных конструкциях.

Селяевым, Л.М. Ошкиной, П.В. Селяевым В.П. [119] выявлены изменения прочностных характеристик бетона под действием сульфат-ионов. Установлено, что при

сжимающих напряжениях от совместного действия нагрузки и 2%-го водного раствора H_2SO_4 процесс переноса агрессивной среды в объем образца замедляются. Зона проникновения агрессивной среды у образцов, экспонированных под нагрузкой, значительно меньше, чем у образцов, экспонированных без нагрузки.

В экспериментально-теоретическом исследовании [120] приведены результаты данных о работе бетонных и армобетонных элементов, подверженных воздействию водных растворов, содержащих ионы хлора, работающих под нагрузкой. Экспериментально установлено, что уже после 60 суток действия ионов хлора несущая способность балок снизилась на 7%, момент образования трещин на 17%; прогибы увеличились в 1,5 раза. На основе метода предельных состояний и кинетических законов взаимодействия, сохранения сорбции масс сформирована расчетная модель, позволяющая прогнозировать проектный и остаточный ресурс изгибаемых элементов.

На основе анализа приведенных и других исследований средового и силового сопротивления в работе [121] построен критерий прочности коррозионно повреждаемого бетона при сложном напряженном состоянии в зависимости от времени коррозионного воздействия (рисунок 13). Критерий может быть использован при решении задач живучести железобетонных конструктивных систем в условиях одновременного проявления силовых и средовых воздействий.

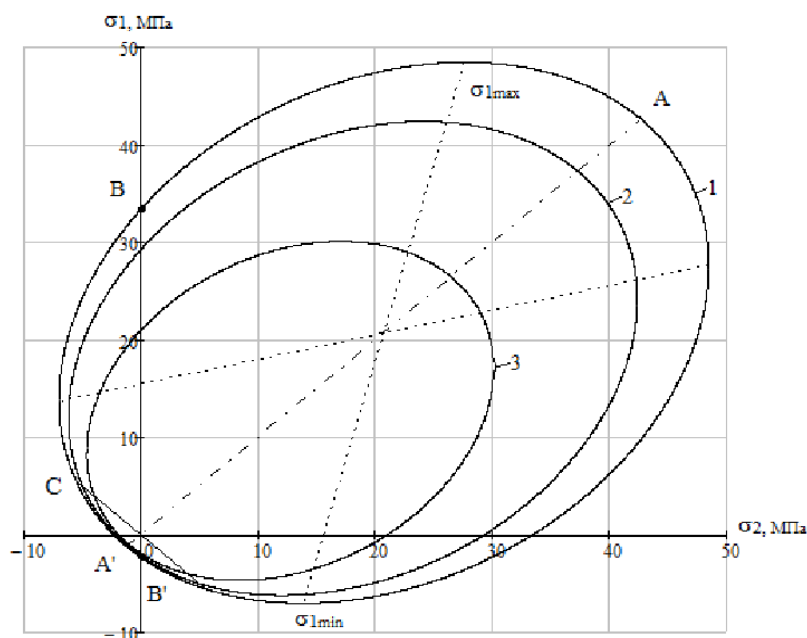


Рисунок 13 - График критерия прочности коррозионно поврежденного бетона при плоском напряженном состоянии 1 – $t = 28$ суток, 2 – $t = 720$ суток, 3 – $t = 2749$ суток

В работе [122] представлены результаты испытаний железобетонных балок с переменным сцеплением продольной арматуры с бетоном. Потеря сцепления моделировалась с помощью пластиковых трубок, надетых на продольные стержни. Количественные результаты исследований показали отрицательное влияние отсутствия сцепления арматуры с бетоном на несущую способность, момент образования трещин, ширину раскрытия трещин и прогиб железобетонных балок.

Zandi K, Coronelli D в своем исследовании [123] установили влияние коррозионных повреждений арматуры на ее анкеровку, а также провели анализ растрескивания и отслоения защитного слоя бетона в зависимости от процента повреждений. Ими установлено влияние коррозии поперечной арматуры на сцепление бетона с продольной анкеруемой арматурой.

С позиций проблемы живучести конструкций интересные результаты получены в экспериментальном исследовании [124]. Было испытано 37 железобетонных колонн квадратного сечения размерами 100x100 мм, высотой 700 мм, в которых создавались

локальные коррозионные повреждения бетона и арматуры при этом для ускоренного корродирования элементов в качестве агрессора использовался концентрированный раствор (37%) соляной кислоты (HCL). Установлено, что высота сжатой зоны бетона внецентренно сжатых элементов при влиянии агрессивной среды при 25% коррозионного повреждения растянутой арматуры значение высоты сжатой зоны уменьшилось на 75%; а при испытании динамической нагрузкой в сечениях проявляется уменьшение высоты сжатой зоны от 9% до 30% относительно испытаний на статическое нагружение (рисунок 14).

Упрощенный аналитический метод анализа предельного значения боковой импульсной нагрузки P в зависимости от продольной силы N , действующей на коррозионно поврежденную в разных местах колонну представлен в работе А.Г. Тамразяна [126]. Результаты исследования сравнивались с результатами численных и экспериментальных исследований. Установлено, что коррозионные повреждения приводят к снижению прочности сжатых колонн на 10–60 % в зависимости от их расположения.

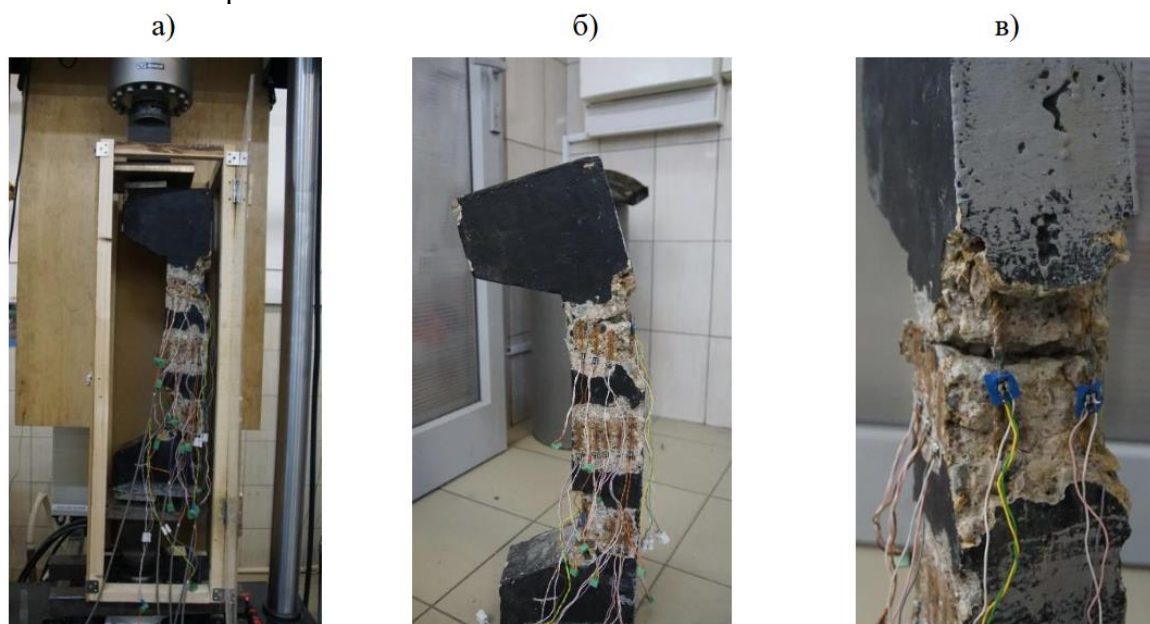


Рисунок 14 - Железобетонный коррозионно-поврежденный внецентренно сжатый образец, испытанный в работе [124]: а) перед испытанием, б) после испытания, в) коррозионно-поврежденный участок образца

В исследовании Kai Q. и др. [125] на основе имеющихся экспериментальных данных изучено влияние коррозии арматуры на прогрессирующее обрушение конструктивной системы. Результаты показали, что коррозия арматуры влияет на предел текучести, и приводит к снижению сопротивления сцепления, а также изменяет последовательность развития трещин.

Работа Леоновича С.Н., Литвинского Д.А. и др. [127] посвящена проблемам прочности, трещиностойкости и долговечности конструкционного бетона при воздействии высоких температур и циклического замораживания–оттаивания. В ней оценены существующие гипотезы морозной деструкции и вклад различных механизмов в морозное разрушение: капиллярной и гелевой пористости, трещин в матрице и на контакте с заполнителем для широкого спектра бетонов.

Влияние силовых и температурных воздействий на напряженно-деформированное состояния железобетонной статически неопределимой балки рассмотрено в работе [128]. Приведены экспериментальные данные по характеристикам бетона и температурным усилиям на напряженное состояние нормального сечения балок.

В работе В.С. Федорова и Левитского В.Е. [129] построены функциональные зависимости основных параметров бетона от температуры на основе решения кинетического уравнения нелинейного накопления повреждений. В работе [130] приведены математическая и расчетная модели силового сопротивления железобетона при резко режимном высокотемпературном воздействии. С использованием диаграммного метода дана методика оценки огнестойкости железобетонных конструкций с учетом физической, геометрической и конструктивной нелинейности, позволяющая определить прогиб и распределение напряжений по сечению в назначенные моменты времени огневого воздействия до наступления предельного состояния.

Аналогичные исследования проведены в последнее время и за рубежом. Так, Kiran T. и др. [131] изучили поведение арматурной стали при выдергивании при воздействии пожара и обнаружили резкое снижение прочности сцепления бетона и прочности арматуры на растяжение при увеличении продолжительности нагрева. Li Z., Liu, Y., Huo, J., Elghazouli [132] экспериментально оценили поведение железобетонной конструктивной системы с различными вариантами армирования колонны во время фаз нагрева и охлаждения конструкций. В ходе эксперимента описаны поля распределения температур, горизонтальные реакции и деформации материалов, построены графики зависимости «момент-угол поворота».

В исследовании [133], с использованием программного комплекса ABAQUS, построены железобетонные рамы без и с заполнением проемов между стойками и колоннами и проведен их анализ на высокотемпературные воздействия. При температуре выше 800°C происходит прогрессирующее обрушение каркаса, деформации в угловой колонне увеличиваются больше, чем в средней (рисунок 15).

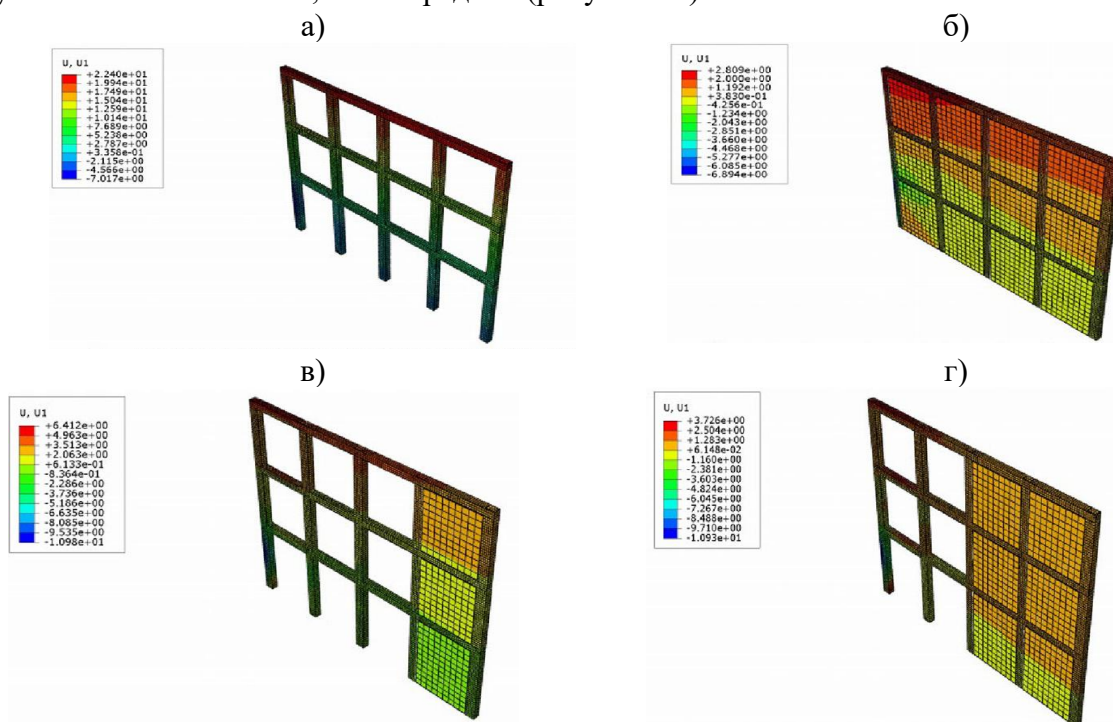


Рисунок 15 - Результаты расчета железобетонных рам в ПК ABAQUS, согласно работе [133]: рама без заполнения проемов (а); рама с полным заполнением проемов (б); рама с частичным заполнением проемов (в) и (г)

В работе [134] по данным конечно-элементного анализа определено время сопротивления балки высокотемпературному воздействию с учётом стадии работы как висячей системы. Приведены данные по развитию прогибов и осевых сил в балках с различным уровнем жёсткости и ограничения поворота на опорах. Выявлен диапазон уровней ограничения, при которых возможен переход в стадию работы как висячей системы.

Уместно упомянуть и исследование [135], в котором рассмотрено поведение 45-этажного здания с переходными этажами при запроектном воздействии, вызванном внезапным удалением средней колонны первого этажа, а также огневом воздействии при пожаре. Показано, что при учете огневых воздействий прогибы конструкций, расположенных над удаляемой колонной, повышаются на 35%.

Железобетон представляет собой сложный многокомпонентный композиционный материал, который в силу своей структуры обладает комбинацией упругих, хрупких и пластических свойств. Причем соотношение этих свойств может меняться во времени в зависимости от факторов силовых и средовых воздействий, режима нагружения конструкций. В последние годы к числу расчетных ситуаций, проверяемых при проектировании новых или реконструкции существующих зданий с железобетонными каркасами, добавились аварийные ситуации, вызванные внезапными отказами отдельных несущих элементов конструктивных систем. Такие аварийные ситуации представляют опасность для эксплуатируемых объектов, поскольку могут приводить к массовым жертвам в случае частичного или полного обрушения несущей системы здания [136].

Поэтому на этапе проектирования необходимо учесть влияние двухстадийного нагружения, включающего этап деформирования при действии постоянных и длительных эксплуатационных нагрузок и динамическое догружение в результате структурной перестройки несущей системы сооружения после отказа одного из несущих элементов. Рассматриваемый режим нагружения оказывает влияние на количественные и качественные параметры деформирования железобетонных конструкций и диссипацию энергии. При таком режиме нагружения как правило оказывается превышенным уровень напряжений, определяющий границы применимости линейных вязкоупругих моделей бетона при расчете железобетонных конструкций.

В исследованиях сопротивления прогрессирующему обрушению железобетонного каркаса здания, подлежащего сносу [22], скорость деформаций по записям тензометрических датчиков на бетоне находилась в интервале от 10^{-3} до 10^{-2} с⁻¹ в зависимости от расстояния до удаляемой колонны. В испытании полномасштабной модели железобетонного каркаса [23] на внезапный отказ угловой колонны время полной разгрузки устройства, моделирующего угловую колонну, составило около 0,1 с по результатам обработки записей показаний тензометрических датчиков. Акселерометры, установленные на конструкциях полномасштабной модели над удаляемой угловой колонной, показали максимальное ускорение вертикальных колебаний 1,08 g ($g = 9.81$ м/с²). В горизонтальном направлении ускорения колебаний в уровне покрытия достигали 0,45 g.

В [139] приведена классификация режимов нагружения, следуя которой и имеющимся экспериментальным данным, режим деформирования при структурной перестройке несущей системы здания после отказа одного из элементов может быть отнесен к средним (intermediate) скоростям деформирования.

Исследования Баженова [26], Гениева [27], Nam et al. [28], Yang Y. et al. [143] и др., указывают, что прочность и предельные деформации бетона при сжатии и растяжении могут возрастать в зависимости от скорости деформации и времени выдержки под нагрузкой. При скорости 10-2 с⁻¹ наблюдается увеличение прочности примерно в 1.15 - 1.3 раз. Также наблюдается увеличение предельных деформаций образцов.

Meng и другие [139] изучали механические свойства легкого ультравысокопрочного бетона с улучшенными показателями пластичности при динамическом нагружении. Соотношение между скоростями деформаций и динамическим упрочнением образцов оказалось близким к результатам Yang Y. И другие [143] и Баженова [26]. В качестве одного из критериев для сопоставления механических свойств образцов в исследованиях Meng использовалась удельная поглощаемая энергия (energy absorption). Анализ представленных

данных показывает увеличение поглощаемой энергии воздействия с ростом скорости деформаций.

В работе [144] исследовали изменение параметров динамического отклика бетона на основе обычного и кораллового крупного заполнителя при действии агрессивных сред. Образцы выдерживались в течение 120 суток в условиях сульфат-ионных, хлорид-ионных и комбинированных агрессивных сред. Для контрольных образцов наблюдался прирост прочности до возраста 60 суток, после чего прочность практически не менялась. В условиях сульфат-ионной среды наблюдалось снижение прочности по сравнению с возрастом 28 суток, а в хлор-ионной среде напротив – набор прочности, что было связано с кольматацией пор. Наибольшее снижение модуля упругости, практически на треть, наблюдалось в среде сульфат-ионов и комбинированной среды, а для хлорид-ионов наблюдалось незначительное увеличение. Увеличение кораллового крупного заполнителя приводило к снижению модуля упругости и прочности образцов.

Интересные результаты с позиций живучести железобетонных конструкций были представлены в работах Колчунова В.И., Ключевой Н.В., Андросовой Н.Б., Бухтияровой А.С. [29], Цветкова К.А., Баженова А.В. [30] о влиянии начального уровня напряжений от статической нагрузки на параметры диаграмм деформирования бетона при однократном динамическом воздействии. В исследовании [145] отмечено незначительное влияние поперечного обжатия по сравнению со скоростью деформирования на динамическое упрочнение бетона. Это позволяет распространить результаты испытаний при одноосном сжатии на случаи двух- и трехосного напряженного состояния.

Н.В. Федоровой, М.Д. Медянкиным, Бушовой О.Б. [31] было исследовано влияние уровня предварительного нагружения на динамическое упрочнение бетона различных классов. При этом время выдержки под статической нагрузкой исчислялось несколькими минутами. Установлено влияние режима нагружения на динамическую прочность и деформативность бетона. Для описания поведения бетона была использована модифицированная вязкоупругая модель Кельвина-Фойгта, предложенная в работах Гениева [147]. Уравнение модели в безразмерных параметрах и величинах имело вид (6):

$$\frac{d\gamma}{d\xi} + \left(1 - \frac{\gamma}{2}\right)\gamma = \frac{\varphi}{2}, \quad (6)$$

$$\varphi = \frac{T}{T_0}, \gamma = \frac{Q}{Q_0}, \xi = \frac{G_0 \cdot t}{K}$$

Здесь T , T_0 – интенсивность касательных напряжений и их максимальное значение; Q , Q_0 – интенсивность деформаций сдвига при произвольной интенсивности напряжений T и максимальном значении T_0 соответственно; G_0 – начальный модуль сдвига; K – модуль (коэффициент) вязкости; t – время нагружения.

Wenxuan Yu, Liu Jin и Xiuli Du [32] было исследовано деформирование объемных конечно-элементных моделей стандартных бетонных кубов при однократном динамическом нагружении с некоторого уровня начальных напряжений от статически приложенной нагрузки. Особенностью использованных ими моделей было дискретное задание крупного заполнителя, случайным образом заполняющего объем образца. Контактное взаимодействие элементов модели крупного заполнителя с цементно-песчаной матрицей моделировалось переходной контактной поверхностью. Для учета динамического упрочнения бетона (DIF) при его однократном динамическом нагружении использовались эмпирические зависимости, связывающие эту величину со скоростью деформаций. Результаты моделирования свидетельствовали о связи между параметрами деформирования при однократном динамическом нагружении и уровнем начальных напряжений в образце от статически приложенной нагрузки.

Lai J. and Sun W. [149] были выполнены испытания на раскалывание ультра высокопрочных цементных композитов с повышенной пластичностью (ultra-high performance

cementitious composite) по методу Хопкинсона (the split Hopkinson pressure bar) при скорости деформаций в диапазоне от 23.7 с^{-1} до 99.2 с^{-1} . Авторами отмечаются влияние скорости деформаций на прочность, деформативность и модуль упругости цементного композита. Для описания силового сопротивления материала предложена нелинейная вязкоупругая модель с учетом повреждений (visco-elastic damage model). Основное уравнение модели имеет вид (7):

$$\sigma = (1 - D) \left[f_e(\varepsilon) + E_1 \int_0^t \dot{\varepsilon} \exp\left(-\frac{t-\tau}{\theta_1}\right) d\tau + E_2 \int_0^t \dot{\varepsilon} \exp\left(-\frac{t-\tau}{\theta_2}\right) d\tau \right] \quad (7)$$

$$f_e(\varepsilon) = E_0 \varepsilon + \alpha \cdot \varepsilon^2 + \beta \cdot \varepsilon^3, D = 1 - \frac{E_1}{E_0},$$

где, $f_e(\varepsilon)$ – функция напряжений, ε – деформации, E_0 – начальный модуль упругости.

Уместно заметить, что рассмотренные выше результаты исследований не учитывали особенности проявления реологических свойств бетона, связанные с длительной эксплуатацией сооружений. В то же время, хорошо известно, что в бетоне железобетонных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений во времени развиваются деформации, вызванные усадкой и ползучестью. Также наблюдаются рост прочности и начального модуля упругости в результате старения бетона. Levitch V и др. [33] исследовали бетонные образцы в возрасте 20–30 лет, извлеченные из балок и плит вблизи предполагаемых нейтральных осей изгибаемых элементов, а также из колонн, для которых средний уровень напряжений в течение срока эксплуатации оценивался как не более $0.27f_{ck}$ и не более $0.55f_{ck}$ в условиях сейсмических воздействий. Авторами отмечено увеличение модуля деформаций и снижение деформативности. Таким образом, материал с течением времени стал более хрупким, уменьшился диапазон его пластических деформаций.

В бетоне эксплуатируемых железобетонных конструкций во времени может наблюдаться релаксация напряжений [151] вследствие развития деформаций ползучести и перераспределения усилия на стержни продольной арматуры, а также другие конструкции в статически неопределимых системах. Отмеченное явление может сказаться на вязкостных свойствах бетона и величине удельной поглощаемой энергии при его динамическом нагружении с учетом наличия начальных напряжений от эксплуатационной нагрузки. При этом для описания сопротивления бетона длительным нагрузкам используются схожие вязкоупругие, вязко-упруго-пластические или нелинейно вязкоупругие модели, построенные путем комбинации элементов моделей Максвелла или Фойгта с учетом пластических свойств материала при высоких уровнях напряжений [152].

Учитывая снижение диапазона деформирования для рассеивания инерционных сил в нагруженном бетоне по сравнению с ненагруженным, следует ожидать меньшие значения коэффициента динамического упрочнения, площади под кривой σ - ε , динамического прироста предельной деформации. С другой стороны, явление ползучести должно привести к выравниванию поля напряжений. Старение материала – к изменению модуля деформаций, предельных деформаций. Для бетона эксплуатируемых сооружений имеют место все отмеченные факторы, определяя прочность и деформативность материала, а следовательно, и сопротивление конструктивной системы в целом.

Таким образом, становится очевидным, что вязкостные свойства бетона оказывают влияние на сопротивление железобетонных конструктивных систем разрушению при внезапных структурных перестройках, вызванных аварийными ситуациями. Учет таких свойств может стать дополнительным ресурсом при оптимизации конструктивных решений с учетом требований механической безопасности.

Выводы

1. Исследованиями российских и зарубежных ученых последних двух-трех десятилетий показано, что так называемые особые или аварийные воздействия природного, техногенного или террористического характера, могут приводить к внезапной потере несущей способности элементов зданий и сооружений и подвергшихся таким воздействиям и приводить к непропорциональным отказам зданий и сооружений - их прогрессирующему обрушению. Вместе с тем, практически отсутствует единая методология проектирования конструктивных систем в особых расчётных ситуациях.

2. При моделировании сопротивления прогрессирующему обрушению целесообразно помимо силовых воздействий учитывать и средовые воздействия, такие как коррозионное повреждение бетона и стали, воздействие высоких и низких температур и другие.

3. Внезапное удаление несущего элемента при оценке напряженного состояния и перераспределения силовых потоков требует учета динамических эффектов, физической и конструктивной нелинейности в проектируемых зданиях и сооружениях при таких воздействиях.

4. Наиболее точным методом численного анализа живучести железобетонных несущих систем при особых воздействиях, вызванных отказом несущего элемента конструктивной системы, является прямой нелинейный динамический расчет во временной области. Однако этот метод в настоящее время продолжает оставаться трудоемким применительно к анализу несущих систем реальных зданий и сооружений и содержит ряд неопределенностей.

Приближенные аналитические и численно-аналитические методы, позволяющие сформулировать функцию предельного состояния, наиболее эффективны в практике проектирования и перспективны для использования в вероятностных моделях живучести сооружений.

Благодарности

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колчунов В. И., Федорова Н. В. Некоторые проблемы живучести железобетонных конструктивных систем при аварийных воздействиях // Вестник НИЦ Строительство. 2018. №. 1. С. 115-119.
2. Fedorova N.V., Savin S.YU. Progressive collapse resistance of facilities experienced to localized structural damage - an analytical review // Строительство и реконструкция. 2021. Vol. 95, № 3. Pp. 76–108.
3. Kiakojour F., De Biagi V., Chiaia B., Sheidaii M. R. Progressive collapse of framed building structures: Current knowledge and future prospects // Engineering Structures. 2020. № December 2019 (206). С. 110061.
4. Бондаренко В. М., Колчунов В. И. Экспозиция живучести железобетона // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2007. №. 5. С. 4-8.
5. Колчунов В.И., Клюева Н.В., Андросова Н.В., Бухтиярова А.С. Живучесть зданий и сооружений при запроектных воздействиях. М.: Издательство АСВ, 2014. 208 с.
6. Тамразян А.Г. Концептуальные подходы к оценке живучести строительных конструкций, зданий и сооружений, Железобетонные конструкции. 2023. Т. 3. № 3. С. 62–74.
7. Алмазов В. О. Кхой Као Зуй. Динамика прогрессирующего разрушения монолитных многоэтажных каркасов. М.:Изд-во АСВ.- 2013-128с.
8. Hadi M. N. S., Alrudaini T. M. S. Preventing the progressive collapse of reinforced concrete buildings // International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing. 2011. P. 1-12.
9. Mohamed O., Al Khattab R., Mishra A., Isam, F. Recommendations for reducing progressive collapse potential in flat slab structural systems // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2019. T. 471. №. 5. P. 052069.
10. Hammad K., Lofty I., Naiem M. Enhancing Progressive Collapse Resistance in Existing Buildings // Design and Construction of Smart Cities. 2021. P. 39-46.
11. Yihai Bao, Sashi K Kunnath, Sherif El-Tawil, Hai S Lew. Macromodel-based simulation of progressive collapse: reinforced concrete frame structures // Journal of Structural Engineering. 2008, Vol. 134, No. 7. P. 1079-1091.

12. Mohajeri Nav F. Analytical investigation of reinforced concrete frames under middle column removal scenario // *Adv. Struct. Eng.* 2018. № 21.9 P. 1388–1401.
13. Ahmadi R., Rashidian O., Abbasnia R., Mohajeri Nav F., Usefi N. Experimental and numerical evaluation of progressive collapse behavior in scaled RC beam-column subassemblage // *Shock and Vibration*. 2016. Т. 2016.
14. Гениев Г.А., Колчунов В.И., Ключева Н.В. и др. Прочность и деформативность железобетонных конструкций при запроектных воздействиях: монография. М.: АСВ, 2004. 216 с.
15. Thaer, M., Alrudaini, S. and Muhammad, N. S. H. A New Design to Prevent Progressive Collapse of Reinforced Concrete Buildings // *The 5th Civil Engineering Conference in The Asian Region and Australasian Structural Engineering Conference*, 2010.
16. Травуш В.И. Шапиро Г.И. Колчунов В.И. Леонтьев Е.В. Федорова Н.В. Проектирование защиты крупнопанельных зданий от прогрессирующего обрушения // *Жилищное строительство*. 2019. №3. С40–46.
17. Azim I., Yang J., Bhatta S., Wang F., Liu Q. F. Factors influencing the progressive collapse resistance of RC frame structures // *Journal of Building Engineering*. 2020. Т. 27. С. 100986.
18. Ерёмин К. И., Матвеюшкин С. А. Особенности экспертизы и НК металлических конструкций эксплуатируемых сооружений // *В мире неразрушающего контроля*. 2008. №. 4. С. 4-7.
19. СП 296.1325800.2017 «Здания и сооружения. Особые воздействия»
20. СП 385.1325800.2018 «Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения»
21. ASCE 76-23. Standard for Mitigation of Disproportionate Collapse Potential in Buildings and Other Structures. - American Society of Civil Engineers. 2023
22. GSA (General Services Administration). Alternate path analysis and design guidelines for progressive collapse resistance (Revision). - General Services Administration. 2016
23. BS EN 1991-1-7:2006 Eurocode 1. Actions on structures. General actions. Accidental actions. Comite Europeen de Normalisation (2002), Draft pr EN 1992-1-1
24. Бондаренко В.М., Боровских А.В. Износ, повреждения и безопасность железобетонных сооружений. – М.: ИД Русанова, 2000. 144 с.
25. Колчунов В. И., Колчунов В. И., Федорова Н. В. Деформационные модели железобетона при особых воздействиях // *Промышленное и гражданское строительство*. 2018. №. 8. С. 54-60.
26. Бондаренко В.М., Колчунов В.И. Расчетные модели силового сопротивления железобетона. Москва: Издательство АСВ, 2004. 472 с.
27. Голышев А.Б. Бачинский В.Я., Полищук В.П. Железобетонные конструкции. Сопротивление железобетона. Т.1. К.: Логос, 2001. 481 с
28. Расторгуев Б.С., Плотников А.И. Обеспечение живучести гражданских зданий при особых воздействиях // Тематическая научно-практическая конференция «Городской строительный комплекс и безопасность жизнеобеспечения граждан»: сб. докладов. М.: МГСУ, 2005. 9-10
29. Orton S. Development of a CFRP System to Provide Continuity in Existing Reinforced Concrete Buildings Vulnerable to Progressive Collapse, Dissertation, 2007
30. Kim J. and Yu J. Analysis of Reinforced Concrete Frames Subjected to Column Loss // *Magazine of Concrete Research*, ICE publishing. 2012. V.64(1), pp. 21-33
31. D3–1: Design recommendations against progressive collapse in steel and steel-concrete buildings. European Convention for Constructional Steelwork (ECCS). FAILNOMORE. – 2021.
32. ГОСТ 27.002-89.9. Надежность в технике. Термины и определения. Введ. 1990-07-01. М.: ИПК Издательство стандартов, 1990. 38 с.
33. Махутов Н. А., Петров В. П., Резников Д. О. Оценка живучести сложных технических систем // *Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций*. – 2009. – №. 3. – С. 47-66.
34. Райзер В. Д. Расчет и нормирование надежности строительных конструкций. М.: Стройиздат, 1995. 348 с.
35. Анцелиович Л. Л. Надежность, безопасность и живучесть самолета // М.: Машиностроение. 1985. – Т. 3985. – С. 296
36. Болотин В. В. Применение методов теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. М.: Стройиздат, 1971.
37. Тур В.В., Надольский В.В. Концепция проектирования строительных конструкций на основе численных моделей сопротивления // *Строительство и реконструкция*. 2022. № 6. С. 78-90
38. Bassam A. Izzuddin, Miguel F. Pereira, Ulrike Kuhlmann, Lars Rölle, Ton Vrouwenvelder, Bernt J. Leira, Application of Probabilistic Robustness Framework: Risk Assessment of Multi-Storey Buildings under Extreme Loading // *Struct. Eng. Int.* 2012. 22(1). 79-85.

39. Ellingwood B R. Mitigating risk from abnormal loads and progressive collapse // J. Perform. Constr. Fac. 2006. 20 (4). 315-323.
40. Biagi V. D., Kiakojouri F., Chiaia B., Sheidaii M. R. A simplified method for assessing the response of RC frame structures to sudden column removal // Applied Sciences. 2020. T. 10. №. 9. C. 3081.
41. Chen C. H., Zhu Y. F., Yao Y., Huang Y., Long X. An evaluation method to predict progressive collapse resistance of steel frame structures // Journal of Constructional Steel Research. 2016. T. 122. C. 238-250.
42. Alekseytsev, A.V. Mechanical safety of reinforced concrete frames under complex emergency actions // Magazine of Civil Engineering. 2021. 103(3). Article No. 10306. DOI: 10.34910/MCE.103.6
43. Лизогуб А.А., Туп А.В., Туп В.В. Вероятностный подход к оценке живучести конструктивных систем из сборного и монолитного железобетона // Строительство и реконструкция. 2023. Т. 108, № 4. С. 95 – 107
44. Naghavi F., Tavakoli H. R. Probabilistic prediction of failure in columns of a steel structure under progressive collapse using response surface and artificial neural network methods // Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering. 2022. C. 1-17.
45. Cardoso J. B., de Almeida J. R., Dias J. M., Coelho P. G. Structural reliability analysis using Monte Carlo simulation and neural networks // Advances in Engineering Software. 2008. T. 39. №. 6. C. 505-513.
46. Tur V.V., Tur A.V., Derechennik S.S. Checking of structural system robustness based on pseudo-static full probabilistic approach // Proceedings of the fib Symposium 2019: Concrete-Innovations in Materials, Design and Structures. 2019. Pp. 2126-2133.
47. Дятляр А.Н. Оптимизация живучести конструктивно нелинейных железобетонных стержневых конструкций в запредельных состояниях: дис. – Орел: [Орлов. Гос. Техн. ун-т], 2005.
48. Гениев Г.А. О принципе эквиградиентности и применении его к оптимизационным задачам устойчивости стержневых систем // Строительная механика и расчет сооружений. 1979. №6. С. 8-13.
49. Масленников А. М. Риски возникновения природных и техногенных катастроф. СПб., 2008. 165с.
50. Кудзис А.П. Оценка надежности железобетонных конструкций. Вильнюс: Мокслас, 1985. 156 с
51. Котляровский В.А., Забегаев А.В. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий. КН.5.-М.: АСВ, 2011.-414с.
52. СТБ ISO 2394-2007. Надежность строительных конструкций. Общие принципы Введ. 01.07.08. – Минск: Госстандарт Республики Беларусь, 2007. 69 с.
53. ТКП EN 1990-2011. Основы проектирования конструкций. Введ. 01.07.12. – Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2012. 70 с.
54. Надольский В. В., Верева Ф. А. Особенности определения значений индекса надежности для разных периодов повторяемости // Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров: сборник научных статей XXI Международного научно-методического семинара. – 2018. С.205-212.
55. Колчунов В. И., Туп В. В. Направления проектирования конструктивных систем в особых расчетных ситуациях // Промышленное и гражданское строительство. 2023. №. 7. С. 5-15.
56. Fu G., Frangopol D. M. Balancing weight, system reliability and redundancy in a multiobjective optimization framework // Structural Safety. 1990. T. 7. №. 2-4. C. 165-175.
57. Baker J. W., Schubert M., Faber M. H. On the assessment of robustness // Structural safety. 2008. T. 30. №. 3. C. 253-267.
58. Chen Y., Yang G. P., Xia Q. Y., Wu G. W. Enrichment and characterization of dissolved organic matter in the surface microlayer and subsurface water of the South Yellow Sea // Marine Chemistry. 2016. T. 182. C. 1-13.
59. Beck A. T., da Rosa Ribeiro L., Costa L. G., Stewart M. G. Comparison of risk-based robustness indices in progressive collapse analysis of building structures // Structures. Elsevier, 2023. T. 57. C. 105295.
60. Unified Facilities Criteria. Design of buildings to resist progressive collapse (UFC 4-023-03) Washington, DC: Department of Defence (DoD), 2009.
61. Abdelwahed B. A review on building progressive collapse, survey and discussion // Case Studies in Construction Materials. 2019. (11).
62. Qiao H., Yang Y., Zhang J. Progressive Collapse Analysis of Multistory Moment Frames with Varying Mechanisms // Journal of Performance of Constructed Facilities. 2018. № 4 (32). C. 04018043.
63. Almusallam T. H., Elsanadedy H. M., Al-Sallou, Y. A., Siddiqui N. A., Iqbal R. A. Experimental investigation on vulnerability of precast RC beam-column joints to progressive collapse // KSCE Journal of Civil Engineering. 2018. T. 22. C. 3995-4010.
64. ACI 318-19 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary American Concrete Institute, 2019
65. Abdelazim W., Mohamed H. M., Benmokrane B. Inelastic Second-Order Analysis for Slender GFRP-Reinforced Concrete Columns: Experimental Investigations and Theoretical Study // Journal of Composites for Construction. 2020. № 3 (24).

66. MacGregor J. G. Design of slender concrete columns - revisited // *ACI Structural Journal*. 1993. № 3 (90). С. 302–307.
67. Kolchunov V. I., Prasolov N. O., Kozharinova L. V. Experimental and theoretical research on survivability of reinforced concrete frames in the moment of individual element buckling // *Vestnik MGSU*. 2011. № 3–2. С. 109–115.
68. ГОСТ 27751-2014 Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. Москва. 2019.
69. Amiri S., Saffari H., Mashhadi J. Assessment of dynamic increase factor for progressive collapse analysis of RC structures // *Engineering Failure Analysis*. 2018. (84). С. 300–310.
70. Tsai M.-H. An Approximate Analytical Formulation for the Rise-Time Effect on Dynamic Structural Response Under Column Loss // *International Journal of Structural Stability and Dynamics*. 2018. № 03 (18). С. 1850038.
71. Weng J., Tan K. H., Lee C. K. Adaptive superelement modeling for progressive collapse analysis of reinforced concrete frames // *Engineering Structures*. 2017. (151). С. 136–152.
72. Геммерлинг А.В. Расчет стержневых систем, М.: Стройиздат, 1974, 207 с.
73. Беглов А.Д., Санжаровский Р.С. О методах решения уравнений ползучести бетона // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2005. №3. С. 55-63.
74. Санжаровский Р. С. Устойчивость элементов строительных конструкций при ползучести / Р. С. Санжаровский, Ленинград: Издательство Ленинградского университета, 1984. 217 с.
75. Sasaki M., Sagioglu S. Progressive Collapse Resistance of Hotel San Diego // *Journal of Structural Engineering*. 2008. № 3 (134). С. 478–488.
76. Геммерлинг А. В. Несущая способность стержневых стальных конструкций, Москва: Госстройиздат, 1958. 216 с.
77. Perelmuter A. V. Using the criterion of resistibility to assess of a structural limit state // *Vestnik MGSU*. 2021. № 12. С. 1559–1566.
78. Alexandrov A. V., Travush V. I., Matveev A. V. O raschete sterzhnevyykh konstruktсий na ustoychivost' // *Industrial and Civil Engineering*. 2002. № 3. С. 16–19.
79. Trekin N. N., Kodysh E. N. Special Limit Condition Of Reinforced Concrete Structures And Its Normalization // *Promyshlennoe i Grazhdanskoe Stroitel'stvo*. 2020. № 5. С. 4–9.
80. Тур А. В. Сопротивление изгибаемых железобетонных элементов при внезапном приложении нагрузки :дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.23.01. Брест, 2012
81. Shi F., Wang L., Dong S. Progressive collapse assessment of the steel moment-frame with composite floor slabs based on membrane action and energy equilibrium // *The Open Construction & Building Technology Journal*. 2017. Т. 11. №. 1.
82. Белостоцкий А. М., Акимов П. А., Дмитриев Д. С., Нагибович А. И., Петряшев Н. О., Петряшев С. О. Расчетное исследование параметров механической безопасности высотного (404 метра) жилого комплекса «One Tower» в деловом центре «Москва-Сити» // *Academia. Архитектура и строительство*. 2019. №. 3. С. 122-129.
83. Белостоцкий А. М., Акимов П. А., Аул А. А., Дмитриев Д. С., Дядченко Ю. Н., Нагибович А. И. и др. Расчетное обоснование механической безопасности стадионов к Чемпионату мира по футболу 2018 года // *Academia. Архитектура и строительство*. 2018. №. 3. С. 118-129.
84. Травуш В.И., Белостоцкий А.М., Вершинин В.В., Островский К.И., Петряшев Н.О., Петряшев С.О. Численное моделирование физически нелинейной динамической реакции высотных зданий при сейсмических воздействиях уровня МРЗ // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2016. №12(1). С. 117-139.
85. Перельмутер А.В., Криксунов Э.З., Мосина Н.В. Реализация расчета монолитных жилых зданий на прогрессирующее (лавинообразное) обрушение в среде вычислительного комплекса “SCAD Office” // *Инженерно-строительный журнал*. 2009. Т. 4. № 2. С. 13–18.
86. Marchis A. G., Botez M. D. A numerical assessment of the progressive collapse resistance of RC frames with respect to the number of stories // *Procedia Manufacturing*. 2019. Т. 32. P. 136-143.
87. Marjanishvili S. and Agnew E. Comparison of Various Procedures for Progressive Collapse Analysis // *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2006. Vol. 20, No. 4, pp. 365-374
88. Kaewkulchai G. Beam element formulation and solution procedure for dynamic progressive collapse analysis / G. Kaewkulchai, E.B. Williamson // *Computers & Structures*. 2004. Т. 82. № 7-8. С.639-651.
89. Izzuddin B.A., Vlassis A. G., Elghazouli A. Y., Nethercot D. A. Progressive collapse of multi-storey buildings due to sudden column loss—Part I: Simplified assessment framework // *Engineering structures*. 2008. Т. 30. № 5. – С.1308-1318.
90. Vlassis A.G., Izzuddin B. A., Elghazouli A. Y., Nethercot D. A. Progressive collapse of multi-storey buildings due to sudden column loss—Part II: Application // *Engineering Structures*. 2008. Т. 30. № 5. С.1424-1438.

91. McKay A.E. Alternative Path Method in Progressive Collapse Analysis: Variation of Dynamic and Non-Linear Load Increase Factors / M.Sc., the University of Texas at San Antonio, 2008.
92. Mohamed, O. A. Assessment of Progressive Collapse Potential in Corner Floor Panels of Reinforced Concrete Buildings // Engineering Structures. 2009. Vol. 31
93. Brian I. S. Experimental and Analytical Assessment on the Progressive Collapse Potential of Existing Buildings // Master Thesis, Ohio State University. 2010, USA
94. Fu F. Progressive Collapse Analysis of High-Rise Building With 3-D Finite Element Modeling Method // Journal of Constructional Steel Research. 2009. pp.1269-1278.
95. Salem H. M. Computer-Aided Design of Framed Reinforced Concrete Structures Subjected to Flood Scouring // Journal of American Science. 2011. 7(10), pp. 191-200
96. Kwasniewski L. Nonlinear dynamic simulations of progressive collapse for a multistory building // Engineering Structures. 2010. T. 32. № 5. С.1223-1235
97. Савин С.Ю., Колчунов В.И., Федорова Н.В. Расчет устойчивости железобетонных каркасов зданий при особых воздействиях // Промышленное и гражданское строительство. 2023. N 9. С. 12-21. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.09.12-21
98. Бондаренко В.М., Мигаль Р.Е., Ягупов Б.А. Резервы и экспозиция конструктивной безопасности зданий, эксплуатирующийся в агрессивной среде // Строительство и реконструкция. 2014. No 1. С. 3–10
99. Бондаренко В. М., Колчунов В. И. Концепция и направления развития теории конструктивной безопасности зданий и сооружений при силовых и средовых воздействиях // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 2. С. 28-31.
100. Галустов К.З. Развитие теории ползучести бетона и совершенствование методов расчета железобетонных конструкций / автореферат диссертации на соискание ученой степени д.т.н., Москва, 2008
101. Гольшев А.Б., Колчунов В.И. Сопротивление железобетона. Киев: Основа, 2009. 432 с.
102. Андросова Н.Б., Колчунов В.И., Емельянов С.Г. Неравновесные и нелинейные процессы при оценке потенциала живучести железобетонных конструктивных систем в запредельных состояниях // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2022. Т. 18. № 6. С. 490–502. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-6-490-502>.
103. Рекомендации по учету ползучести и усадки бетона при расчете бетонных и железобетонных конструкций. М.: Стройиздат, 1988. 120 с.
104. Травуш В.И., Мурашкин В.Г. Влияние ползучести на распределение деформаций и напряжений в изгибаемом элементе // Строительство и реконструкция. 2017. № 2. С. 57–70.
105. Бондаренко В. М., Ключева Н. В. К расчету сооружений, меняющих расчетную схему вследствие коррозионных повреждений // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2008. № 1. С. 4-12.
106. EN 1992-1-2: 2004. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings (Проектирование железобетонных конструкций), 2004.
107. Ларионов Е.А., Римшин В.И., Жданова Т.В. Принцип наложения деформаций в теории ползучести // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. Т. 15. № 6. С. 483–496.
108. Dellepiani M. G. et al. Numerical investigation on the creep response of concrete structures by means of a multi-scale strategy // Construction and Building Materials. 2020. T. 263. С. 119867.
109. Назаренко В.Г., Звездов А.И., Ларионов Е.А., Квасников А.А. Концепция развития прикладной теории ползучести железобетона // Бетон и железобетон. 2020. № 2 (602). С. 8–11
110. Бондаренко В. М., Марков С.В., Римшин В.И. Коррозионные повреждения и ресурс силового сопротивления железобетонных конструкций // БСТ, 2002. № 8. С. 26-32.
111. Kmiecik P., Kamiński M. Modelling of reinforced concrete structures and composite structures with concrete strength degradation taken into consideration // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2011. Volume 11. Issue 3. Pp. 623 – 636.
112. Минас А. И. Метод оценки коррозионной стойкости некоторых строительных материалов // Строительные материалы и конструкции. Ростов н/Д., 1972. С.49-61.
113. Попеско А. И. Работоспособность железобетонных конструкций, подверженных коррозии // СПб: СПб гос. архит.-строит. ун-т, 1996. 182 с
114. Гузев Е. А., Митин А.А., Басова Л.Н. Деформативность и трещиностойкость сжатых армированных элементов при длительном нагружении и действии жидких сред // Сб. тр. НИИЖБ. М.: Стройиздат, 1984. 34 с
115. Савицкий Н. В., Гузев Е.А., Бондаренко В.М. Интегральный метод оценки напряженно деформированного состояния железобетонных элементов в случае воздействия агрессивной среды и силовой нагрузки // Коррозионная стойкость бетона и железобетона в агрессивных средах. М.: 1984. С. 20-27
116. Бондаренко В. М., Ключева Н.В. К расчету сооружений, меняющих расчетную схему вследствие коррозионных повреждений // Известия вузов. Строительство. 2008. №1. С. 4-12.

117. Бондаренко В. М., Римшин В.И. Диссипативная теория силового сопротивления железобетона. М.: Студент, 2015. 111с.
118. Бондаренко В. М. Силовое деформирование, коррозионные повреждения и энергосопротивление железобетона, Юго-Зап. гос. ун-т – Курск. 2016. 67с
119. Селяев, Л.М. Ошкина, П.В. Селяев В.П. Химическое сопротивление цементных бетонов действию сульфат-ионов // Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2013
120. Селяев В. П., Селяев П. В., Алимов М. Ф., Сорокин Е. В. Оценка остаточного ресурса железобетонных изгибаемых элементов, подверженных действию хлоридной коррозии //Строительство и реконструкция. 2017. №. 6. С. 49-58.
121. Ключева Н. В., Андросова Н. Б., Губанова М. С. Критерий прочности коррозионно повреждаемого бетона при сложном напряженном состоянии //Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2015. №. 1. С. 38-42.
122. Magda I. Mousa. Effect of bond loss of tension reinforcement on the flexural behaviour of reinforced concrete beams // HBRC Journal, 2016, 12:3, 235-241, DOI: 10.1016/j.hbrj.2015.01.003.
123. Zandi K, Coronelli D. Anchorage capacity of corroded reinforcement: Eccentric pull-out tests on beamend specimens. In: Report No. 2010-06, Department of Civil and Environmental Engineering. Goteborg, Sweden: Chalmers University of Technology
124. Попов Д. С. Экспериментальные исследования динамических свойств коррозионно-поврежденных сжатых железобетонных элементов //Строительство и реконструкция. 2022. №. 2. С. 55-64.
125. Kai Q., Zhiqiang H. U. A. N. G., Yunhao W. E. N. G., Xiaohui Y. U. Study on load resisting mechanism of corroded RC frame structures against progressive collapse //Journal of Building Structures. 2022. Т. 43. №. 9. С. 181.
126. Tamrazyan A. The Bearing Capacity of Compressed Corrosion-Damaged Reinforced Concrete Elements under Lateral Pulse Loading //Buildings. 2023. Т. 13. №. 9. С. 2133.
127. Леонович, С. Н., Литвиновский, Д. А.,Чернякевич, О. Ю., Степанова, А. В. Прочность, трещиностойкость и долговечность конструкционного бетона при температурных и коррозионных воздействиях : в 2 ч. Минск : БНТУ, 2016. Ч. 1. 390 с.
128. Истомин А. Д., Петрова В. А. Усилия в статически неопределимых железобетонных конструкциях при силовых и температурных воздействиях //Безопасность строительного фонда России проблемы и решения. 2019. С. 60-68.
129. Федоров В.С., Левитский В.Е. Теоретические основы прогнозирования изменения прочностных и деформативных характеристик бетона в условиях пожара // Проблемы обеспечения безопасности строительного фонда России: Труды III Международных академических чтений. Курск: КурскГТУ, 2004. С. 236–244.
130. Федоров В. С. Основные положения теории расчета огнестойкости железобетонных конструкций //Жилищное строительство. 2010. №. 4. С. 29-32.
131. Kiran T., Anand, N., Mathews, M. E., Kanagaraj, B., Andrushia, A. D., Lubloy, E., & Jayakumar, G. Investigation on improving the residual mechanical properties of reinforcement steel and bond strength of concrete exposed to elevated temperature //Case Studies in Construction Materials. 2022. Т. 16. С. e01128.
132. Li Z., Liu, Y., Huo, J., Elghazouli, A. Y. Experimental and analytical assessment of RC joints with varying reinforcement detailing under push-down loading before and after fires //Engineering Structures. 2019. Т. 189. С. 550-564.
133. Parthasarathi N., Satyanarayanan K. S. Progressive collapse behavior of reinforced concrete frame exposed to high temperature //Journal of Structural Fire Engineering. 2020. Т. 12. №. 1. С. 110-124.
134. Матвиенко В. Е. Сопротивление железобетонной балки воздействию пожара в стадии работы как висячей системы //Перспективы развития строительного комплекса. 2020. С. 235-240.
135. Тамразян А. Г., Мехрализадех А. Б. Особенности проявления огневых воздействий при расчете конструкций на прогрессирующее разрушение зданий с переходными этажами //Пожаровзрывобезопасность. 2012. Т. 21. №. 12. С. 41-44.
136. Caredda G., Makoond N., Buitrago M., Sagaseta J. Learning from the progressive collapse of buildings //Developments in the built environment. 2023. Т. 15. С. 100194.
137. Sasani M., Werner A., Kazemi A. Bar fracture modeling in progressive collapse analysis of reinforced concrete structures // Engineering Structures. 2011. № 2 (33). С. 401–409.
138. Adam J. M. [и др.]. Dynamic performance of a real-scale reinforced concrete building test under a corner-column failure scenario // Engineering Structures. 2020. (210).
139. Meng L., Ding Y., Li L., Wei J., Li M., Wang J., Liu J. Study on dynamic properties of lightweight ultra-high performance concrete (L-UHPC) //Construction and Building Materials. 2023. Т. 399. С. 132526.
140. Баженов Ю. М. Бетон при динамическом нагружении / Ю. М. Баженов, Москва: Стройиздат, 1970. 271 с.

141. Гениев Г. А. Метод определения динамических пределов прочности бетона // Бетон и железобетон. 1998. № 1. С. 18–19.
142. Nam J. W., Kim H. J., Kim S. B., Jay Kim J. H., Byun K. J. Analytical study of finite element models for FRP retrofitted concrete structure under blast loads // *International Journal of Damage Mechanics*. 2009. № 5 (18). С. 461–490.
143. Yang Y., Wu C., Liu Z. Rate dependent behaviour of 3D printed ultra-high performance fibre-reinforced concrete under dynamic splitting tensile // *Composite Structures*. 2023. Т. 309. С. 116727.
144. Wei J., Cheng B., Li L., Long W. J., Khayat K. H. Prediction of dynamic mechanical behaviors of coral concrete under different corrosive environments and its enhancement mechanism // *Journal of Building Engineering*. 2023. Т. 63. С. 105507.
145. Баженова А. В., Цветков К. А. Экспериментальная оценка влияния некоторых факторов на прочность бетона при однократном динамическом воздействии // *Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании*. 2017. С. 206–212.
146. Федорова Н. В., Медянкин М. Д., Бушова О. Б. Определение параметров статико-динамического деформирования бетона // *Промышленное и гражданское строительство*. 2020. №. 1. С. 4–11.
147. Гениев Г. А. Метод определения динамических пределов прочности бетона // Бетон и железобетон. 1998. № 1. С. 18–19
148. Yu W., Jin L., Du X. Influence of pre-static loads on dynamic compression and corresponding size effect of concrete: Mesoscale analysis // *Construction and Building Materials*. 2021. (300). С. 124302.
149. Lai J., Sun W. Dynamic behaviour and visco-elastic damage model of ultra-high performance cementitious composite // *Cement and Concrete Research*. 2009. Т. 39. №. 11. С. 1044–1051.
150. Levitchich V., Kvasha V., Boussalis H., Chassiakos A., Kosmatopoulos E. Seismic performance capacities of old concrete // *Proceedings, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, BC, Canada*. 2004. С. 1–6.
151. Тамразян А. Г., Есаян С. Г. Механика ползучести бетона // М.: МГСУ. 2012.
152. Сидоров В. Н. Численное моделирование реологических свойств строительных материалов на примере ползучести бетона // *Безопасность строительного фонда России проблемы и решения*. 2019. С. 129–137.
153. Fallon C.T., Quiel S.E., Naito C.J. Uniform Pushdown Approach for Quantifying Building-Frame Robustness and the Consequence of Disproportionate Collapse // *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2016. Vol. 30. Iss. 6

REFERENCES

1. Kolchunov V.I., Fedorova N.V. Nekotorye problemy zhivuchesti zhelezobetonnykh konstruktivnykh sistem pri avarijnykh vozdeystviyah [Some problems of survivability of reinforced concrete structural systems under emergency impacts] // *Bulletin of the Scientific Research Center Construction*. 2018. No. 1. pp. 115–119. (rus)
2. Fedorova N.V., Savin S.YU. Progressive collapse resistance of facilities experienced to localized structural damage - an analytical review // *Building and Reconstruction*. 2021. Vol. 95, No 3. Pp. 76–108.
3. Kiakojoury F., De Biagi V., Chiaia B., Sheidai M. R. Progressive collapse of framed building structures: Current knowledge and future prospects // *Engineering Structures*. 2020. No December 2019 (206). С. 110061.
4. Bondarenko V. M., Kolchunov V. I. Ekspoziciya zhivuchesti zhelezobetona [Exposition of the survivability of reinforced concrete] // *News of higher educational institutions. Construction*. 2007. No. 5. pp. 4–8. (rus)
5. Kolchunov V.I., Klyueva N.V., Androsova N.V., Bukhtiyarova A.S. ZHivuchest' zdaniy i sooruzhenij pri zaproektnykh vozdeystviyah [Survivability of buildings and structures under beyond-design influences]. М.: ASV Publishing House, 2014. 208 p. (rus)
6. Tamrazyan A.G. Konceptual'nye podhody k ocenke zhivuchesti stroitel'nykh konstrukcij, zdaniy i sooruzhenij [Conceptual approaches to assessing the survivability of building structures, buildings and structures] // *Reinforced Concrete Structures*. 2023. Т. 3. No. 3. P. 62–74. (rus)
7. Almazov V. O. Khoi Khao Zui. Dinamika progressiruyushchego razrusheniya monolitnykh mnogoetazhnykh karkasov [Dynamics of progressive destruction of monolithic multi-story frames]. М.: Publishing House ASV. - 2013–128p. (rus)
8. Hadi M. N. S., Alrudaini T. M. S. Preventing the progressive collapse of reinforced concrete buildings // *International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing*. 2011. P. 1–12.
9. Mohamed O., Al Khattab R., Mishra A., Isam, F. Recommendations for reducing progressive collapse potential in flat slab structural systems // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Т. 471. №. 5. P. 052069.
10. Hammad K., Lofty I., Naiem M. Enhancing Progressive Collapse Resistance in Existing Buildings // *Design and Construction of Smart Cities*. 2021. P. 39–46.
11. Yihai Bao, Sashi K Kunnath, Sherif El-Tawil, Hai S Lew. Macromodel-based simulation of progressive collapse: reinforced concrete frame structures // *Journal of Structural Engineering*. 2008, Vol. 134, No. 7. P. 1079–1091.

12. Mohajeri Nav F. Analytical investigation of reinforced concrete frames under middle column removal scenario // *Adv. Struct. Eng.* 2018. № 21.9 P. 1388–1401.
13. Ahmadi R., Rashidian O., Abbasnia R., Mohajeri Nav F., Usefi N. Experimental and numerical evaluation of progressive collapse behavior in scaled RC beam-column subassemblage // *Shock and Vibration*. 2016. T. 2016.
14. Geniev G.A., Kolchunov V.I., Klyueva N.V. Prochnost' i deformativnost' zhelezobetonnykh konstrukcij pri zaproektnykh vozdejstviyah [Strength and deformability of reinforced concrete structures under beyond-design influences]. M.: ASV, 2004. 216 p. (rus)
15. Thaer M., Alrudaini S. and Muhammad, N. S. H. A New Design to Prevent Progressive Collapse of Reinforced Concrete Buildings // The 5th Civil Engineering Conference in The Asian Region and Australasian Structural Engineering Conference, 2010.
16. Travush V.I. Shapiro G.I. Kolchunov V.I. Leontyev E.V. Fedorova N.V. Proektirovanie zashchity krupnopanel'nykh zdaniy ot progressiruyushchego obrusheniya [Design of protection of large-panel buildings from progressive collapse] // *Housing Construction*. 2019. No 3. Pp. 40-46. (rus)
17. Azim I., Yang J., Bhatta S., Wang F., Liu Q. F. Factors influencing the progressive collapse resistance of RC frame structures // *Journal of Building Engineering*. 2020. T. 27. C. 100986.
18. Eremin K. I., Matveyushkin S. A. Osobennosti ekspertizy i NK metallicheskih konstrukcij ekspluatiruemykh sooruzhenij [Features of examination and NDT of metal structures of operated structures] // *In the world of non-destructive testing*. 2008. No. 4. pp. 4-7.
19. SP 296.1325800.2017. Zdaniya i sooruzheniya. Osobyje vozdejstviya [Buildings and structures. Special Impacts]. 2018 (rus)
20. SP 385.1325800. 2018. Zashchita zdaniy i sooruzhenij ot progressiruyushchego obrusheniya. Pravila proektirovaniya. Osnovnye polozheniya [Protection of buildings and structures from progressive collapse. Design rules. The main provisions]. M.: Standartinform, 2018. P. 19 (rus)
21. ASCE 76-23. Standard for Mitigation of Disproportionate Collapse Potential in Buildings and Other Structures. - American Society of Civil Engineers. 2023
22. GSA (General Services Administration). Alternate path analysis and design guidelines for progressive collapse resistance (Revision). - General Services Administration. 2016
23. BS EN 1991-1-7:2006 Eurocode 1. Actions on structures. General actions. Accidental actions. Comite Europeen de Normalisation (2002), Draft pr EN 1992-1-1
24. Bondarenko V.M., Borovskikh A.V. Iznos, povrezhdeniya i bezopasnost' zhelezobetonnykh sooruzhenij [Wear, damage and safety of reinforced concrete structures]. – M.: Rusanova Publishing House, 2000. 144 p. (rus)
25. Kolchunov V.I., Kolchunov V.I., Fedorova N.V. Deformacionnye modeli zhelezobetona pri osobykh vozdejstviyah [Deformation models of reinforced concrete under special influences] // *Industrial and civil construction*. 2018. No. 8. pp. 54-60. (rus)
26. Bondarenko V.M., Kolchunov V.I. Raschetnye modeli silovogo soprotivleniya zhelezobetona [Calculation models of force resistance of reinforced concrete]. Moscow: ASV Publishing House. 2004. 472 p. (rus)
27. Golyshev A.B. Bachinsky V.Ya., Polishchuk V.P. Zhelezobetonnye konstrukcii. Soprotivlenie zhelezobetona [Reinforced concrete structures. Resistance of reinforced concrete]. T.1. K.: Logos, 2001. 481 p. (rus)
28. Rastorguev B.S., Plotnikov A.I. Obespechenie zhivuchesti grazhdanskikh zdaniy pri osobykh vozdejstviyah [Ensuring the survivability of civil buildings under special influences] // Thematic scientific-practical conference “City construction complex and the safety of life support for citizens”: collection. reports. M.: MGSU, 2005. 9-10 (rus)
29. Orton S. Development of a CFRP System to Provide Continuity in Existing Reinforced Concrete Buildings Vulnerable to Progressive Collapse, Dissertation, 2007
30. Kim J. and Yu J. Analysis of Reinforced Concrete Frames Subjected to Column Loss // *Magazine of Concrete Research*. 2012. V.64(1), pp. 21-33
31. D3–1: Design recommendations against progressive collapse in steel and steel-concrete buildings. European Convention for Constructional Steelwork (ECCS). FAILNOMORE. – 2021.
32. GOST 27.002-89.9. Nadezhnost' v tekhnike. Terminy i opredeleniya [Reliability in technology. Terms and Definitions]. M.: IPK Publishing House of Standards, 1990. 38 p. (rus)
33. Makhutov N. A., Petrov V. P., Reznikov D. O. Ocenka zhivuchesti slozhnykh tekhnicheskikh sistem [Assessment of the survivability of complex technical systems] // *Problems of safety and emergency situations*. 2009. – No. 3. – pp. 47-66. (rus)
34. Raiser V. D. Raschet i normirovanie nadezhnosti stroitel'nykh konstrukcij [Calculation and standardization of reliability of building structures]. M.: Stroyizdat, 1995. 348 p. (rus)
35. Antseliovich L. L. Nadezhnost', bezopasnost' i zhivuchest' samoleta [Reliability, safety and survivability of the aircraft] // M.: Mechanical Engineering. 1985. – T. 3985. – P. 296 (rus)

36. Bolotin V.V. *Primenenie metodov teorii veroyatnostej i teorii nadezhnosti v raschetah sooruzhenij* [Application of methods of probability theory and reliability theory in the calculations of structures]. M.: Stroyizdat, 1971. (rus)
37. Tur V.V., Nadolsky V.V. *Koncepciya proektirovaniya stroitel'nyh konstrukcij na osnove chislennyh modelej soprotivleniya* [The concept of designing building structures based on numerical resistance models] // *Construction and Reconstruction*. 2022. No. 6. P. 78-90 (rus)
38. Bassam A. Izzuddin, Miguel F. Pereira, Ulrike Kuhlmann, Lars Rölle, Ton Vrouwenvelder, Bernt J. Leira, *Application of Probabilistic Robustness Framework: Risk Assessment of Multi-Storey Buildings under Extreme Loading* // *Struct. Eng. Int.* 2012. 22(1). 79-85.
39. Ellingwood B R. *Mitigating risk from abnormal loads and progressive collapse* // *J. Perform. Constr. Fac.* 2006. 20 (4). 315-323.
40. Biagi V. D., Kiakojouri F., Chiaia B., Sheidaii M. R. *A simplified method for assessing the response of RC frame structures to sudden column removal* // *Applied Sciences*. 2020. T. 10. №. 9. C. 3081.
41. Chen C. H., Zhu Y. F., Yao Y., Huang Y., Long X. *An evaluation method to predict progressive collapse resistance of steel frame structures* // *Journal of Constructional Steel Research*. 2016. T. 122. C. 238-250.
42. Alekseytsev, A.V. *Mechanical safety of reinforced concrete frames under complex emergency actions* // *Magazine of Civil Engineering*. 2021. 103(3). Article No. 10306. DOI: 10.34910/MCE.103.6
43. Lizogub A.A., Tur A.V., Tur V.V. *Veroyatnostnyj podhod k ocenke zhivuchesti konstruktivnyh sistem iz sbornogo i monolitnogo zhelezobetona* [Probabilistic approach to assessing the survivability of structural systems made of prefabricated and monolithic reinforced concrete] // *Construction and Reconstruction*. 2023. T. 108, No. 4. P. 95 – 107 (rus)
44. Naghavi F., Tavakoli H. R. *Probabilistic prediction of failure in columns of a steel structure under progressive collapse using response surface and artificial neural network methods* // *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*. 2022. C. 1-17.
45. Cardoso J. B., de Almeida J. R., Dias J. M., Coelho P. G. *Structural reliability analysis using Monte Carlo simulation and neural networks* // *Advances in Engineering Software*. 2008. T. 39. №. 6. C. 505-513.
46. Tur V.V., Tur A.V., Derechennik S.S. *Checking of structural system robustness based on pseudo-static full probabilistic approach* // *Proceedings of the fib Symposium 2019: Concrete-Innovations in Materials, Design and Structures*. 2019. Pp. 2126-2133.
47. Dyagtyar A.N. *Optimizaciya zhivuchesti konstruktivno nelinejnyh zhelezobetonnyh sterzhnevnyh konstrukcij v zapredel'nyh sostoyaniyah* [Optimization of the survivability of structurally nonlinear reinforced concrete rod structures in extreme states]: thesis. Orel: [Orlov. State Tech. University], 2005. (rus)
48. Geniev G.A. *O principe ekvigradientnosti i primeneni ego k optimizacionnym zadacham ustojchivosti sterzhnevnyh sistem* [On the principle of equigradiance and its application to optimization problems of stability of rod systems] // *Structural mechanics and design of structures*. 1979. No. 6. pp. 8-13. (rus)
49. Maslennikov A. M. *Riski vozniknoveniya prirodnyh i tekhnogennyh katastrof* [Risks of natural and man-made disasters]. St. Petersburg, 2008.165p. (rus)
50. Kudzis A.P. *Ocenka nadezhnosti zhelezobetonnyh konstrukcij* [Reliability assessment of reinforced concrete structures]. Vilnius: Mokslas, 1985. 156 p. (rus)
51. Kotlyarovskiy V.A., Zabegaev A.V. *Avarii i katastrofy. Preduprezhdenie i likvidaciya posledstvij* [Accidents and disasters. Prevention and mitigation of consequences]. KN.5.-M.: ASV, 2011.-414 p. (rus)
52. STB ISO 2394-2007. *Nadezhnost' stroitel'nyh konstrukcij. Obshchie principy* [Reliability of building structures. General principles Intro]. Minsk: State Standard of the Republic of Belarus, 2007. 69 p. (rus)
53. TKP EN 1990-2011. *Osnovy proektirovaniya konstrukcij* [Fundamentals of structural design]. Minsk: Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 2012. 70 p. (rus)
54. Nadolsky V.V., Verevka F.A. *Osobennosti opredeleniya znachenij indeksa nadezhnosti dlya raznyh periodov povtoryaemosti* [Features of determining the values of the reliability index for different periods of repetition] // *Prospective directions of innovative development of construction and training of engineering personnel: collection of scientific articles of the XXI International Scientific and Methodological Seminar*. – 2018. P.205-212. (rus)
55. Kolchunov V. I., Tur V. V. *Napravleniya proektirovaniya konstruktivnyh sistem v osobyh raschetnyh situatsiyah* [Directions for designing structural systems in special design situations] // *Industrial and civil construction*. 2023. No. 7. P. 5-15. (rus)
56. Fu G., Frangopol D. M. *Balancing weight, system reliability and redundancy in a multiobjective optimization framework* // *Structural Safety*. 1990. T. 7. №. 2-4. C. 165-175.
57. Baker J. W., Schubert M., Faber M. H. *On the assessment of robustness* // *Structural safety*. 2008. T. 30. №. 3. C. 253-267.
58. Chen Y., Yang G. P., Xia Q. Y., Wu G. W. *Enrichment and characterization of dissolved organic matter in the surface microlayer and subsurface water of the South Yellow Sea* // *Marine Chemistry*. 2016. T. 182. C. 1-13.
59. Beck A. T., da Rosa Ribeiro L., Costa L. G., Stewart M. G. *Comparison of risk-based robustness indices in progressive collapse analysis of building structures* // *Structures. Elsevier*. 2023. T. 57. C. 105295.

60. Unified Facilities Criteria. Design of buildings to resist progressive collapse (UFC 4-023-03) Washington, DC: Department of Defence (DoD), 2009.
61. Abdelwahed B. A review on building progressive collapse, survey and discussion // *Case Studies in Construction Materials*. 2019. (11).
62. Qiao H., Yang Y., Zhang J. Progressive Collapse Analysis of Multistory Moment Frames with Varying Mechanisms // *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2018. № 4 (32). C. 04018043.
63. Almusallam T. H., Elsanadedy H. M., Al-Sallou, Y. A., Siddiqui N. A., Iqbal R. A. Experimental investigation on vulnerability of precast RC beam-column joints to progressive collapse // *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2018. T. 22. C. 3995-4010.
64. ACI 318-19 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary American Concrete Institute, 2019
65. Abdelazim W., Mohamed H. M., Benmokrane B. Inelastic Second-Order Analysis for Slender GFRP-Reinforced Concrete Columns: Experimental Investigations and Theoretical Study // *Journal of Composites for Construction*. 2020. № 3 (24).
66. MacGregor J. G. Design of slender concrete columns - revisited // *ACI Structural Journal*. 1993. № 3 (90). C. 302–307.
67. Kolchunov V. I., Prasolov N. O., Kozharinova L. V. Experimental and theoretical research on survivability of reinforced concrete frames in the moment of individual element buckling // *Vestnik MGSU*. 2011. № 3–2. C. 109–115.
68. GOST 27751-2014 Nadezhnost' stroitel'nykh konstrukcij i osnovanij. Osnovnye polozheniya [Reliability of building structures and foundations. Basic provisions]. Moscow: JSC "Research Center" Construction ", 2019. (rus)
69. Amiri S., Saffari H., Mashhadi J. Assessment of dynamic increase factor for progressive collapse analysis of RC structures // *Engineering Failure Analysis*. 2018. (84). C. 300–310.
70. Tsai M.-H. An Approximate Analytical Formulation for the Rise-Time Effect on Dynamic Structural Response Under Column Loss // *International Journal of Structural Stability and Dynamics*. 2018. № 03 (18). C. 1850038.
71. Weng J., Tan K. H., Lee C. K. Adaptive superelement modeling for progressive collapse analysis of reinforced concrete frames // *Engineering Structures*. 2017. (151). C. 136–152.
72. Gemmerling A.V. Raschet sterzhnevnykh sistem [Calculation of rod systems]. M.: Stroyizdat, 1974, 207 p. (rus)
73. Beglov A.D., Sanzharovsky R.S. O metodah resheniya uravnenij polzuchesti betona [On methods for solving concrete creep equations] // *Structural mechanics of engineering structures and structures*. 2005. No3. pp. 55-63. (rus)
74. Sanzharovsky R. S. Uстойчивost' elementov stroitel'nykh konstrukcij pri polzuchesti [Stability of elements of building structures under creep]. Leningrad: Leningrad University Publishing House, 1984. 217 p. (rus)
75. Sasani M., Sagioglu S. Progressive Collapse Resistance of Hotel San Diego // *Journal of Structural Engineering*. 2008. № 3 (134). C. 478–488.
76. Gemmerling A.V. Nesushchaya sposobnost' sterzhnevnykh stal'nykh konstrukcij [Bearing capacity of rod steel structures]. Moscow: Gosstroyizdat, 1958. 216 p. (rus)
77. Perelmuter A. V. Using the criterion of resistibility to assess of a structural limit state // *Vestnik MGSU*. 2021. № 12. C. 1559–1566.
78. Alexandrov A. V., Travush V. I., Matveev A. V. O raschete sterzhnevnykh konstruktsiy na ustoychivost' // *Industrial and Civil Engineering*. 2002. № 3. C. 16–19.
79. Trekin N. N., Kodysh E. N. Special Limit Condition Of Reinforced Concrete Structures And Its Normalization // *Promyshlennoe i Grazhdanskoe Stroitel'stvo*. 2020. № 5. C. 4–9.
80. Tur A.V. Soprotivlenie izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov pri vnezapnom prilozhenii nagruzki [Resistance of bending reinforced concrete elements under sudden application of load]: dis. Ph.D. tech. Sciences: spec. 05.23.01. Brest, 2012 (rus)
81. Shi F., Wang L., Dong S. Progressive collapse assessment of the steel moment-frame with composite floor slabs based on membrane action and energy equilibrium // *The Open Construction & Building Technology Journal*. 2017. T. 11. №. 1.
82. Belostotsky A. M., Akimov P. A., Dmitriev D. S., Nagibovich A. I., Petryashev N. O., Petryashev S. O. Raschetnoe issledovanie parametrov mekhanicheskoy bezopasnosti vysotnogo (404 metra) zhilogo kompleksa «One Tower» v delovom centre «Moskva-Siti» [Calculation study of the mechanical safety parameters of a high-rise (404 meters) residential complex " One Tower" in the Moscow City business center] // *Academia. Architecture and construction*. 2019. no. 3. pp. 122-129. (rus)
83. Belostotsky A. M., Akimov P. A., Aul A. A., Dmitriev D. S., Dyadchenko Yu. N., Nagibovich A. I. Raschetnoe obosnovanie mekhanicheskoy bezopasnosti stadionov k CHempionatu mira po futbolu 2018 goda [Calculation

- justification for the mechanical safety of stadiums for the World Cup 2018] // *Academia. Architecture and construction*. 2018. no. 3. pp. 118-129. (rus)
84. Travush V.I., Belostotsky A.M., Vershinin V.V., Ostrovsky K.I., Petryashev N.O., Petryashev S.O. CHislennoe modelirovanie fizicheski nelinejnoj dinamicheskoy reakcii vysotnyh zdaniy pri sejsmicheskikh vozdeystviyah urovnya MRZ [Numerical modeling of physically nonlinear dynamic response of high-rise buildings under seismic impacts at the MSE level] // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2016. No. 12(1). pp. 117-139. (rus)
 85. Perelmuter A.V., Kriksunov E.Z., Mosina N.V. Realizaciya rascheta monolitnyh zhilyh zdaniy na progressiruyushchee (lavinoobraznoe) obrushenie v srede vychislitel'nogo kompleksa "SCAD Office" [Implementation of the calculation of monolithic residential buildings for progressive (avalanche-like) collapse in the environment of the SCAD Office computer complex] // *Engineering and Construction Journal*. 2009. T. 4. No. 2. P. 13-18. (rus)
 86. Marchis A. G., Botez M. D. A numerical assessment of the progressive collapse resistance of RC frames with respect to the number of stories // *Procedia Manufacturing*. 2019. T. 32. P. 136-143.
 87. Marjanishvili S. and Agnew E. Comparison of Various Procedures for Progressive Collapse Analysis // *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2006. Vol. 20, No. 4, pp. 365-374
 88. Kaewkulchai G. Beam element formulation and solution procedure for dynamic progressive collapse analysis / G. Kaewkulchai, E.B. Williamson // *Computers & Structures*. 2004. T. 82. № 7-8. C.639-651.
 89. Izzuddin B.A., Vlassis A. G., Elghazouli A. Y., Nethercot D. A. Progressive collapse of multi-storey buildings due to sudden column loss—Part I: Simplified assessment framework // *Engineering structures*. 2008. T. 30. № 5. – C.1308-1318.
 90. Vlassis A.G., Izzuddin B. A., Elghazouli A. Y., Nethercot D. A. Progressive collapse of multi-storey buildings due to sudden column loss—Part II: Application // *Engineering Structures*. 2008. T. 30. № 5. C.1424-1438.
 91. Mckay A.E. Alternative Path Method in Progressive Collapse Analysis: Variation of Dynamic and Non-Linear Load Increase Factors / M.Sc., the University of Texas at San Antonio, 2008.
 92. Mohamed, O. A. Assessment of Progressive Collapse Potential in Corner Floor Panels of Reinforced Concrete Buildings // *Engineering Structures*. 2009. Vol. 31
 93. Brian I. S. Experimental and Analytical Assessment on the Progressive Collapse Potential of Existing Buildings // Master Thesis, Ohio State University. 2010, USA
 94. Fu F. Progressive Collapse Analysis of High-Rise Building With 3-D Finite Element Modeling Method // *Journal of Constructional Steel Research*. 2009. pp.1269-1278.
 95. Salem H. M. Computer-Aided Design of Framed Reinforced Concrete Structures Subjected to Flood Scouring // *Journal of American Science*. 2011. 7(10), pp. 191-200
 96. Kwasniewski L. Nonlinear dynamic simulations of progressive collapse for a multistory building // *Engineering Structures*. 2010. T. 32. № 5. C.1223-1235
 97. Savin S.Yu., Kolchunov V.I., Fedorova N.V. Raschet ustojchivosti zhelezobetonnyh karkasov zdaniy pri osobyyh vozdeystviyah [Calculation of the stability of reinforced concrete frames of buildings under special influences] // *Industrial and civil construction*. 2023. N 9. pp. 12-21. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.09.12-21 (rus)
 98. Bondarenko V.M., Migal R.E., Yagupov B.A. Rezervy i ekspoziciya konstruktivnoj bezopasnosti zdaniy, ekspluatiruyushchisya v agressivnoj srede [Reserves and exposure to the structural safety of buildings operating in an aggressive environment] // *Construction and reconstruction*. 2014. No. 1. P. 3-10 (rus)
 99. Bondarenko V. M., Kolchunov V. I. Koncepciya i napravleniya razvitiya teorii konstruktivnoj bezopasnosti zdaniy i sooruzhenij pri silovyh i sredovyh vozdeystviyah [Concept and directions of development of the theory of structural safety of buildings and structures under power and environmental influences] // *Industrial and civil construction*. 2013. No. 2. pp. 28-31. (rus)
 100. Galustov K.Z. Razvitie teorii polzuchesti betona i sovershenstvovanie metodov rascheta zhelezobetonnyh konstrukcij [Development of the theory of concrete creep and improvement of methods for calculating reinforced concrete structures] / Abstract of the dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences, Moscow, 2008 (rus)
 101. Golyshev A.B., Kolchunov V.I. Soprotivlenie zhelezobetona [Resistance of reinforced concrete]. Kyiv: Osnova, 2009. 432 p. (rus)
 102. Androsova N.B., Kolchunov V.I., Emelyanov S.G. Neravnovesnye i nelinejnye processy pri ocenke potenciala zhivuchesti zhelezobetonnyh konstruktivnyh sistem v zapredel'nyh sostoyaniyah [Nonequilibrium and nonlinear processes in assessing the survivability potential of reinforced concrete structural systems in extreme states] // *Structural mechanics of engineering structures and structures*. 2022. T. 18. No. 6. pp. 490-502. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-6-490-502>. (rus)
 103. Rekomendacii po uchetu polzuchesti i usadki betona pri raschete betonnyh i zhelezobetonnyh konstrukcij [Recommendations for taking into account creep and shrinkage of concrete when calculating concrete and reinforced concrete structures]. M.: Stroyizdat, 1988. 120 p. (rus)
 104. Travush V.I., Murashkin V.G. Vliyanie polzuchesti na raspredelenie deformacij i napryazhenij v izgibaemom elemente [The influence of creep on the distribution of deformations and stresses in a bending element] // *Construction and reconstruction*. 2017. No. 2. P. 57-70. (rus)

105. Bondarenko V. M., Klyueva N. V. K raschetu sooruzhenij, menyayushchih raschetnyu skhemu vsledstvie korrozionnyh povrezhdenij [To the calculation of structures that change the design scheme due to corrosion damage] // *News of higher educational institutions. Construction*. 2008. No. 1. pp. 4-12. (rus)
106. EN 1992-1-2: 2004. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, 2004.
107. Larionov E.A., Rimshin V.I., Zhdanova T.V. The principle of superimposition of deformations in the theory of creep [The principle of superimposition of deformations in the theory of creep] // *Structural mechanics of engineering structures and structures*. 2019. Vol. 15. No. 6. pp. 483–496. (rus)
108. Dellepiani M. G. et al. Numerical investigation on the creep response of concrete structures by means of a multi-scale strategy // *Construction and Building Materials*. 2020. T. 263. C. 119867.
109. Nazarenko V.G., Zvezdov A.I., Larionov E.A., Kvasnikov A.A. Konceptiya razvitiya prikladnoj teorii polzuchesti zhelezobetona [Concept of development of the applied theory of creep of reinforced concrete] // *Concrete and reinforced concrete*. 2020. No. 2 (602). pp. 8–11 (rus)
110. Bondarenko V.M., Markov S.V., Rimshin V.I. Korrozionnye povrezhdeniya i resurs silovogo soprotivleniya zhelezobetonnyh konstrukcij [Corrosion damage and the resource of force resistance of reinforced concrete structures] // *BST*, 2002. No. 8. P. 26-32. (rus)
111. Kmiecik P., Kamiński M. Modelling of reinforced concrete structures and composite structures with concrete strength degradation taken into consideration // *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2011. Volume 11. Issue 3. Pp. 623 – 636.
112. Minas A.I. Metod ocenki korrozionnoj stojkosti nekotoryh stroitel'nyh materialov [Method for assessing the corrosion resistance of some building materials] // *Construction materials and structures*. Rostov n/d., 1972. P.49-61. (rus)
113. Popesko A.I. Rabotosposobnost' zhelezobetonnyh konstrukcij, podverzhennyh korrozii [Performance of reinforced concrete structures subject to corrosion]. St. Petersburg: St. Petersburg State University. architect-builds univ., 1996. 182 p. (rus)
114. Guzeev E.A., Mitin A.A., Basova L.N. Deformativnost' i treshchinostojkost' szhatyh armirovannyh elementov pri dlitel'nom nagruzhении i dejstvii zhidkih sred [Deformability and crack resistance of compressed reinforced elements under long-term loading and action of liquid media] // Collection of articles. tr. NIIZHB. M.: Stroyizdat, 1984. 34 p. (rus)
115. Savitsky N.V., Guzeev E.A., Bondarenko V.M. Integral'nyj metod ocenki napryazhenno deformirovannogo sostoyaniya zhelezobetonnyh elementov v sluchae vozdejstviya agressivnoj sredy i silovoj nagruzki [Integral method for assessing the stress-strain state of reinforced concrete elements in the case of exposure to an aggressive environment and force load]. Corrosion resistance of concrete and reinforced concrete in aggressive environments. M.: 1984. P. 20-27 (rus)
116. Bondarenko V.M., Klyueva N.V. K raschetu sooruzhenij, menyayushchih raschetnyu skhemu vsledstvie korrozionnyh povrezhdenij [To the calculation of structures that change the design scheme due to corrosion damage] // *News of universities. Construction*. 2008. No. 1. pp. 4-12. (rus)
117. Bondarenko V.M., Rimshin V.I. Dissipativnaya teoriya silovogo soprotivleniya zhelezobetona [Dissipative theory of force resistance of reinforced concrete]. M.: Student, 2015. 111 p. (rus)
118. Bondarenko V. M. Silovoe deformirovanie, korrozionnye povrezhdeniya i energosoprotivlenie zhelezobetona [Force deformation, corrosion damage and energy resistance of reinforced concrete]. South-West. state University. Kursk. 2016. 67p. (rus)
119. Selyaev, L.M. Oshkina, P.V. Selyaev V.P. Himicheskoe soprotivlenie cementnyh betonov dejstviyu sul'fat-ionov [Chemical resistance of cement concrete to the action of sulfate ions] // Saransk: Mordov Publishing House. University, 2013 (rus)
120. Selyaev V.P., Selyaev P.V., Alimov M.F., Sorokin E.V. Ocenka ostatochnogo resursa zhelezobetonnyh izgibaemyh elementov, podverzhennyh dejstviyu hloridnoj korrozii [Assessment of the residual life of reinforced concrete bending elements exposed to chloride corrosion] // *Construction and reconstruction*. 2017. no. 6. pp. 49-58. (rus)
121. Klyueva N.V., Androsova N.B., Gubanova M.S. Kriterij prochnosti korrozionno povrezhdaemogo betona pri slozhnom napryazhennom sostoyanii [Strength criterion for corrosion-damaged concrete under complex stress state] // *Structural mechanics of engineering structures and structures*. 2015. No. 1. pp. 38-42. (rus)
122. Magda I. Mousa. Effect of bond loss of tension reinforcement on the flexural behaviour of reinforced concrete beams // *HBRC Journal*. 2016, 12:3, 235-241, DOI: 10.1016/j.hbrj.2015.01.003.
123. Zandi K, Coronelli D. Anchorage capacity of corroded reinforcement: Eccentric pull-out tests on beamend specimens. In: Report No. 2010-06, Department of Civil and Environmental Engineering. Goteborg, Sweden: Chalmers University of Technology

124. Popov D. S. Eksperimental'nye issledovaniya dinamicheskikh svoystv korrozionno-povrezhdennykh szhatykh zhelezobetonnykh elementov [Experimental studies of the dynamic properties of corrosion-damaged compressed reinforced concrete elements] // *Construction and reconstruction*. 2022. No. 2. pp. 55-64. (rus)
125. Kai Q., Zhiqiang H. U. A. N. G., Yunhao W. E. N. G., Xiaohui Y. U. Study on load resisting mechanism of corroded RC frame structures against progressive collapse // *Journal of Building Structures*. 2022. T. 43. №. 9. C. 181.
126. Tamrazyan A. The Bearing Capacity of Compressed Corrosion-Damaged Reinforced Concrete Elements under Lateral Pulse Loading // *Buildings*. 2023. T. 13. №. 9. C. 2133.
127. Leonovich, S. N., Litvinovsky, D. A., Chernyakevich, O. Yu., Stepanova, A. V. Prochnost', treshchinostojkost' i dolgovechnost' konstrukcionnogo betona pri temperaturnykh i korrozionnykh vozdeystviyakh : v 2 ch [Strength, crack resistance and durability of structural concrete under temperature and corrosion influences: in 2 parts]. Minsk: BNTU, 2016. Part 1. 390 p. (rus)
128. Istomin A.D., Petrova V.A. Usiliya v staticheski neopredelimiye zhelezobetonnykh konstrukciyakh pri silovykh i temperaturnykh vozdeystviyakh [Efforts in statically indeterminate reinforced concrete structures under force and temperature influences] // *Safety of the Russian construction fund, problems and solutions*. 2019. pp. 60-68. (rus)
129. Fedorov V.S., Levitsky V.E. Teoreticheskie osnovy prognozirovaniya izmeneniya prochnostnykh i deformativnykh harakteristik betona v usloviyakh pozhara [Theoretical foundations for predicting changes in the strength and deformation characteristics of concrete under fire conditions] // Problems of ensuring the safety of the Russian building stock: Proceedings of the III International Academic Readings. Kursk: Kursk State Technical University, 2004. pp. 236–244. (rus)
130. Fedorov V. S. Osnovnye polozheniya teorii rascheta ognestojkosti zhelezobetonnykh konstrukcij [Basic provisions of the theory of calculating the fire resistance of reinforced concrete structures] // *Housing Construction*. 2010. No. 4. pp. 29-32. (rus)
131. Kiran T., Anand, N., Mathews, M. E., Kanagaraj, B., Andrushia, A. D., Lubloy, E., & Jayakumar, G. Investigation on improving the residual mechanical properties of reinforcement steel and bond strength of concrete exposed to elevated temperature // *Case Studies in Construction Materials*. 2022. T. 16. C. e01128.
132. Li Z., Liu, Y., Huo, J., Elghazouli, A. Y. Experimental and analytical assessment of RC joints with varying reinforcement detailing under push-down loading before and after fires // *Engineering Structures*. 2019. T. 189. C. 550-564.
133. Parthasarathi N., Satyanarayanan K. S. Progressive collapse behavior of reinforced concrete frame exposed to high temperature // *Journal of Structural Fire Engineering*. 2020. T. 12. №. 1. C. 110-124.
134. Matvienko V. E. Soprotivlenie zhelezobetonnoj balki vozdeystviyu pozhara v stadii raboty kak visyachej sistemy [Resistance of a reinforced concrete beam to the effects of fire at the stage of operation as a hanging system] // *Prospects for the development of the construction complex*. 2020. pp. 235-240.
135. Tamrazyan A. G., Mehralizadeh A. B. Osobennosti proyavleniya ognevyykh vozdeystvij pri raschete konstrukcij na progressiruyushchee razrushenie zdaniy s perekhodnymi etazhami [Features of the manifestation of fire effects in the calculation of structures for the progressive destruction of buildings with transitional floors] // *Fire and Explosion Safety*. 2012. T. 21. No. 12. pp. 41-44.
136. Caredda G., Makood N., Buitrago M., Sagaseta J. Learning from the progressive collapse of buildings // *Developments in the built environment*. 2023. T. 15. C. 100194.
137. Sasani M., Werner A., Kazemi A. Bar fracture modeling in progressive collapse analysis of reinforced concrete structures // *Engineering Structures*. 2011. № 2 (33). C. 401–409.
138. Adam J. M. [и др.]. Dynamic performance of a real-scale reinforced concrete building test under a corner-column failure scenario // *Engineering Structures*. 2020. (210).
139. Meng L., Ding Y., Li L., Wei J., Li M., Wang J., Liu J. Study on dynamic properties of lightweight ultra-high performance concrete (L-UHPC) // *Construction and Building Materials*. 2023. T. 399. C. 132526.
140. Bazhenov Yu. M. Beton pri dinamicheskom nagruzhenii [Concrete under dynamic loading]. Moscow: Stroyizdat, 1970. 271 p. (rus)
141. Geniev G. A. Metod opredeleniya dinamicheskikh predelov prochnosti betona [Method for determining the dynamic strength limits of concrete] // *Concrete and reinforced concrete*. 1998. No. 1. P. 18–19. (rus)
142. Nam J. W., Kim H. J., Kim S. B., Jay Kim J. H., Byun K. J. Analytical study of finite element models for FRP retrofitted concrete structure under blast loads // *International Journal of Damage Mechanics*. 2009. № 5 (18). C. 461–490.
143. Yang Y., Wu C., Liu Z. Rate dependent behaviour of 3D printed ultra-high performance fibre-reinforced concrete under dynamic splitting tensile // *Composite Structures*. 2023. T. 309. C. 116727.
144. Wei J., Cheng B., Li L., Long W. J., Khayat K. H. Prediction of dynamic mechanical behaviors of coral concrete under different corrosive environments and its enhancement mechanism // *Journal of Building Engineering*. 2023. T. 63. C. 105507.
145. Bazhenova A. V., Tsvetkov K. A. Eksperimental'naya ocenka vliyaniya nekotorykh faktorov na prochnost' betona pri odnokratnom dinamicheskom vozdeystvii [Experimental assessment of the influence of some factors on the strength of concrete under a single dynamic impact] // *Integration, partnership and innovation in construction science and education*. 2017. pp. 206-212. (rus)

146. Fedorova N.V., Medyankin M.D., Bushova O.B. Opredelenie parametrov statiko-dinamicheskogo deformirovaniya betona [Determination of parameters of static-dynamic deformation of concrete] // *Industrial and civil construction*. 2020. No. 1. pp. 4-11. (rus)
147. Geniev G. A. Metod opredeleniya dinamicheskikh predelov prochnosti betona [Method for determining the dynamic strength limits of concrete] // *Concrete and reinforced concrete*. 1998. No. 1. P. 18–19 (rus)
148. Yu W., Jin L., Du X. Influence of pre-static loads on dynamic compression and corresponding size effect of concrete: Mesoscale analysis // *Construction and Building Materials*. 2021. (300). C. 124302.
149. Lai J., Sun W. Dynamic behaviour and visco-elastic damage model of ultra-high performance cementitious composite // *Cement and Concrete Research*. 2009. T. 39. №. 11. C. 1044-1051.
150. Levitch V., Kvasha V., Boussalis H., Chassiakos A., Kosmatopoulos E. Seismic performance capacities of old concrete // *Proceedings, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, BC, Canada*. 2004. C. 1-6.
151. Tamrazyan A. G., Yesayan S. G. Mekhanika polzuchesti betona [Mechanics of concrete creep] // М.: MGSU. 2012.
152. Sidorov V. N. Chislennoe modelirovanie reologicheskikh svoystv stroitel'nykh materialov na primere polzuchesti betona [Numerical modeling of the rheological properties of building materials using the example of concrete creep] // *Safety of the Russian building stock problems and solutions*. 2019. pp. 129-137.
153. Fallon C.T., Quiel S.E., Naito C.J. Uniform Pushdown Approach for Quantifying Building-Frame Robustness and the Consequence of Disproportionate Collapse. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2016. Vol. 30. Iss. 6

Информация об авторах:

Колчунов Виталий Иванович

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

Ильющенко Татьяна Александровна

ФГБОУ ВО «Курский государственный университет», г. Курск, Россия, старший преподаватель кафедры промышленного и гражданского строительства.
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия, начальник отдела технического нормирования в области строительства
E-mail: tatkhalina93@yandex.ru

Федорова Наталья Витальевна

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,
Советник РААСН, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой промышленного и гражданского строительства
E-mail: fedorova@mgsu.ru

Савин Сергей Юрьевич

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

Тур Виктор Владимирович

УО «Брестский государственный технический университет», г. Брест, Беларусь,
заслуженный работник образования РБ, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии бетона и строительных материалов.
E-mail: profturvic@gmail.com

Лизогуб Александр Александрович

УО «Брестский государственный технический университет», г. Брест, Беларусь,
м.т.н., младший научный сотрудник ОЛ «НИЦИС».
E-mail: p_332_14lizogub@mail.ru

Information about authors:

Kolchunov Vitaly I.

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
Full member of RAACS, Doctor of Tech. Sc., Professor, Professor of the Department of Reinforced Concrete and
Masonry Structures
E-mail: asiorel@mail.ru

Iliushchenko Tatiana A.

Kursk State University, Kursk, Russia.
Kursk, Russia, Senior Lecturer of the Department of Industrial and Civil Engineering.
construction.
Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia, Moscow, Russia,
Head of the Department of Technical Standardization in the field of construction.
E-mail: tatkhalina93@yandex.ru

Fedorova Natalia V.

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
Advisor of RAACS, Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of the Department of Industrial and Civil Engineering
E-mail: fedorova@mgsu.ru

Savin Sergei Y.

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

Tur Viktor V.

Brest State Technical University, Brest, Belarus,
doctor of technical sciences, Professor, Head the Department of Concrete Technology and Construction Materials
E-mail: profturvic@gmail.com

Lizahub Aliaksandr Al.

Brest State Technical University, Brest, Belarus,
master of eng. science, junior research fellow of BL «RCIC»
E-mail: p_332_14lizogub@mail.ru

А.Г. ТАМРАЗЯН¹, В.И. ЧЕРНИК¹¹ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»
(НИУ МГСУ), г. Москва, Россия

ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОЛОННАХ ПРИ ОГНЕВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ С УЧЕТОМ СТАДИИ ОХЛАЖДЕНИЯ

Аннотация. Статистика пожаров на территории Российской Федерации показывает, что в ряде регионов, находящихся в зонах с высокой сейсмической активностью, происходит наибольшее количество пожаров по стране. Это приводит к риску обрушений зданий при воздействии сейсмических нагрузок на вертикальные несущие конструкции, поврежденные в результате пожара. Нормативный подход к расчету огнесохранности железобетонных конструкций не учитывает тепломассоперенос на этапе, который следует после прекращения пожара. Проводится анализ распределения температурных полей по сечению железобетонной колонны с учетом стадий нагрева и охлаждения. Выполнены стандартные огневые испытания опытных железобетонных образцов. Продолжительность стандартного огневого воздействия 15, 30 и 45 мин. Для центральных областей сечения наибольшие температуры получены уже после нагрева, рост температуры составляет до 222%. Для уточнения картины распределения температурных полей выполняется численный теплотехнический КЭ расчет опытных образцов в ПК SOLIDWORKS. Основываясь на экспериментальных данных по термопарам, для каждого образца уточнены теплотехнические характеристики λ и C . По сравнению с нормативными значения вычисленных характеристик отличаются до 7,14 раза. Из результатов исследования следует, что для нахождения максимальных температур помимо стадии нагрева, необходимо рассматривать тепломассоперенос и в стадии охлаждения, когда температура на наружной поверхности образца начинает снижаться.

Ключевые слова: железобетонные колонны, тепломассоперенос, стандартный пожар, температурная кривая, землетрясение после пожара.

A.G. TAMRAZYAN¹, V.I. CHERNIK¹¹Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia

HEAT AND MASS TRANSFER IN REINFORCED CONCRETE COLUMNS UNDER FIRE ACTION WITH CONSIDERATION OF THE COOLING STAGE

Abstract. Statistics on fire incidents in the Russian Federation indicate that a number of regions with high seismic activity have the highest number of fires in the country. This poses a risk of building collapses due to seismic loads on vertical load-bearing structures damaged by fire. The current normative approach to the calculation of fire safety of reinforced concrete structures does not consider heat and mass transfer at the stage following the termination of the fire. The distribution of temperature fields along the cross-section of a reinforced concrete column is analyzed, taking into account the stages of heating and cooling. Standard fire tests of experimental reinforced concrete specimens are performed. The duration of standard fire exposure is 15, 30 and 45 minutes. For the central areas of the cross-section, the highest temperatures were obtained after heating, with a temperature increase of up to 222%. To elucidate the distribution of temperature fields, a numerical heat-technical FE calculation of experimental specimens in SOLIDWORKS PC is conducted. Based on the experimental data on thermocouples, the thermal characteristics λ and C are specified for each sample. The results of the study indicate that in order to identify the maximum temperatures, it is necessary to consider both the heating and cooling stages.

© Тамразян А.Г., Черник В.И., 2024

Keywords: reinforced concrete columns, heat and mass transfer, standard fire, temperature curve, earthquake after fire.

Введение

В настоящее время тенденция к усложнению железобетонных конструктивных систем, продиктованная современными экономическими и социальными требованиями, приводит к необходимости повышения их безопасности и учета на стадии проектирования не только отдельных особых воздействий, но и их комбинаций [1]. К таким комбинациям можно отнести, например, проблемы сейсмостойкости или живучести зданий против прогрессирующего обрушения в условиях пожара [2], средовых воздействий при учете коррозии арматуры и бетона [3], комбинация сейсмических сил и пожара [4], живучесть конструкций здания при особых воздействиях [5], ударных воздействиях и иных воздействиях техногенного характера.

Статистика пожаров на территории Российской Федерации за 2021 год [6] показывает, что в ряде регионов, находящихся в зонах с высокой сейсмической активностью (8-9 баллов), происходит наибольшее количество пожаров по стране. В первую очередь это относится к Камчатскому, Приморскому, Хабаровскому, Забайкальскому краям; Сахалинской, Амурской, Курганской, Магаданской областям, Еврейской автономной области, республике Калмыкия и другим регионам России. В указанных регионах происходит от 400 до 1000 пожаров в расчете на 100 тыс. чел.

В случае воздействия на здание с железобетонным каркасом сейсмических нагрузок после пожара может наступить преждевременная потеря несущей способности конструктивных элементов и коллапс всего здания. Основная опасность здесь связана с ухудшением физико-механических характеристик арматуры и бетона (см. рис. 1) после огневого воздействия [7, 8].

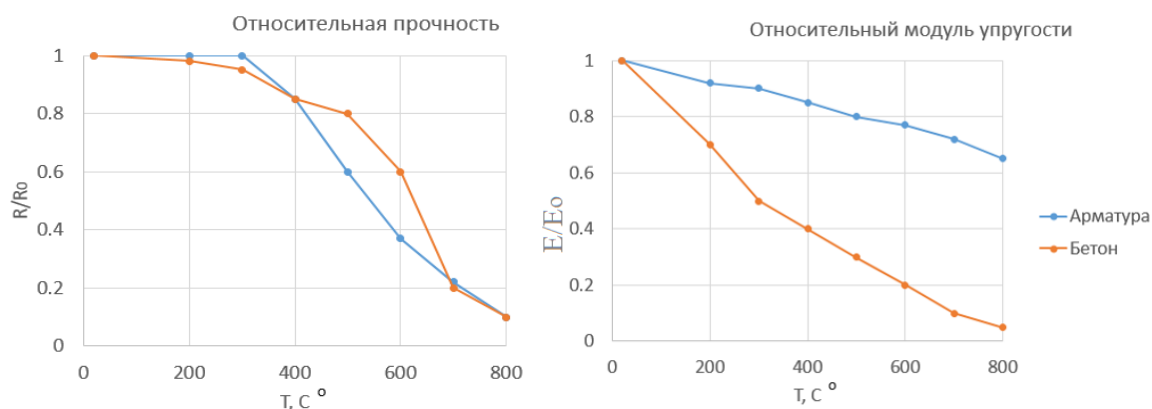


Рисунок 1 – Зависимость механических характеристик арматуры и бетона от температуры согласно данным СП 468.1325800.2019

Согласно методике, принятой в отечественных нормах по расчету огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций СП 468.1325800.2019, механические характеристики материалов уточняются в зависимости от температуры прогрева данного участка сечения с помощью коэффициентов $\gamma_{bt(st)}$ и $\beta_{b(s)}$, на которые умножаются соответственно расчетное сопротивление и модуль упругости бетона (арматуры). Значения коэффициентов указаны с учетом широкой базы экспериментальных исследований контрольных образцов нагретых до различных температур [9, 10].

Для установления значений механических характеристик и их изменения по сечению железобетонного элемента требуется определить распределение температурных полей при огневом воздействии. Для этого выполняется теплотехнический расчет конструкции с учетом процессов температуро- и массопереноса.

При определении температурных полей могут применяться аналитические [11] и численные методы [12]. В основе методов лежит решение дифференциального уравнения Фурье в частных производных (уравнение теплопроводности), которое имеет вид:

$$\left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) \cdot a = \frac{\partial t}{\partial \tau} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) \cdot a = \frac{\partial t}{\partial \tau}, \quad (1)$$

где, t – температура в точке тела с координатами (x, y, z) в момент времени τ ,
 a – коэффициент температуропроводности, м²/ч:

$$a = \frac{\lambda}{\rho C} \quad a = \frac{\lambda}{\rho C}, \quad (2)$$

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C);

C – удельная теплоемкость, кДж/(кг·°C);

ρ – плотность материала, кг/м³.

Экспериментально распределение температур по сечению железобетонного элемента может быть получено путем проведения стандартных огневых испытаний. При проведении огневых испытаний железобетонные образцы помещают в печь. Нагрев образцов в печи производится по зависимости соответствующей стандартной кривой по ГОСТ 30247-94 или ISO 834. Стандартная температурная кривая описывается уравнением:

$$t(\tau) = t_0 + 345 \lg(8\tau + 1) \quad t(\tau) = t_0 + 345 \lg(8\tau + 1). \quad (3)$$

Истинная температурная кривая, однако, будет отличаться от стандартной наличием нисходящей ветви охлаждения [13]. Температура в центре сечения железобетонного элемента в стадии охлаждения печи за счет тепловой инерции бетона будет повышаться до тех пор, пока не возникнет тепловое равновесие с наружными слоями. При определении механических характеристик бетонного сечения необходимо ориентироваться на максимальные значения температур, достигнутых в той или иной области поперечного сечения [14]. Это особенно актуально при оценке огнестойкости, когда необходимо оценить остаточную прочность конструкций в остывшем состоянии.

Для нахождения распределения температур на наружных гранях и внутри образца устанавливают термоэлектрические преобразователи (термопары). Количество и расположение термопар зависит от градиента температур, который предварительно уточняется теплотехническим расчетом. Продолжительность стандартного пожара обычно принимается кратной 30 мин, то есть 30, 60, 90, 120 мин и т. д. Это соответствует назначаемым пределам огнестойкости строительных конструкций по ГОСТ 30247-94 (REI). В модельных испытаниях может приниматься кратно 15 мин.

При необходимости огневые испытания проводят при наличии статической нагрузки на образец. Как показали экспериментальные исследования [15] трещины и сколы, возникающие при высокотемпературном прогреве бетона, развиваются более интенсивно при наличии вертикальной статической нагрузки, что ведет к большей деградации механических характеристик железобетонных колонн.

На несущую способность образцов после пожара оказывает влияние наличие усадочных трещин [16]. Во время огневых испытаний в бетонном сечении развиваются повреждения. На начальной стадии образуются трещины, вызванные температурными деформациями. Далее на отдельных участках появляются сколы и отслоения бетона в результате повышения порового давления. Эти дефекты существенно снижают сейсмические характеристики железобетонных конструкций.

В работе [17] были проведены стандартные огневые испытания сборных железобетонных колонн. Выяснено, что уже на этапе воздействия пожара

продолжительностью 30, 60 и 90 минут колонны получают множество механических повреждений в виде сколов и отслоений. Это снизило начальную прочность и жесткость колонн при воздействии малоцикловой нагрузки.

Существенным фактором, влияющим на сейсмический отклик железобетонных колонн, является время, прошедшее с момента повреждения пожаром. На большом временном промежутке механические свойства бетона восстанавливаются до 80-90%. Испытания, проведенные для колонн после 30 и 60 дней после пожара, показали улучшение сейсмических характеристик для более поздних колонн.

В работе [18] исследуется влияние числа обогреваемых граней колонны на ее сейсмический отклик. Было замечено, что при уменьшении числа обогреваемых сторон максимальная температура бетонного сердечника уменьшается. Как следствие, при этом увеличивается несущая способность и суммарная рассеиваемая энергия.

Методика расчета огнестойкости железобетонных конструкций, описанная в отечественных нормах 468.1325800.2019, не учитывает в части теплотехнического расчета стадию после окончания нагрева. Однако, тепло- и массоперенос на этом этапе будет продолжаться вплоть до достижения состояния температурного равновесия. Охлаждение при этом может происходить постепенно в течении нескольких часов (естественное охлаждение) или кратковременно, например, при тушении пожара (в этом случае будет наблюдаться появление дополнительных температурных напряжений в элементе). В данном исследовании проводится анализ распределения температурных полей по сечению железобетонной колонны каркаса с учетом стадий нагрева и охлаждения.

Модели и методы

В качестве опытных образцов были изготовлены шесть идентичных железобетонных колонн квадратного сечения размерами 150x150мм (см. рис. 2). Общая высота колонны 900мм, высота рабочей части 600мм, в нижней части колонны предусмотрено уширение сечением 300x300мм высотой 300мм. Процент продольного армирования для колонн составляет $\mu_s=1,215\%$.

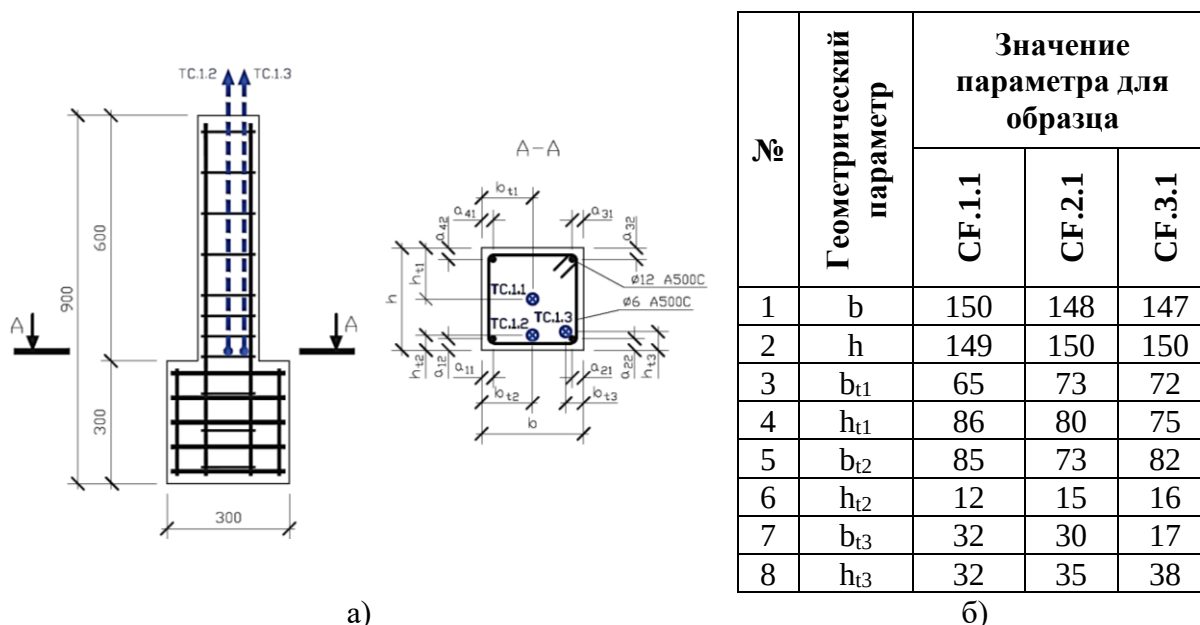


Рисунок 2 – Геометрические размеры железобетонных образцов: а) схема образца (синим цветом отмечены термодатчики), б) значения геометрических параметров

Стандартные огневые испытания выполняются по методике, описанной в ГОСТ30247.0-94. Образцы скомпонованы попарно в серии. Каждая серия испытана при

разной продолжительности стандартного пожара: 1 серия (образцы CF.1.1 и CF.1.2) – 15 минут; 2 серия (образцы CF.2.1 и CF.2.2) – 30 минут; 3 серия (образцы CF.3.1 и CF.3.2) – 45 минут.

Датчики для измерения температуры (термопреобразователи марки ТПК 225-0,7/5) крепились к арматурным каркасам вязальной проволокой. Маркировка термопар соответствует маркировке испытуемых образцов: ТС.і.і, где і – номер серии образцов (1, 2 и 3); j – номер термопары (1 – термопара в центре сечения, 2 – на краю сечения, 3 – в углу сечения).

Эксперимент проводился при следующих параметрах окружающей среды: температура окружающей среды – (9,2-13,5) °С; атмосферное давление – (99,8 – 100,4) кПа; относительная влажность воздуха – (48 – 51) %; скорость движения воздуха – 0,1 м/с.

Стандартные огневые испытания опытных образцов выполнялись на базе НИЦ «Пожарная безопасность» НИУ МГСУ в малогабаритной печи. Устройство испытательной установки дано на рис. 3.а.

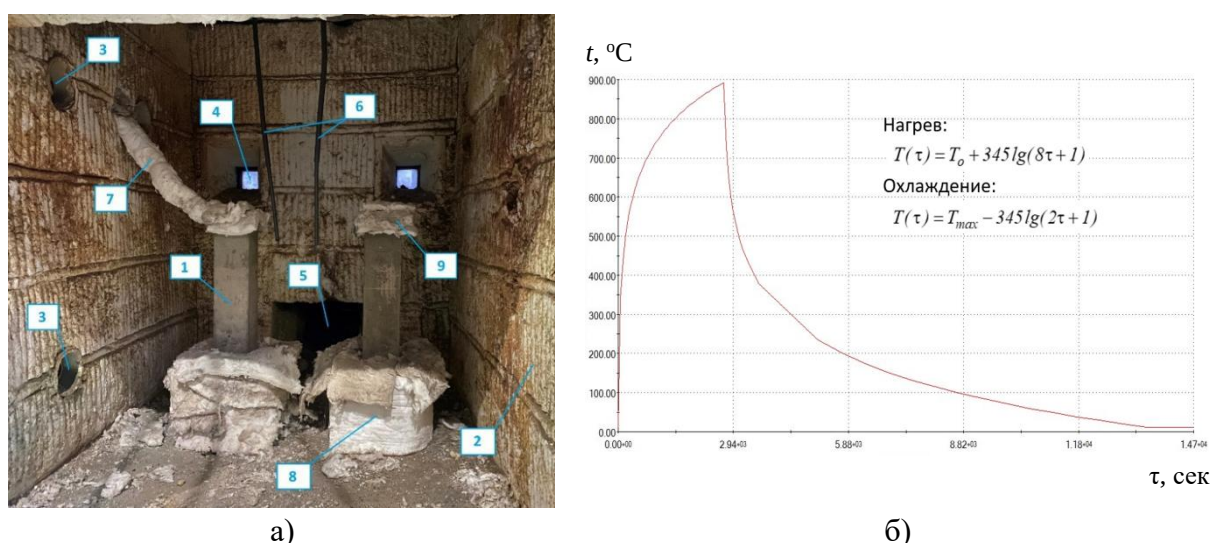


Рисунок 3 – Схема стандартных огневых испытаний: а) огневая печь, б) стандартная температурная кривая с учетом стадии охлаждения:

1 – железобетонный образец; 2 – огневая печь (внутренняя камера); 3 – сопло для подачи рабочего газа; 4 – окно для наблюдения за ходом испытаний; 5 – воздухозаборник; 6 – щупы термопар для контроля температуры внутри печи; 7 – выводы термопар, забетонированных в образце; 8, 9 – изоляция матами из керамоволокна нижнего ушрения и оголовка колонны, соответственно.

Пламя горелок поверхности образцов в процессе испытаний не касалось. Температурный режим в печи принимался по стандартной кривой (см. формулу 3). Отклонения средней измеренной температуры внутри печи от значения не превышают $\pm 15\%$, что соответствует допустимым значениям по таблице 1 ГОСТ 30247.0-94.

После достижения необходимой продолжительности огневого воздействия подача рабочего газа прекращалась. Образцы выдерживались в закрытой камере вплоть до полного остывания (до 20 °С). Остывание печи после стандартного пожара максимальной продолжительности происходило около 3 часов. Регистрация температуры в образцах производилась как в стадии нагрева, так и в стадии охлаждения печи.

Поскольку по полученным в процессе испытаний показаниям термопар возможно установить значения температур только в отдельных точках сечения, то для уточнения картины распределения температурных полей выполнялся численный теплотехнический расчет опытных образцов. При чем значения теплотехнических характеристик бетона λ и C

назначались из сопоставления экспериментальных температурных кривых по данным термопар и расчетных. В качестве критерия принималась погрешность при определении температуры в конце стадии нагрева не превышающая 10%.

Подготовка расчетной модели и решение выполнено в конечно-элементном программном комплексе SOLIDWORKS. Расчет выполнен в трехмерной постановке с использованием объемных конечных элементов типа тетраэдр. Минимальный размер элемента принят исходя из наименьшего диаметра арматуры – 6мм, максимальный размер элемента 20мм. Использовано разбиение на основе смешанной кривизны. Количество узлов конечной модели 562027, количество элементов 394573. Наименьшие размеры конечных элементов получены при разбиении арматуры и прилегающих областей бетона, наибольшие при разбиении наружных слоев тела колонны.

Теплотехнические характеристики арматурной стали приняты одинаковыми для всех образцов в зависимости от температуры: $\lambda=0,58-0,0048 \cdot t$ и $C=0,48-0,00063 \cdot t$. Значения плотности бетона и арматуры считаются независимыми от температуры и равными соответственно $\rho_b=2240 \text{ кг/м}^3$ и $\rho_s=7850 \text{ кг/м}^3$.

В качестве термических нагрузок приняты: начальная температура образца и температура в печи во время испытаний. Начальная температура равномерна по всему образцу и составляет $t_0=11,4^\circ\text{C}$. Температура в печи принята по стандартной температурной кривой по ГОСТ 30247.0-94 (см. рис. 3.б). Взаимодействие между поверхностью образца и нагретым воздухом в печи принято по конвективному механизму. Коэффициентом конвективной теплопередачи $h=25 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$, что соответствует естественной конвекции при малой скорости движения воздуха в печи (0,1 м/с). Тепловая нагрузка приложена только к граням рабочей части образца (нижнее уширение изолировано).

Снижение температуры после стадии нагрева принимается по тому же закону, что и нагревание (см. рис. 3.б), однако коэффициент при τ принят равным 2 – охлаждение до начальной температуры происходит 3 часа.

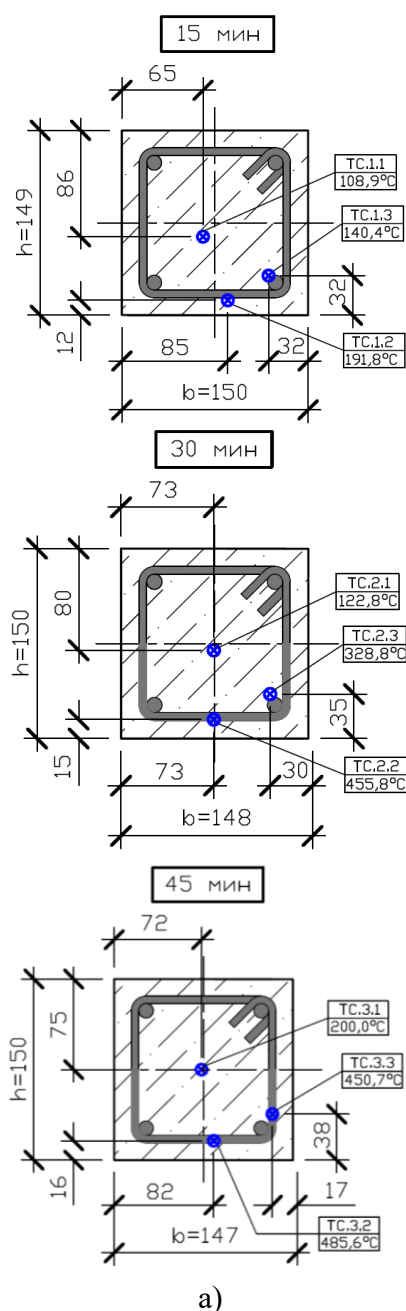
Результаты исследования и их анализ

В конце стадии нагрева средняя температура внутри печи составила: после 15 мин пожара $742,7^\circ\text{C}$, после 30 мин – $835,3^\circ\text{C}$, после 45 мин – $896,0^\circ\text{C}$. На рис. 4 представлены показания в термопарах и температурные кривые.

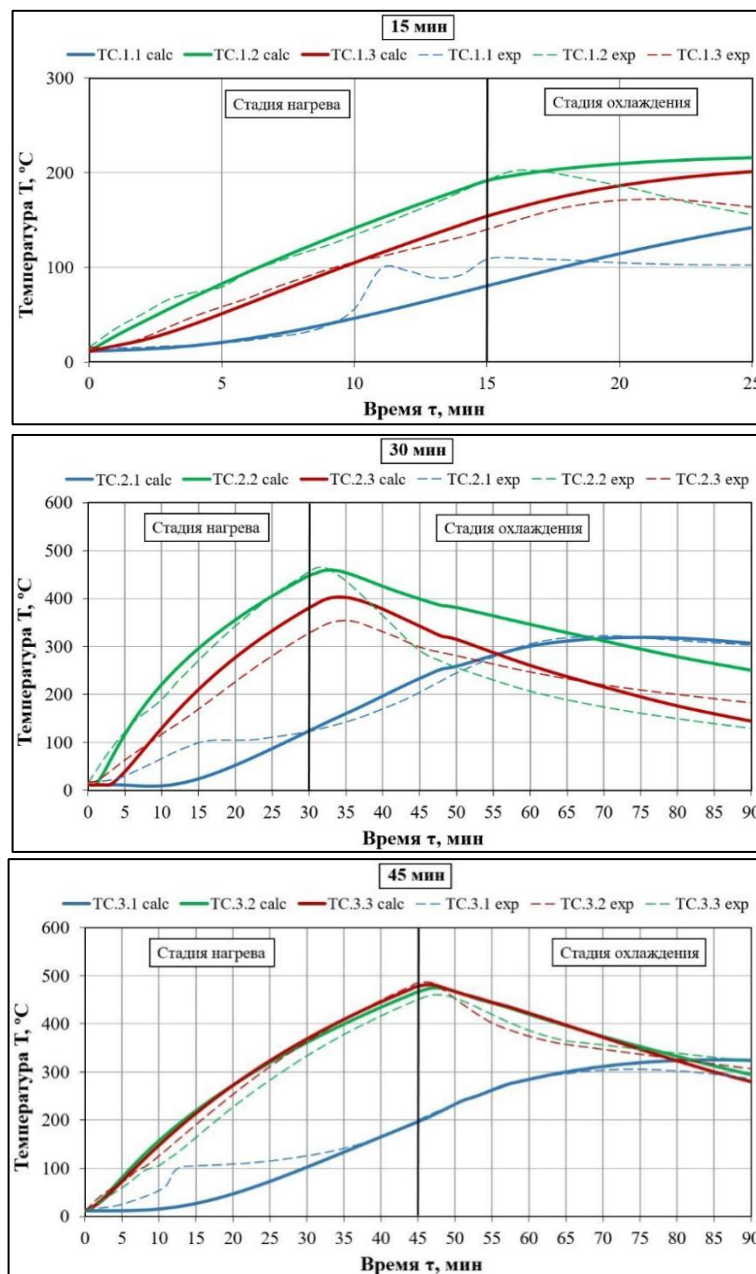
Температура в крайних и угловых термопарах (термопары ТС.1.2, ТС.1.3, ТС.2.2, ТС.2.3, ТС.3.2 и ТС.3.3) возрастает практически линейно в течение всей стадии нагрева. В крайних термопарах наблюдаются большие значения температур, чем в угловых. Для термопар ТС.3.2 и ТС.3.3 разность температур оказалась наименьшей в связи с тем, что термопара ТС.3.3 располагается достаточно близко к грани колонны.

Центральные термопары ТС.1.1, ТС.2.1 и ТС.3.1 зарегистрировали меньшие значения температур, при этом температурный график имеет сложную форму. В начальной стадии нагрева (10-15 мин) наблюдается почти экспоненциальный рост температур до значения 100°C . После этого рост температуры временно прекращается, на графике возникает почти горизонтальное «плато». По прошествии 20 мин стандартного пожара рост температур возобновляется по экспоненциальному закону, однако, с меньшей скоростью, чем на начальном этапе.

Анализируя температурные графики, построенные по данным термопар, можно сделать вывод, что в процессе нагрева образцов реализуется достаточно сложный механизм тепло- и массопереноса. На начальном этапе наблюдается почти линейное возрастание температуры в центре.



а)



б)

Рисунок 4 – Результаты стандартных огневых испытаний и численного моделирования: а) показания в термопарах в конце стадии нагрева, б) температурные кривые для трех серий образцов по результатам численного моделирования (индекс «calc») и эксперимента (индекс «exp»)

Свободная вода при этом равномерно распределена по всему сечению. Далее, в результате неравномерного нагрева сечения колонны, происходит высыхание наружных слоев бетона и испарение свободной влаги. Удаление влаги из наружных областей приводит к увеличению их теплопроводности, в результате этого происходит более интенсивный прогрев центра сечения и резкий рост температуры до 100 °С. В тоже время свободная вода из центра сечения устремляется к наружным высохшим областям. Это способствует набуханию геля и переходу свободной воды в периферийных областях в связную. Влажность по сечению колонны выравнивается. Дальнейший рост температуры на некоторое время почти полностью

останавливается. Стадия стагнации продолжается до полного испарения свободной влаги из центра сечения, после чего рост температуры возобновляется.

По прошествии установленной продолжительности стандартного пожара для всех образцов рост температур, зарегистрированных термопарами, продолжается, что объясняется теплопереносом от более нагретых периферийных областей сечения к менее нагретым внутренним. В крайних и угловых термопарах максимальные температуры достигаются достаточно быстро после начала остывания. Увеличение температур по сравнению с достигнутыми в конце стадии нагрева составляет: для термопар ТС.1.2, ТС.2.2 и ТС.3.2 соответственно 5,5%, 2,1% и 0,9%; для термопар ТС.1.3, ТС.2.3 и ТС.3.3 соответственно 22,7%, 7,9% и 2,2%. Для центральных термопар ТС.2.1 и ТС.3.1 наблюдается значительный рост температур в стадии охлаждения. Увеличение температур по сравнению с достигнутыми в конце стадии нагрева составляет 199,4% и 221,8% соответственно. Рост температуры для термопары ТС.1.1 незначителен – около 1,3% и максимальная температура достигается уже через 1 мин после начала охлаждения.

По результатам численного моделирования получены графики зависимости температур в местах установки термопар от времени (см. рис. 4.б). Численная модель калибровалась для каждого образца методом последовательных приближений до приемлемой корреляции с результатами эксперимента в конце стадии нагрева. Определены следующие теплотехнические свойства материалов:

- образец CF.1.1(2): $\lambda=2,166-0,001045 \cdot t$ и $C=0,568-0,000664 \cdot t$;
- образец CF.2.1(2): $\lambda=0,1596-0,000077 \cdot t$ и $C=0,1065-0,000125 \cdot t$;
- образец CF.3.1(2): $\lambda=0,2622-0,000127 \cdot t$ и $C=0,2059-0,000241 \cdot t$.

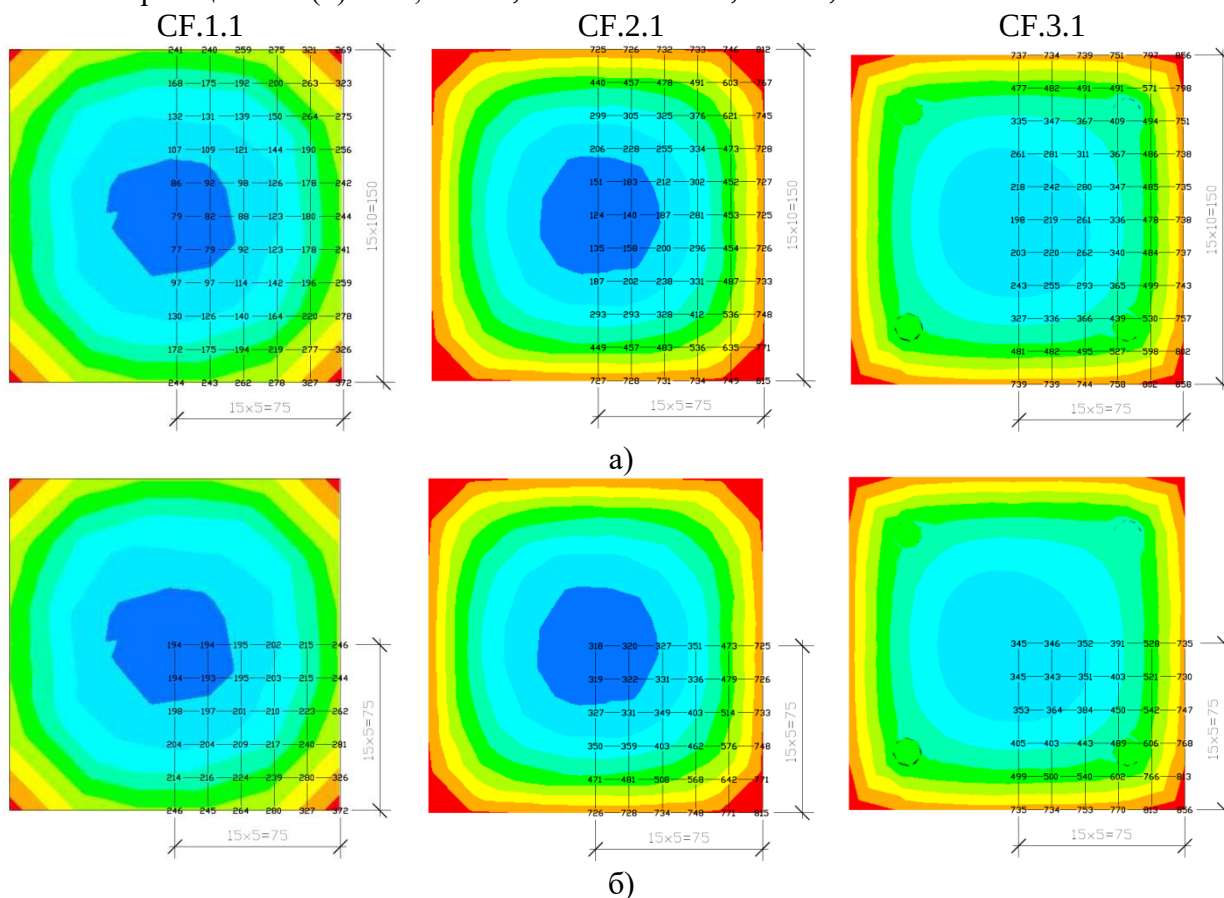


Рисунок 5 – Температурные поля по сечениям образцов: а) в конце стадии нагрева, б) огибающие температурные поля (максимальные температуры)

По сравнению с нормативными значениями величины λ и C снижаются соответственно: для образца CF.3.1 в 4,35 и 3,45 раза; для образца CF.2.1 в 7,14 и 6,67 раза. В то время как, для

образца CF.1.1 удельная теплоемкость C уменьшилась всего в 1,25 раза, а коэффициент теплопроводности λ увеличился в 1,9 раза.

Распределение температурных полей внутри образцов в конце стадии нагрева дано на рис. 5.а. Расхождение между экспериментом и численным расчетом в конце стадии нагрева не превышают: для образца CF.1.1 26%, для образцов CF.2.1 и CF.3.1 не более 2%. Для образцов CF.2.1 и CF.3.1 численные модели достаточно точно описывают перераспределение температур при охлаждении. Для колонны CF.1.1 максимальные температуры оказались несколько завышены. В термопарах ТС.1.2 и ТС.1.3 отклонение от эксперимента составило 8 и 22% соответственно. В центральной термопаре ТС.1.1 расхождение составило 75%, поскольку при проведении испытаний температура в середине сечения не возростала вовсе, в отличие от расчета.

На рис. 5.б приведены огибающие температурных полей, которые учитывают максимальные температуры, достигнутые в каждой рассматриваемой точке сечения. Возрастание температур в стадии охлаждения для крайних и угловых областей сечения является незначительным по отношению к центральным областям. Превышение над температурами, достигнутыми в конце стадии нагрева, для крайних и угловых зон не более, чем в 1,4 раза. В то время, как для центральных областей рост составил до 3,3 раза. При рассмотрении огибающей максимальных температур видно, что разность между нагревом середины и по краям сечения не столь высока, как при учете только стадии нагрева.

Выводы

1. Выполнены испытания железобетонных колонн на стандартное огневое воздействие. Получено распределение температурных полей в сечениях элементов. Для центральных областей сечения наибольшие температуры получены уже после нагрева – в стадии охлаждения печи. В стадии охлаждения для отдельных областей сечения температура может возрастать до 222%. В связи с этим, при расчете огнестойкости колонн необходимо использовать огибающие температурных полей с максимальными температурами прогрева в каждой точке.

2. Выполнена численная оценка распределения температурных полей по сечению элемента на моделях, верифицированных по результатам стандартных огневых испытаний железобетонных образцов в печи. Корреляции с экспериментальными данными удастся достигнуть при использовании уточненных значений λ и C , которые для образца CF.2.1 больше в 7,14 и 6,67 раза; для CF.3.1 в 4,35 и 3,45 раза. Для CF.1.1 C меньше в 1,25 раза, λ больше в 1,9 раза.

3. Основной причиной расхождения результатов эксперимента и численного моделирования, особенно по центральным термопарам, является протекание сложного механизма тепло- и массопереноса, который одновременно связан как с процессом перехода свободной воды в связную, так и увеличением теплопроводности высохших областей сечения. Однако расхождение с экспериментом существенно только на начальных этапах нагрева и, впоследствии, реальные и расчетные температуры в центре сечения выравниваются. Таким образом, при проведении инженерных расчетов при достаточной продолжительности огневого воздействия явлением влагонепереноса можно пренебречь и использовать интегральные характеристики λ и C .

Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта «Разработка методики расчета и проектирования сейсмостойких железобетонных рамных каркасов с учетом возможных повреждений в результате пожара» (номер проекта 15), поддержанного по результатам конкурса 2023 на поддержку проведения исследований аспирантов НИУ МГСУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tamrazyan A. Reduce the impact of dynamic strength of concrete under fire conditions on bearing capacity of reinforced concrete columns // *Applied Mechanics and Materials*. 2014. No. 475-476. Pp. 1563-1566. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.475-476.1563.
2. Тамразян А.Г., Алексейцев А.В. Оптимальное проектирование несущих конструкций зданий с учетом относительного риска аварий // *Вестник МГСУ*. 2019. Т. 14. № 7. С. 819-830. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.7.819-830.
3. 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. DOI 10.33622/0869-7019.2019.02.19-26.
4. Тамразян А. Г., Черник В. И. Жесткость поврежденной пожаром железобетонной колонны при разгрузке после высокоинтенсивного горизонтального воздействия // *Вестник МГСУ*. 2023. №18(9). С. 1369-1382. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2023.9.1369-1382>.
5. Алмазов В. О., Плотников А. И., Расторгуев Б. С. Проблемы сопротивления зданий прогрессирующему разрушению // *Вестник МГСУ*. 2011, №2-1, С. 16-20.
6. Гончаренко В. С. и др. Пожары и пожарная безопасность в 2021 году: статист. сб. Балашиха: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2022. 114 с.
7. Жарницкий В.И., Голда Ю.Л., Курнавина С.О. Развитие повреждений в железобетонной раме при сейсмических воздействиях // *Бетон и железобетон - взгляд в будущее*. 2014, С.57-67.
8. Ilki A., Demir U. Factors affecting the seismic behavior of reinforced concrete structures after fire exposure // *NED University Journal of Research*. 2019. No.1 (special). pp. 31-42. DOI: 10.35453/NEDJR-STMECH-2019-0003.
9. Korsun V., Baranov A. Mechanical properties of high-strength concrete after heating at temperatures up to 400 °C // *Proceedings of ECE 2020*. 2021, Pp. 454-463 DOI: 10.1007/978-3-030-72404-7_44.
10. Милованов А.Ф. Стойкость железобетонных конструкций при пожаре. – М.: Стройиздат, 1998. – 304 с.: ил. – ISBN 5-274-01695-2.
11. Федоров В. С., Левитский В. Е., Матвиенко В. Е. Методика построения температурных профилей для расчёта огнестойкости железобетонных конструкций методом нормализованной кривой // *Инженерно-строительный вестник Прикаспия*. 2021, №1(35), с. 5-8.
12. Franssen, J. M., and T. Gernay. Modeling Structures in Fire with SAFIR: Theoretical Background and Capabilities // *Journal of Structural Fire Engineering*. 2017. No. 8 (3). Pp. 300–323. <https://doi.org/10.1108/JSFE-07-2016-0010>.
13. Bisby L, Gales J, Maluk C. A contemporary review of large-scale non-standard structural fire testing // *Fire Science Reviews*. 2013. No. 2(1). Pp.1-27. <https://doi.org/10.1186/2193-0414-2-1>
14. Melo J. et al. Cyclic behaviour of as-built and strengthened existing reinforced concrete columns previously damaged by fire // *Engineering Structures*. 2022, No. 266, 114584, DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.114584.
15. Tamrazyan A. G., Avetisyan L. A. Experimental and theoretical study of reinforced concrete elements under different characteristics of loading at high temperatures // *Procedia Engineering*. – 2016. No. 153. pp. 721-725. DOI:10.1016/j.proeng.2016.08.232.
16. Корсун В.И., Баранов А.О. Расчёт температурно-усадочных деформаций высокопрочных бетонов применительно к условиям воздействия повышенных температур // *Сборник научных трудов РААСН. Том 2. Российская академия архитектуры и строительных наук*. 2020, с. 314-321.
17. Demir U. et al. Post fire seismic performance of reinforced precast concrete columns // *PCI Journal*. – 2020. No.65(6). Pp. 62-80. DOI: 10.15554/pci.65.6-01.
18. Xu Y. et al. Post-fire seismic behaviors of concrete stub columns in different fire exposure cases // *Zhendong yu Chongji/Journal of Vibration and Shock*. 2020. No. 39(18). Pp. 11-19.

REFERENCES

1. Tamrazyan A. Reduce the impact of dynamic strength of concrete under fire conditions on bearing capacity of reinforced concrete columns. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. No. 475-476. Pp. 1563-1566. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.475-476.1563.
2. Tamrazyan A.G., Alekseyev A.V. Optimal structures design: accounting of costs and relative accidents risk. *Vestnik MGSU*. 2019. Vol. 14. No. 7. Pp. 819-830. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.7.819-830. (rus).
3. Tamrazyan A. G., Popov D. S. Stress-strain State of Corrosion-Damaged Reinforced Concrete Elements under Dynamic Loading. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and Civil Engineering]*, 2019, No. 2, Pp. 19–26. DOI:10.33622/0869-7019.2019.02.19-26. (rus).
4. Tamrazyan A.G., Chernik V.I. Stiffness of a fire-damaged reinforced concrete column during unloading after high-intensity horizontal impact. *Vestnik MGSU*. 2023. No.18(9). Pp. 1369-1382. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2023.9.1369-1382> (rus).

5. Almazov V.O., Plotnikov A.I., Rastorguev B.S. Problems of building's strength to progressive collapse. *Vestnik MGSU*. 2011. No. 2-1. Pp. 16-20. (rus)
6. Goncharenko V. S. et al. Pozhary i pozharnaya bezopasnost' v 2021 godu: statist. sb. Balashixa [Fires and fire safety in 2021: stat. coll. Balashikha]: FGBU VNIPO MChS Rossii, 2022. 114 p. (rus)
7. Zharniczkiy V.I., Golda Yu.L., Kurnavina S.O. Razvitie povrezhdenij v zhelezobetonnoj rame pri sejsmicheskix vozdeystviyax [Damage development in reinforced concrete frame under seismic impacts]. *Beton i zhelezobeton - vzglyad v budushhee*. 2014, Pp.57-67. (rus)
8. Ilki A., Demir U. Factors affecting the seismic behavior of reinforced concrete structures after fire exposure. *NED University Journal of Research*. 2019. No.1 (special). Pp. 31-42. DOI: 10.35453/NEDJR-STMECH-2019-0003.
9. Korsun V., Baranov A. Mechanical properties of high-strength concrete after heating at temperatures up to 400 °C. *Proceedings of ECE 2020*. 2021, Pp. 454-463 DOI: 10.1007/978-3-030-72404-7_44
10. Milovanov A.F. Stojkost' zhelezobetonny'x konstrukcij pri pozhare [Resistance of Reinforced Concrete Structures at Fire]. Moscow: Stroyizdat, 1998. 304 p. ISBN 5-274-01695-2. (rus)
11. Fedorov V. S., Levitskiy V. E., Matvienko V. E. Technique for constructing temperature profiles for calculation of fire resistance of reinforced concrete structures by the normalized curve method. *Inzhenerno-stroitel'ny' vestnik Prikaspiya*. 2021, No. 1(35), Pp. 5-8. (rus)
12. Franssen, J. M., and T. Gernay. Modeling Structures in Fire with SAFIR: Theoretical Background and Capabilities. *Journal of Structural Fire Engineering*. 2017. No. 8 (3). Pp. 300–323. <https://doi.org/10.1108/JSFE-07-2016-0010>
13. Bisby L, Gales J, Maluk C. A contemporary review of large-scale non-standard structural fire testing. *Fire Science Reviews*. 2013. No. 2(1). Pp.1-27. <https://doi.org/10.1186/2193-0414-2-1>
14. Melo J. et al. Cyclic behaviour of as-built and strengthened existing reinforced concrete columns previously damaged by fire. *Engineering Structures*. 2022, No. 266, 114584, DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.114584
15. Tamrazyan A. G., Avetisyan L. A. Experimental and theoretical study of reinforced concrete elements under different characteristics of loading at high temperatures. *Procedia Engineering*. 2016. No. 153. Pp. 721-725. DOI:10.1016/j.proeng.2016.08.232
16. Korsun V.I., Baranov A.O. Calculation of Temperature and Shrinkage Deformations of High-Strength Concrete under Conditions of Elevated Temperatures. *Sbornik nauchny'x trudov RAASN. Tom 2. Rossijskaya akademiya arxitektury i stroitel'ny'x nauk*. 2020. Pp. 314-321. (rus)
17. Demir U. et al. Post fire seismic performance of reinforced precast concrete columns. *PCI Journal*. 2020. No. 65(6). Pp. 62-80. DOI: 10.15554/pci65.6-01
18. Xu Y. et al. Post-fire seismic behaviors of concrete stub columns in different fire exposure cases. *Zhendong yu Chongji/Journal of Vibration and Shock*. 2020. No. 39(18). Pp. 11-19

Информация об авторах

Ашот Георгиевич Тамразян

Московский государственный строительный университет (ФГБОУ ВПО «МГСУ»), г. Москва, Россия,
д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой железобетонных и каменных конструкций,
E-mail: tamrazian@mail.ru

Владимир Игоревич Черник

Московский государственный строительный университет (ФГБОУ ВПО «МГСУ»), г. Москва, Россия,
преподаватель кафедры железобетонных и каменных конструкций, аспирант,
E-mail: chernik_vi@mail.ru

Information about authors

Tamrazyan Ashot G.

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
doctor in tech. sc., prof., head of the department of reinforced concrete and masonry structures,
E-mail: tamrazian@mail.ru

Chernik Vladimir I.

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
lecturer of the department of reinforced concrete and stone structures, postgraduate student,
E-mail: chernik_vi@mail.ru

О.В. ВОЛИЧЕНКО^{1,2}, Т.О. ЦУРИК³¹ Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы, г. Москва, Россия² ФГБОУ ВО «НИУ Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия³ Юго-западный государственный университет, г. Курск, Россия

РЕНОВАЦИЯ ОБЪЕКТОВ ПРОМЫШЛЕННОЙ АРХИТЕКТУРЫ НА ОСНОВЕ ИММЕРСИВНОГО ПОДХОДА

Аннотация. Актуальность исследования определяется наличием комплекса социально-экономических, экологических и культурно-исторических проблем в градостроительстве, связанных с эффективным использованием бывших промышленных территорий и созданием общественных пространств с сохранением памятников архитектуры. В статье рассмотрены проблемы реновации исторических зданий, объектов промышленной архитектуры в крупных городах. Предметом исследования является реновация объекта культурного наследия регионального значения (ансамбля) «Ликеро-водочный завод» в г. Курске. Изучение проблемы использования промышленных объектов, имеющих культурную и историческую ценность, носит междисциплинарный характер и позволяет раскрыть градостроительный потенциал зданий промышленной архитектуры. Недостаточно изученными остаются принципы выбора направлений и оценки результатов реновации в зависимости от величины объекта и его места в структуре города. В качестве наиболее перспективного направления реновации авторы предлагают применение иммерсивных практик. Возвращение заброшенных и проблемных городских территорий для нового целевого использования может осуществляться различными способами. Принцип формирования иммерсивного пространства основывается на глубоком понимании историко-культурной и средовой значимости объекта, сохранении баланса между первоначальным обликом и градостроительным окружением. Иммерсивные технологии успешно реализованы в городской среде европейских и российских городов. Авторы раскрывают характеристики иммерсивного пространства и предлагают вариант использования территории ликеро-водочного завода на основе сюжетного погружения в культурную матрицу объекта с привлечением технологий виртуальной реальности. Реалистичность и динамичность пространства наряду с максимальным сохранением облика объекта культурного наследия позволяет по-новому переосмыслить трансформацию промышленных территорий и их значение в современной городской среде.

Ключевые слова: реновация, промышленная архитектура, иммерсивное пространство, городская среда, принципы формирования.

O.V. VOLICHENKO^{1,2}, T.O. TSURIK³¹ RUDN University, Moscow, Russia² National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia³ Southwest State University, Kursk, Russia

RENOVATION OF INDUSTRIAL ARCHITECTURAL OBJECTS BASED ON AN IMMERSIVE APPROACH

Annotation. The relevance of the study is determined by the presence of a complex of socio-economic, environmental, cultural and historical problems in urban planning related to the effective use of former industrial areas and the creation of public spaces with the preservation of architectural monuments. The article examines the problems of renovation of historical buildings and industrial architecture in large cities. The subject of the study is the renovation of a cultural heritage site of regional significance (ensemble) "Distillery" in Kursk.

© Воличенко О.В., Цурик Т.О., 2024

The study of the problem of using industrial facilities that have cultural and historical value is interdisciplinary in nature and makes it possible to reveal the urban planning potential of industrial architecture buildings. The principles of choosing directions and assessing the results of renovation depending on the size of the object and its place in the structure of the city remain insufficiently studied. The authors propose the use of immersive practices as the most promising direction for renovation. The return of abandoned and problematic urban areas for new intended uses can be carried out in various ways. The principle of creating an immersive space is based on a deep understanding of the historical, cultural and environmental significance of the object, maintaining a balance between the original appearance and the urban surroundings. Immersive technologies have been successfully implemented in the urban environment of European and Russian cities. The authors reveal the characteristics of the immersive space and propose an option for using the territory of the distillery based on a plot immersion in the cultural matrix of the object using virtual reality technologies. The realism and dynamism of the space, along with maximum preservation of the appearance of the cultural heritage site, allows us to rethink the transformation of industrial areas and their significance in the modern urban environment in a new way.

Keywords: renovation, industrial architecture, immersive space, urban environment, principles of formation.

Введение

Современная городская среда представляет собой неоднородную структуру, в которой локализованы центры притяжения горожан, объекты исторического значения, места рекреаций, озеленённые пространства и другие объекты, важные для повседневной жизни города. Его функциональные зоны, формируясь постепенно, по мере роста и развития города, занимают неравноценное положение в общей планировочной структуре, отличаясь уровнем и качеством архитектуры, благоустройством, назначением и т.п. Проблемными пятнами на городской ткани выделяются бывшие промышленные территории, которые, при всем их многообразии, объединяют общие черты – утрата первоначального значения, заброшенность и отсутствие связей с окружением и архитектурно-градостроительным контекстом. Указанные территории «выпадают» из городского обихода, нарушая процессуально-коммуникационные потоки и значительно снижая качество восприятия окружающего ландшафта, особенно если они располагаются в центральной части города.

В зависимости от размещения промышленных предприятий и предъявляемых к ним санитарно-защитных требований, различают следующие категории [1]:

- промышленные предприятия, не выделяющие вредных веществ и расположенные в пределах общественной и жилой застройки;
- территории заводов и фабрик, расположенные около границ селитебной территории;
- промышленные зоны, удаленные от селитебной территории.

Размещение объектов промышленной архитектуры вблизи жилой застройки имеет свои преимущества и недостатки. К несомненным достоинствам можно отнести разнообразие архитектурной среды, а также обогащение визуальной стороны городского ландшафта. Вместе с тем, даже некрупные промышленные объекты занимают достаточно большую территорию, образуя, в случае прекращения их использования, пространственные разрывы городской ткани, нарушающие целостность восприятия городской среды. Разница в качественных и образных характеристиках городской среды, отсутствие переходов и взаимосвязей между объектами промышленной, жилой и общественной архитектуры приводит к деградации окружающей среды. С другой стороны, снос зданий промышленного назначения уничтожает следы уникальности российских городов. Многие из них уже утратили исторические доминанты индустриального наследия, а фрагменты исторической застройки находятся в аварийном состоянии на фоне зданий с низким уровнем архитектурно-художественных качеств [2]. Таким образом, промышленные объекты, значительно выделяясь

из городского окружения, привлекают внимание, однако, вследствие чужеродности, образуют своего рода области отчуждения (рис.1).



Рисунок 1 – Курск. Водонапорные башни: а) водонапорная башня, 1931; б) водонапорная башня, 1874

В последнее десятилетие архитекторы и градостроители проводили углубленное изучение перспектив и возможностей использования объектов индустриальной культуры. Среди множества исследований, обращающихся к решению проблем реновации и адаптации недействующих промышленных предприятий, можно выделить несколько основных направлений. По-прежнему актуальными остаются вопросы реконструкции промышленных зданий (в том числе исторических) с учетом экологических требований, однако акценты в них смещаются в сторону ликвидации негативного воздействия на окружающую среду и снижение энергопотребления [3,4]. Продолжаются исследования редевелопмента хозяйственно-промышленных территорий [5, 6] с приоритетным созданием рекреационных пространств, жилья, выявлением коммерческого потенциала земельных участков для инвестора. Изучены проблемы поэтапной реабилитации городских территорий [7-9]. В теоретическом и практическом плане активно разрабатывается проблема сохранения и реставрации промышленных объектов, имеющих культурную и историческую ценность для российских городов [10-11]. Проблемы реновации промышленных территорий в городской структуре рассматривали отечественные и зарубежные теоретики и практики архитектуры и градостроительства [12-15]. Таким образом, сложившиеся в настоящее время научные направления – промышленное и городское строительство, инженерная экология, урбоэкология и др. внесли свой вклад в решение проблемы использования промышленных зон в городской среде. Вместе с тем, реновация промышленной территории предполагает осуществление комплексного междисциплинарного исследования, включающего исторический, градостроительный, социально-экономический анализ параметров как самой изменяемой территории, так и окружающего «пояса». Архитектурно-планировочные показатели рассматриваются не обособлено, но во взаимодействии с городской средой.

Необходимо отметить, что исследования принципов, определяющих эффективность реновации промышленных территорий и результатов, с учетом особенностей конкретного города, крайне малочисленны. Ситуацию усугубляет отсутствие механизма адекватного выбора функций и показателей, которые позволят считать промышленную территорию

вошедшей в структуру и ритм жизни города в целом. Важным аспектом, который часто отсутствует в проектах, направленных на оживление этих пространств, является учет специфики индустриального наследия в истории города, как части коллективной памяти. Действительно, индустриальное наследие – это больше, чем совокупность исторических архитектурных объектов и комплексов, это – архив под открытым небом, живое поле для исследования объектов промышленного производства, мест, в которых сохранено техническое и технологическое знание. По нашему мнению, одним из наиболее перспективных направлений в развитии бывших промышленных территорий становится реновация на основе иммерсивных практик.

Модели и методы

Под реновацией в архитектуре понимается адаптационный процесс, который сопровождается изменением функционального назначения здания или сооружения, для возможного дальнейшего использования. Реновация – явление не новое и широко распространенное в отношении зданий и комплексов общественного и промышленного назначения, зачастую имеющее межтипологический характер (из гражданского – в промышленное, и наоборот). Перепрофилирование здания может осуществляться без понимания его историко-архитектурной и средовой значимости, что приводит к кардинальному изменению композиционного и планировочного построения.

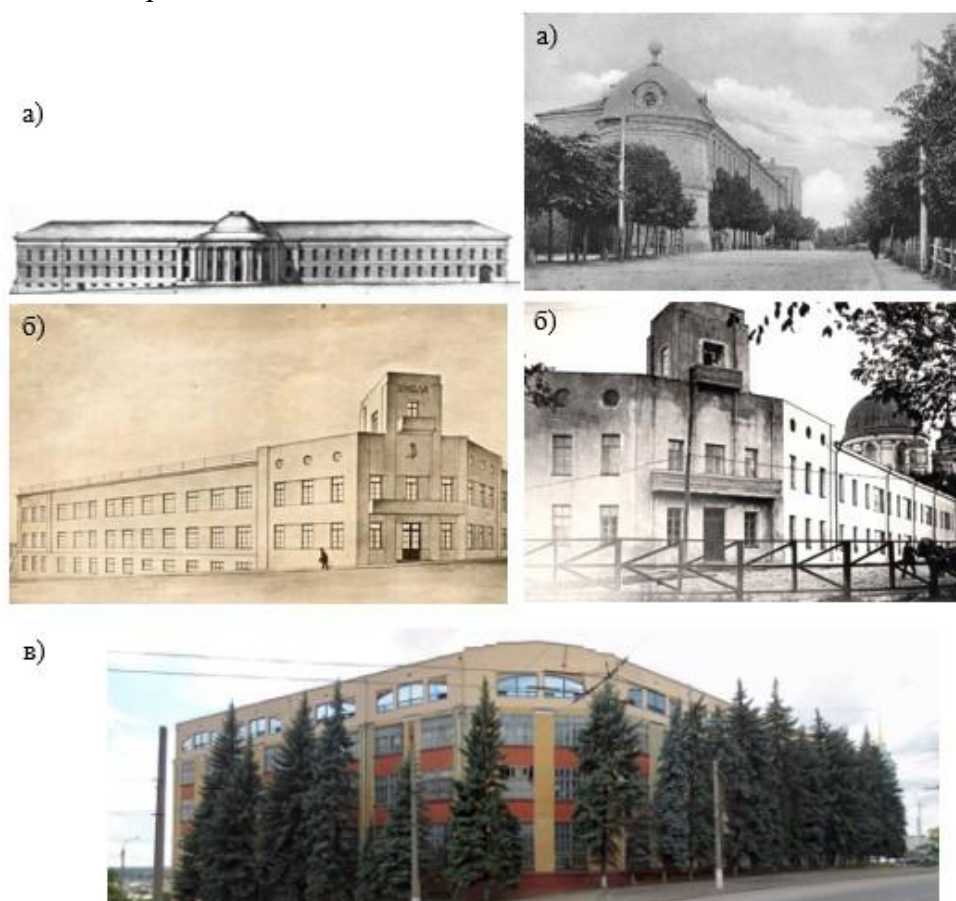


Рисунок 2 – Курск. Этапы реновации здания в центральной части: а) присутственные места (проект 1793 г. и фотография начала 20 в.); б) Высшая сельскохозяйственная школа (проект 1920-х и фотография); в) Курский электроаппаратный завод фотография (2000-х г.)

К примеру, находящееся в центре г. Курска здание присутственных мест, построенное на рубеже XVIII - XIX вв. (1793 г.), было одной из архитектурных доминант ансамбля Красной площади, но уже в XIX веке в результате реновации исчезла ротонда с главного фасада и была изменена планировка. В 20-х гг. XX в. здание было приспособлено под Высшую сельскохозяйственную школу, затем, в 1945 г., значительно разрушенный комплекс зданий в историческом центре города был передан под размещение цехов Курского электроаппаратного завода. Был надстроен дополнительный этаж, заменено остекление, что полностью исказило облик исторического памятника (рис. 2).



Рисунок 3 - Способы реновации промышленных территорий по функциональному содержанию [14, с. 69]

В 2021 г. было принято решение о реконструкции здания КЭАЗ и его передаче Курскому областному краеведческому музею. Таким образом, активизация процессов реновации требует продуманных решений и сохранения исторической идентичности города. В своде правил по градостроительству в настоящее время специально уточняется, что «при реконструкции объектов сложившейся производственной застройки, являющихся

памятниками истории и культуры, необходимо предусматривать меры по сохранению их исторического облика» [1].

В отношении реновации территорий различного назначения накоплен значительный мировой и отечественный опыт. В 90-е гг. XX в. множество городов столкнулось с проблемой преобразования депрессивных территорий в жилые и общественные районы. Крупные города с развитой промышленной инфраструктурой первыми приняли вызовы обновления промышленных зон. Многие обособленные промышленные районы, отделенные от жилой застройки, реализовали программу масштабных градостроительных преобразований с местами для рекреации населения. Процессы модернизации сопровождались наполнением бывших заводов и фабрик новыми функциями, обновлением транспортной инфраструктуры, в итоге качественно изменившими городскую среду (рис. 3).

Реновация осуществлялась в основном по двум направлениям. В проектах первого типа максимально используется художественно-средовой потенциал исторической архитектуры. Главными в таких предложениях является сохранение первоначального облика не только исторических зданий, но и планировочной структуры территории, а также оборудования. Такие промышленные объекты и комплексы становятся музеями, повествующими об истории развития предприятий, научно-технического прогресса и др. Второй тип проектов направлен на предельное расширение и изменение первоначальных функций объектов промышленной архитектуры за счет размещения в них офисов, жилья, выставочных залов, предприятий общественного питания и т.д. В результате реновации сохраняется индустриальный вид зданий, фрагменты конструкций и промышленных механизмов (стальные балки, воздуховоды, кирпичные стены), но в целом использование современных дизайнерских приемов, новых материалов, цветовой гаммы меняют масштаб архитектурного объекта, приводят к потере архитектурной целостности здания.

Однако для многих крупных и малых российских городов характерно рассредоточенное размещение промышленных объектов, придающих исторический колорит и своеобразие городской среде. Небольшие размеры территорий производственной застройки историко-архитектурных памятников (включающие корпуса цехов и мастерских, административного управления, складские сооружения, водонапорные башни и др.) и отсутствие необходимых инвестиций делали неактуальным применение вышеуказанных подходов. При точечном размещении промышленных объектов и необходимости обеспечения сохранности уцелевших фрагментов исторической среды, приоритетное значение приобретала задача включения производственных зон в градостроительный ландшафт с сохранением художественного облика и рефункционализации пространства исходя из условий конкретной социально-культурной востребованности. Как отмечают некоторые исследователи, здесь целесообразнее опираться на методы преемственного развития с использованием современных архитектурных решений [14-16]. Другими словами, речь идет о нахождении баланса между сохранением индустриального характера здания и приспособления его под нужды города.

В качестве основного принципа реновации промышленных объектов предполагается использовать принцип иммерсивности [17-19], который способствует достижению поставленной цели – созданию единой гармоничной городской среды. Под иммерсивностью в архитектуре мы понимаем способ символического взаимодействия между индивидом и пространством, в результате которого возникает эффект погружения в средовое окружение и формируется положительный эмоциональный отклик.

Следует отметить, что создание иммерсивных пространств не предполагает консервацию промышленных объектов и может осуществляться различными способами – от музеефикации до создания инновационных структур с использованием объектов

промышленной архитектуры в качестве арт-объектов. Особенность формирования иммерсивных пространств опирается на следующие характеристики:

- материальное и символическое отделение территории от городской среды;
- сюжетное развертывание и прочтение истории как формы общения и познания мира (тематизация пространства);
- задействование мест и персонажей, встроенных в культурную матрицу и поэтому близких для большинства посетителей;
- использование различных каналов взаимодействия для полного физического присутствия в пространстве;
- реалистичность и аутентичность деталей создаваемой среды для расширения иммерсивного воздействия; использование интерактивных технологий для организации игр, экскурсий (в том числе с использованием цифровых приложений).

Иммерсивность как художественная практика берет начало с 1990-х годов, то есть совпадает по времени с началом практики реновации промышленных зон. Очевидно, что архитектура, как вид пространственного искусства, использующего приемы воздействия на зрителя, способствующие погружению в определенное состояние в зависимости от базовых паттернов культуры, оказалась наиболее отзывчива к применению практик погружения в искусственную среду.



Рисунок 4 – Дуйсбург (Германия). Индустриальный парк Эмшер

Примеры трансформации крупных промышленных зон многочисленны и известны: индустриальный парк Эмшер в Германии, стокгольмский жилой район Хаммарбю Шёстад, застройка «Стрелки» в Нижнем Новгороде и др. Однако не менее важной задачей, стоящей перед архитекторами, становится включение в городскую среду не крупных, точечных объектов промышленной архитектуры. По нашему мнению, освоение таких объектов, ограниченных в привлечении внешних ресурсов в крупных российских городах, имеют немного вариантов для трансформации. Один из наиболее перспективных выходов – развитие тех функций, которые используют имеющийся историко-культурный потенциал. Отнесение их к объектам культурного наследия ставит перед архитекторами непростую задачу нахождения нового применения для индустриальных объектов с сохранением первоначального облика. Ключевым инструментом для реализации этого замысла стала

реконструкция территории, направленная на перепрограммирование и наделение новыми смыслами бывшей промышленной зоны (рис. 4).

Одним из впечатляющих примеров трансформации промышленной территории стала масштабная реконструкция порта в г. Марселе (Франция), где огромное внимание уделялось организации и благоустройству общественных пространств. В результате появились новые жилые комплексы и общественные центры; причалы превратились в пешеходные зоны. Главной достопримечательностью проекта стала площадь с гигантским павильоном в виде зеркальной плоскости (46x22 м) из нержавеющей стали на металлических опорах. Павильон выполняет не только функцию навеса, но является одновременно гигантским аттракционом, в котором отражаются людские потоки, здания, памятники архитектуры и водная гладь. В своеобразной архитектурной инсталляции, метафорически обыгрывается концепция быстротечности жизни. Архитекторы предлагают очень тактичное решение, при котором павильон не вторгается в историческую среду и не искажает сложившуюся панораму гавани, наоборот отражает и удваивает существующее пространство в экспрессивной динамике движения. Взаимосвязь материальных и средовых аспектов создает пространство, которое объединяет созданные объекты с существующими, меняет восприятие пространства и создаёт эффект иммерсивности (рис. 5).



Рисунок 5 – Павильон Старого порта в Марселе, Франция, 2013. Nigel Young / Foster + Partner

Результаты исследования и их анализ

В Курске памятники промышленной архитектуры, выведенные из эксплуатации, рассредоточены в центральной части города и представлены различными по назначению объектами промышленной кирпичной архитектуры второй половины XIX - начала XX вв. (рис. 6).

Объект культурного наследия регионального значения «Ликеро-водочный завод», 1900-1903 гг., в г. Курске занимает два квартала в центральной части города [20]. В первую очередь было построено здание казенного винного склада, дом управляющего и дом для служащих. Основное здание винного склада включало следующий перечень производственных и вспомогательных помещений: приемочный, мочный и разливающий

цеха; помещение цистерн, фильтрационную, сортировочный и укупорочный цеха, отпускное отделение, переднюю для рабочих, магазин и контору. К территории винного склада примыкали участки домов для администрации – управляющего и служащих завода. В 1904 году к комплексу добавилось здание ректификационного завода (спиртзавод Сперанского), построенное архитектором М. М. Чижовым (рис. 7).

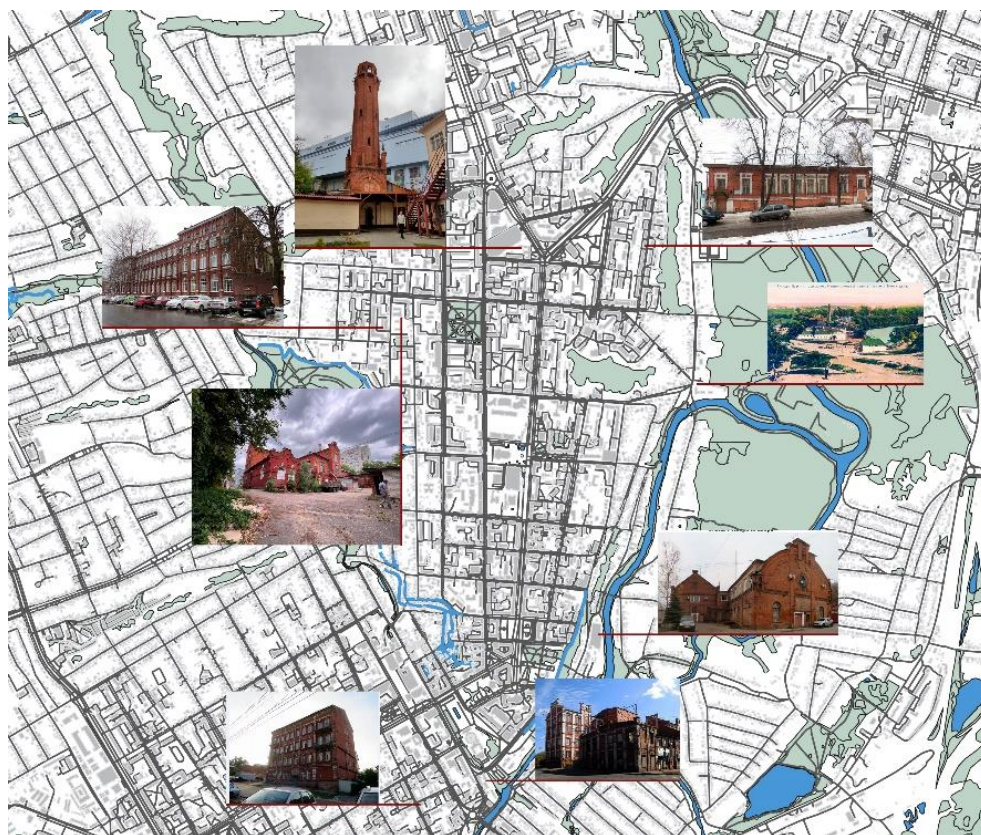


Рисунок 6 – Курск. Промышленные объекты, расположенные на территории центральной части города

История создания ликеро-водочного производства в Курске связана с объявленной в конце XIX века в Российской империи государственной монополией на производство крепких спиртных напитков. Всего по всей стране планировалось открыть 350 винных складов и Курский казенный винный склад, построенный в 1900 г., был одним из них. Здания завода были выполнены из характерного для промышленной архитектуры конца XIX-начала XX вв. красного кирпича. Они были выдержаны в единых художественно-композиционных принципах легко узнаваемого «кирпичного стиля» с типичным декоративным оформлением фасадов.

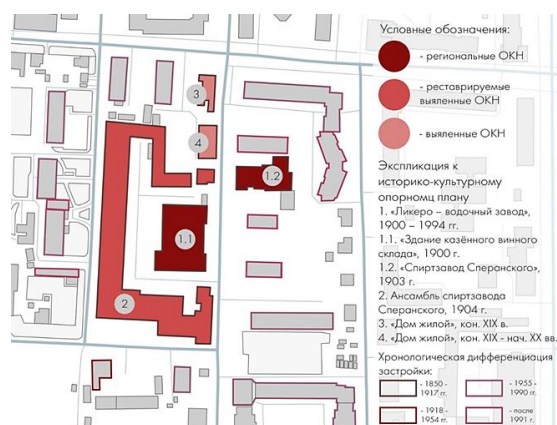


Рисунок 7 – Историко-культурный опорный план

В настоящее время объективные физические характеристики восприятия (природное и «построенное» окружение) искажены [21]. Ансамбль имеет достаточно ограниченный фронт видимости, а восприятие исторического комплекса нарушено кронами крупномерных деревьев и окружающими постройками. Визуальные связи с другими участками города в виду плотной застройки и отсутствия видовых точек не образуются, требуется восстановить средовые факторы, акцентирующие внимание на историко-архитектурном объекте. Комплекс зданий имеет градостроительную, архитектурную и историческую ценность, располагаясь в исторической части города, обладает выразительной композицией, сомасштабной архитектурным элементам центральной части города (рис. 8).



*Рисунок 8 – Казенный винный склад и водочный завод Сперанского:
а) акварель И. И. Ликоренко; б) современный вид на южный фасад, фото А. В. Тарновского*

Объемно-пространственная композиция и планировочная структура ансамбля обладает характерными, но в то же время уникальными особенностями промышленной архитектуры начала XX вв. Основные функции объекта культурного наследия регионального значения (ансамбля) «Ликеро-водочный завод», и выявленного объекта культурного наследия «Ансамбль спиртзавода Сперанского» на протяжении всего времени, за исключением Гражданской и Великой Отечественной войн, не менялись: на заводе производилась и хранилась алкогольная и спиртовая продукция.

На основании анализа состояния, градостроительной значимости и ограничений в отношении объектов культурного наследия, нами предлагается проект реновации ансамбля, включающий комплекс работ по сохранению, озеленению и благоустройству промышленной территории, а также возвращению его традиционного визуального облика для экспонирования и функционирования. Современное использование ансамбля зданий ликеро-водочного завода предполагает частичную рефункционализацию объекта для создания культурно-промышленного исторического центра (КПИЦ). Основная часть КПИЦ будет отведена для постоянной музейной экспозиции «Промышленность Курской области», в здании будут выделены залы для временных экспозиций и конференц-залы (рис. 9).



Рисунок 9 – Главный фасад (проектное предложение)

Используя принципы иммерсивности, предлагается сформировать пространства, балансирующие на грани между реальной и виртуальной средой (шоу, экспозиции, движущие инсталляции и т.п.), в которых посетитель может выступать соучастником и соавтором, разворачивающегося у него на глазах действия. Вовлечение и погружение посетителя в динамичную, изменяющуюся среду, направлено на формирование нового яркого и интересного опыта (рис. 10).



Рисунок 10 – Элементы благоустройства парка (проектное предложение)

Реновация направлена на сохранение архитектурного образа исторической среды ансамбля ликеро-водочного завода. При разработке проекта учитывалось стремление обеспечить не только внешние поверхностные и фасадные характеристики с историческим прототипом, но и использовать внутренние структурные параметры, не контрастирующие со сложившимся окружением. Сохранение промышленной идентичности места проявляется в благоустройстве, которое акцентирует существующие особенности, за счет использования составных элементов заводского производства: цистерны, деревянная и стеклянная тара и др. (рис. 11). В проекте использовалась так называемая «гибкая» модель реновации, при которой

сохраняется и восстанавливается исторический облик, а в архитектурных деталях и малых архитектурных формах могут использоваться как аутентичные, так и прототипные элементы.



Рис. 11. Открытая торговая зона с прототипными элементами (проектное предложение)

В культурно-промышленном центре планируется создать небольшие производственные мастерские, возрождающие определенную номенклатуру продукции, производимой ранее на территории Курской области. На участке бывшего завода выделяются открытые торговые зоны, в которых предусматривается также размещение кафе, ресторанов и лавок с сувенирной продукцией.

Напоминание о первоначальном назначении территории сохраняется в его композиционной структуре, историческом облике, образах, деталях и материале, отправляющих к историческим аналогам промышленных предприятий Российской империи конца XIX – начала XX вв. Бережно сохраняемый дух места обращается к исторической памяти горожан, используя производственный контекст в обновленном пространстве. Консервация наиболее значимых памятников или создание новых объектов, тематически связанных с первоначальной функцией способны сохранить первоначальные смыслы территории и придать ей новый облик.

Выводы

1. Отечественный и зарубежный опыт адаптации промышленных территорий характеризуется разработкой развитого общественного пространства с использованием экологических параметров реновации, направленных на сохранение исторического контекста городской среды.

2. Реновация промышленных территорий предполагает восстановление и возвращение исторического облика зданий, адаптацию внутреннего пространства для выполнения новых функциональных программ, обеспечивая в то же время реабилитацию средового ландшафта, предлагая градостроительные решения по его преобразованию.

3. Иммерсивные принципы при восстановлении промышленных территорий ориентированы на создание необходимых условий повышающих резонанс впечатлений и переживаний в средовом пространстве, сохраняющих историческую атмосферу промышленного предприятия, выстраивающих удобные коммуникативные и визуальные взаимосвязи между городским окружением, предоставляя эстетический, экологический и психологический комфорт и безопасность.

4. Формирование иммерсивного пространства, использующего различные технологии виртуальной, смешанной или дополнительной реальности позволяют посетителям воспринимать физический мир с помощью цифровых методов интегрируя дигитальные образы в контекст реальной предметно-пространственной среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 42.13330.2016. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. Утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 30 декабря 2016 г. N 1034/пр. и введен в действие с 1 июля 2017 г. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456054209> (дата обращения: 24.04.2024).
2. Воличенко О., Цурик Т. Двойственность отношения к исторической городской застройке // Проект Байкал. 2023. Т. 20. № 75. С. 68-73. DOI 10.51461/pb.75.16.
3. Herrera-Avellanosa D., Haas F., Leijonhufvud G., Brostrom T., Buda A., Pracchi V., Webb A. L., Hüttler W., Troi A. Deep renovation of historic buildings: The IEA-SHC Task 59 path towards the lowest possible energy demand and CO2 emissions // International Journal of Building Pathology and Adaptation International Journal of Building Pathology and Adaptation. 2020. 38(4). P. 539-553. DOI: 10.1108/IJBPA-12-2018-0102.
4. Uraga E.J., Etxepare L., Lizundia I. and Sagarna M. Energy efficiency intervention and preservation in residential built heritage: analysis, proposal and results in the Gros district of San Sebastian // Preliminary Conference Report: Energy Efficiency in Historic Buildings, 2018. Visby. Pp. 472-481.
5. Гребенщиков В. С. Методология и концептуальное моделирование функциональной структуры промышленного девелопмента индустриальных парков // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. № 9 (108). С. 1053-1060. DOI 10.22227/1997-0935.2017.9.1053-1060.
6. Baronin S. A., Kulakov K.Y. Development of the municipal market of the land plot auctions for housing construction in Russia // Journal of Applied Economic Sciences. 2016. Vol. 11. No. 4. Pp. 698-708.
7. Мельникова И. Б. К проблеме реконструкции исторических промышленных объектов // Экология урбанизированных территорий. 2016. № 1. С. 91-95.
8. Гайдук А. Р. Реновация промышленных объектов и адаптация индустриальных зон городов к современным условиям (на примере г. Казань) // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 4 (38). С. 83-88.
9. Полякова Т. Н., Цурик Т. О. Социокультурные аспекты реабилитации промышленных территорий в городской среде // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Экономика. Социология. Менеджмент. 2019. Т. 9. № 3 (32). С. 226-235.
10. Быстрова Т. Ю. Реабилитация промышленных территорий городов: теоретические предпосылки, проектные направления (часть 1) // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2013. №3. С. 21-24.
11. Воличенко О. В., Головина Е. В. Модель анализа историко-архитектурных объектов // Строительство и реконструкция. 2023. № 6(110). С. 86-96. DOI 10.33979/2073-7416-2023-110-6-86-96.
12. Дрожжин Р. А. Реновация промышленных территорий // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2015. №1 (11). С. 84-86.
13. Майборода Д. В. Реновация промышленных территорий // Вестник науки. 2019. №6 (15). Т. 5. С. 239-241.
14. Гончарова М. С. Реновация промышленных территорий и развитие арт-среды // Труды института бизнес-коммуникаций: научное издание. Т. 3. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, 2018. С. 68-79.
15. Воличенко О. В., Рычкин Е. Д. Реновации промышленных территорий – как фактор преобразования городского ландшафта // Архитектура и строительство России. 2018. № 2(226). С. 84-91.
16. Снитко А. В. Реновация промышленных объектов и архитектурно-историческая среда: вопросы корреляции // Архитектура, градостроительство, дизайн. 2022. № 1(31). С. 19-28.
17. Меркулева А. В. Иммерсивные методики в современных социокультурных практиках // Вестник СПбГИК. 2020. №2 (43). С. 58-62.
18. Венкова А. В. Пространственные энвайронменты в современном искусстве // Международный журнал исследований культуры. 2018. №3 (32). С. 209-219. DOI: 10.24411/2079-1100-2018-00060.
19. Никифорова А. А., Воронова Н. И. Иммерсивные практики в современном культурном пространстве (мировой и отечественный опыт) // Философия и культура. 2023. №5. С. 60-73.
20. Научно-проектная документация проект границ территории объекта культурного наследия регионального значения «Ликеро-водочный завод», 1900 – 1903 гг. (Курская область, г. Курск, ул. Халтурина, д. 16) // Научно-исследовательский центр проектирования и историко-культурных экспертиз НИЦ ПИИКЭ. М., 2023. Шифр: 2023/74-ГТ-1.
21. Капцевич О. А. Психологические эффекты визуального восприятия городской среды: систематический обзор // Психология. Журнал Высшей школы экономики. 2021. Т. 18. № 3. С. 575–597.

REFERENCES

1. SP 42.13330.2016. Gradostroitel'stvo. Planirovka i zastroyka gorodskih i sel'skih poselenij [Planning and development of urban and rural settlements] Uтвержден приказом Министерства строitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo hozyajstva Rossijskoj Federacii ot 30 dekabrya 2016 g. N 1034/pr. i vveden v dejstvie s 1 iyulya 2017 g. [Elektronnyj resurs]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456054209> (data obrashcheniya: 24.04.2024). (rus)
2. Volichenko O., Curik T. Dvoystvennost' otnosheniya k istoricheskoy gorodskoj zastroyke [Ambivalence of attitude towards historical urban development] *Proekt Bajkal*. 2023. Vol. 20. No. 75. Pp. 68-73. DOI 10.51461/pb.75.16. (rus)
3. Herrera-Avellanosa D., Haas F., Leijonhufvud G., Brostrom T., Buda A., Pracchi V., Webb A. L., Hüttler W., Troi A. Deep renovation of historic buildings: The IEA-SHC Task 59 path towards the low-est possible energy demand and CO2 emissions. *International Journal of Building Pathology and Adaptation International Journal of Building Pathology and Adaptation*. 2020. 38(4). Pp. 539-553. DOI: 10.1108/IJBPA-12-2018-0102.
4. Uranga E.J., Etxepare L., Lizundia I. and Sagarna M. Energy efficiency intervention and preservation in residential built heritage: analysis, proposal and results in the Gros district of San Sebastian. Preliminary Conference Report: Energy Efficiency in Historic Buildings, 2018. Visby. Pp. 472-481.
5. Grebenshchikov V. S. Metodologiya i konceptual'noe modelirovanie funkcional'noj struktury promyshlennogo developmenta industrial'nyh parkov [Methodology and conceptual modeling of the functional structure of industrial development of industrial parks] *Vestnik MGSU*. 2017. Vol. 12. No. 9 (108). Pp. 1053-1060. DOI 10.22227/1997-0935.2017.9.1053-1060. (rus)
6. Baronin S. A., Kulakov K.Y. Development of the municipal market of the land plot auctions for housing construction in Russia. *Journal of Applied Economic Sciences*. 2016. Vol. 11. No. 4. Pp. 698-708. (rus)
7. Mel'nikova I. B. K probleme rekonstrukcii istoricheskikh promyshlennykh ob"ektov [On the problem of reconstruction of historical industrial facilities] *Ekologiya urbanizirovannykh territorij*. 2016. No. 1. Pp. 91-95. (rus)
8. Gajduk A. R. Renovaciya promyshlennykh ob"ektov i adaptaciya industrial'nyh zon gorodov k sovremennym usloviyam (na primere g. Kazan') [Renovation of industrial facilities and adaptation of industrial zones of cities to modern conditions (using the example of Kazan)] *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2016. No. 4 (38). Pp. 83-88. (rus)
9. Polyakova T. N., Curik T. O. Sociokul'turnye aspekty reabilitacii promyshlennykh territorij v gorodskoj srede [Sociocultural aspects of rehabilitation of industrial areas in the urban environment] *Izvestiya YUgo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika. Sociologiya. Menedzhment*. 2019. Vol. 9. No. 3 (32). Pp. 226-235. (rus)
10. Bystrova T. YU. Reabilitaciya promyshlennykh territorij gorodov: teoreticheskie pred-posylki, proektnye napravleniya (chast' 1) [Rehabilitation of industrial areas of cities: theoretical background, project directions (part 1)] *Akademicheskij vestnik UralNIIProekt RAASN*. 2013. No. 3. Pp. 21-24. (rus)
11. Volichenko O. V., Golovina E. V. Model' analiza istoriko-arhitekturnykh ob"ektov [Model for analysis of historical and architectural objects] *Stroitel'stvo i rekonstrukciya*. 2023. No. 6 (110). Pp. 86-96. DOI 10.33979/2073-7416-2023-110-6-86-96. (rus)
12. Drozhzhin R. A. Renovaciya promyshlennykh territorij [Renovation of industrial areas] *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta*. 2015. No. 1 (11). Pp. 84-86. (rus)
13. Majboroda D. V. Renovaciya promyshlennykh territorij [Renovation of industrial areas] *Vestnik nauki*. 2019. No. 6 (15). Vol. 5. Pp. 239-241. (rus)
14. Goncharova M. S. Renovaciya promyshlennykh territorij i razvitie art-sredy [Renovation of industrial areas and development of the art environment] *Trudy instituta biznes-kommunikacij: nauchnoe izdanie*. Vol. 3. Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskij gos-udarstvennyj universitet promyshlennykh tekhnologij i dizajna, 2018. Pp. 68-79. (rus)
15. Volichenko O. V., Rychkin E. D. Renovacii promyshlennykh territorij – kak faktor pre-obrazovaniya gorodskogo landshafta [Renovation of industrial areas - as a factor in transforming the urban landscape] *Arhitektura i stroitel'stvo Rossii*. 2018. No. 2(226). Pp. 84-91. (rus)
16. Snitko A. V. Renovaciya promyshlennykh ob"ektov i arhitekturno-istoricheskaya sreda: voprosy korrelyacii [Renovation of industrial facilities and architectural and historical environment: issues of correlation] *Arhitektura, gradostroitel'stvo, dizajn*. 2022. No. 1(31). Pp. 19-28. (rus)
17. Merkul'eva A. V. Immersivnye metodiki v sovremennykh sociokul'turnykh praktikah [Immersive techniques in modern sociocultural practices] *Vestnik SPbGIK*. 2020. No. 2 (43). Pp. 58-62. (rus)

18. Venkova A. V. Prostranstvennye envajronmenty v sovremennom iskusstve [Spatial environments in contemporary art] *Mezhduna-rodnyj zhurnal issledovanij kul'tury*. 2018. No. 3 (32). Pp. 209-219. DOI: 10.24411/2079-1100-2018-00060. (rus)
19. Nikiforova A. A., Voronova N. I. Immersivnye praktiki v sovremennom kul'turnom prostranstve (mirovoj i otechestvennyj opyt) [Immersive practices in the modern cultural space (world and domestic experience)] *Filosofiya i kul'tura*. 2023. No. 5. Pp. 60-73. (rus)
20. Nauchno-proektnaya dokumentaciya proekt granic territorii ob'ekta kul'turnogo nasle-diya regional'nogo znacheniya «Likero–vodochnyj zavod», 1900 – 1903 gg. (Kurskaya oblast', g. Kursk, ul. Halturina, d. 16). Nauchno-issledovatel'skij centr proektirovaniya i istoriko-kul'turnyh ekspertiz NIC PIIKE. M., 2023. SHifr: 2023/74-GT-1. (rus)
21. Kapceвич O. A. Psihologicheskie efekty vizual'nogo vospriyatiya gorodskoj sredy: si-stematicheskij obzor [Psychological effects of visual perception of urban environments: a systematic review] *Psihologiya. Zhurnal Vysshej shkoly ekonomiki*. 2021. Vol. 18. No. 3. Pp. 575–597. (rus)

Информация об авторах

Воличенко Ольга Владимировна

Российский университет дружбы народов им. П. Лумумбы, г. Москва, Россия,
ФГБОУ ВО «НИУ Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия
д-р архитектуры, доц., проф. кафедры архитектуры, реставрации и дизайна,
E-mail: wolitschenko@mail.ru

Цурик Татьяна Олеговна

ФГБОУ ВО «Юго-западный государственный университет», г. Курск, Россия,
канд. культурологии, доц., доцент кафедры архитектуры, градостроительства и графики,
E-mail: TsurikTO@yandex.ru

Information about authors

Volichenko Olga Vladimirovna

RUDN University, Moscow, Russia,
National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia
doctor of architecture, docent, prof. of the dep. of architecture, restoration and design,
E-mail: wolitschenko@mail.ru

Tsurik Tatyana O.

Southwestern State University, Kursk, Russia,
candidate cultural, docent, associate prof. of the dep. of architecture, urban planning and graphics,
E-mail: TsurikTO@yandex.ru,

А. Е. ЕНИН,¹ Т. И. ГРОШЕВА¹¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж, Россия

РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ЛАНДШАФТНО-РЕКРЕАЦИОННЫХ ПРОСТРАНСТВ В УСЛОВИЯХ РЕКОНСТРУКЦИИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ИСТОРИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ГОРОДА

Аннотация. Рассмотрены способы моделирования с разделением методов и моделей на два класса: мысленные и материальные. Определена зависимость применения тех или иных методов моделирования и типов моделей от природы исследуемого объекта или явления. Установлено, что для сложных объектов используется комплексный и системный подход. Показана неэффективность технико-экономических и «комплексных» методов исследования и делается вывод о том, что выход из создавшегося положения возможен лишь при пересмотре сложившейся методологической концепции. Предложен анализ критериев, которым должен соответствовать архитектурный объект для количественного анализа и моделирования его структуры. Показано, что проектировщики и исследователи используют методы количественного анализа функционально-пространственной структуры ландшафтно-рекреационного пространства (ЛРП) городской среды, а также дополнительные методы и приёмы анализа функционально-пространственной структуры ЛРП городской среды. Предложен реально осуществимый путь успешного построения и управления жизнедеятельностью демозкосистем, как объекта архитектуры, это разработка функциональных моделей, адекватных реальным экологическим системам типа «население↔среда» с точностью до «С-изоморфизма» (системного изоморфизма). Таким образом, формулировка концепции проекта реконструкции ландшафтно-рекреационного пространства базируется на понимании пространства, как демозкосистемы, достижения эффективности, взаимосвязанной работой всех компонентов и протекающих процессов (производственных, бытовых, рекреационных и коммуникационных). Таким образом, достигается целостность ландшафтно-рекреационного пространства.

Ключевые слова: модель, ландшафтно-рекреационное пространство, демозкосистема, системный изоморфизм, целостность

А. Е. ENIN¹, T. I. GROSHEVA¹¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

DEVELOPMENT OF MODELS OF LANDSCAPE AND RECREATIONAL SPACES IN THE CONTEXT OF RECONSTRUCTION OF THE CENTRAL HISTORICAL PART OF THE CITY

Abstract. Methods of modeling are considered with the division of methods and models into two classes: mental and material. The dependence of the application of certain modeling methods and types of models on the nature of the object or phenomenon under study is determined. It has been established that an integrated and systematic approach is used for complex objects. The inefficiency of technical, economic and "complex" research methods is shown, and it is concluded that a way out of the current situation is possible only if the architects revise the existing methodological concept. An analysis of the criteria that an architectural object must meet for quantitative analysis and modeling of its structure is proposed.

It is shown that designers and researchers use methods of quantitative analysis of the functional and spatial structure of the landscape and recreational space of the urban environment, as well as additional methods and techniques for analyzing the functional and spatial structure of the urban environment. The only realistically feasible way of successful construction and management of the life of demoecosystems as an object of architecture is the development of functional models that are adequate to real ecological systems of the "population-environment↔" type with an accuracy of "C-isomorphism" (system isomorphism). Thus, the formulation of the concept of the project for the reconstruction of landscape and recreational space is based on the understanding of space as a demoecosystem, the achievement of efficiency, the interrelated work of all components and ongoing processes (industrial, domestic, recreational and communication). Thus, the integrity of the landscape and recreational space is achieved.

Keywords: model, landscape-recreational space, demoecosystem, systemic isomorphism, integrity.

Введение

Существующие способы моделирования предполагают разделение методов моделирования и соответствующих им моделей на два больших класса: мысленные и материальные. В зависимости от природы исследуемого объекта или явления применяются те или иные методы моделирования и типы моделей.

Как известно, объективно, существует несколько различных подходов и методов исследования – *интуитивный, технико-экономический, комплексный и системный*.

Для сложных объектов, чаще используется комплексный и системный подход. «Комплексный подход» появился из желания минимизировать недостатки технико-экономического подхода, заключающиеся в том, что «экономика» идентифицируется в коэффициентах, рублях, процентах, а «качество» - с помощью словесного описательного определения соответствия анализируемого явления общим требованиям и нормативам.

Неэффективность технико-экономических и так называемых «комплексных» методов приводит к тому, что у заказчика и у архитектора снижается интерес к итоговым экономическим и/или потребительским показателям исследуемого объекта. И это притом, что масштабы экономического, социального, экологического и иных рисков в современной архитектуре и градостроительстве не имеют себе равных.

Многолетний опыт отраслей народного хозяйства, - по весомости и значимости отмеченных выше характеристик, близких архитектуре и градостроительству, - свидетельствует о том, что выход из создавшегося положения возможен лишь при пересмотре зодчими сложившейся методологической концепции [1].

Для целей настоящего исследования необходим анализ критериев, которым должен соответствовать архитектурный объект для количественного анализа и моделирования его структуры. Проектировщики и исследователи используют методы количественного анализа функционально-пространственной структуры ландшафтно-рекреационного пространства (ЛРП) городской среды, а также дополнительные методы и приёмы анализа функционально-пространственной структуры ЛРП городской среды (из трудов И.О. Матлина, Г.Ш. Токаревой, А.М. Якшина) [2,3,4].

Критерии архитектурных объектов при их количественном анализе и моделировании

В случае исследования сложных систем особая роль отдана количественному анализу их функционально-пространственной структуры в целом, и ее различных компонентов.

Количественный анализ и моделирование архитектурных систем позволяет воссоздать варианты строения функционально-пространственной структуры и выбрать из общего числа полученных моделей наиболее оптимальную (эффективную) для дальнейшего выполнения проектного решения.

В настоящее время наука предусматривает два вида моделирования систем: мысленное и материальное. Мысленное моделирование реализуется на начальных и обобщающих стадиях исследования. Материальное моделирование необходимо для «воспроизведения структуры, характера, сущности архитектурных объектов» [5, с. 63].

Материальное моделирование, его модели можно разделить на три типа: геометрические (пространственные), физические (основанные на измерении пространства и времени) и структурно или функционально подобные моделируемому объекту (математические).

Системы должны соответствовать ряду критериев для количественного анализа и моделирования компонентов их функционально-пространственной структуры:

– *целостность или единство цели*, которой служат все составные части системы.

И.В. Жолтовский говорил, что «... прежде всего это закон единства, сложный, подчиняющий себе все многообразие входящих в него элементов. Его всегда надо иметь в виду. Творческая мысль художника всегда должна идти от целого к части, а не наоборот, даже в тех случаях, когда он работает над отдельным элементом целого, например, над жилой ячейкой или домом, входящим в комплекс» [6]. Целью компонентов рассматриваемой системы является формирование «оптимальной» функционально-пространственной структуры системы ЛРП городской среды. Под «оптимальностью» в данном случае понимается эффективное функционирование и рациональная пространственная организация системы за счет равномерного размещения объектов инфраструктуры в ЛРП, рассредоточенных в пространстве объекта. Как следствие, достигается цель удовлетворения потребностей потребителей в кратчайшие сроки при минимизации затрат (территориальных, денежных, рабочей силы и других ресурсов) на формирование и последующее архитектурное управление данной системой.

– *множественность элементов*, каждый из которых выполняет различные системно обусловленные функции. ЛРП городской среды состоят из трех групп компонентов: производственных объектов, непроизводственных объектов и объектов коммуникаций. Каждая группа компонентов включает различные элементы. В подобной структурной организации проявляется свойство «множественности элементов». При этом количество объектов каждого компонента может варьироваться в зависимости от различных внешних условий. Так как любое ЛРП города является частью системы городской среды, определяющие свойства системы характерны и для него в целом. Все компоненты ЛРП и соответственно системы городской среды выполняют функции, обусловленные генеральной целью системы.

– *иерархичность структуры*, при которой взаимосвязь и взаимовлияние элементов осуществляется в порядке подчинения – от низшего к высшему уровню. В процессе выполнения иерархической классификации ЛРП городской среды выявлена пятиранговая структура системы. Данная модель, состоящая из пяти уровней: «Агломерация», «Город», «Район», «Квартал», «Двор» оптимальна для применения ее с целью формирования функционально-пространственного структурного каркаса системы ЛРП городской среды (рис.1.). Проблема ранжирования компонентов архитектурных систем тесно связана с проблемой очередности строительства, реконструкции, их компонентов. В данном случае необходим план поэтапного формирования и развития структурного каркаса системы ЛРП городской среды, в котором объектами второй очереди будут являться объекты уровня «Город», объектами четвертой очереди ЛРП уровня «Квартал». Харвей С. Перлоф писал, что «вопрос приоритета очень важен, так как город может осилить одновременно развитие одного или двух планировочных новообразований... При этом, к примеру, не целесообразно воплощать в жизнь только один проект из общего числа задуманных и ожидать выдающихся результатов. Внимание должно быть сфокусировано на городской среде в целом...» [7, с. 7-8].

– *органичность взаимосвязи элементов* – изменение параметров одного из них определенным образом влияет на изменение параметров других элементов и, как правило, нелинейным образом. При формировании и развитии структурного каркаса системы ЛРП городской среды можно отметить как относительно автономное, так и групповое развитие данных объектов и их компонентов. Вторая форма считается приоритетной, так как при реализации данной концепции формирование или развитие компонентов (ЛРП) происходит взаимосвязано из-за взаимообусловленности их развития.

В настоящее время зарубежные ученые выделяют два важных свойства систем, которые имеют особое значение при их моделировании и описании: сложность и *эмерджентность*.

Система ЛРП городской среды относится к числу систем, обладающих сложной функционально-пространственной структурой.

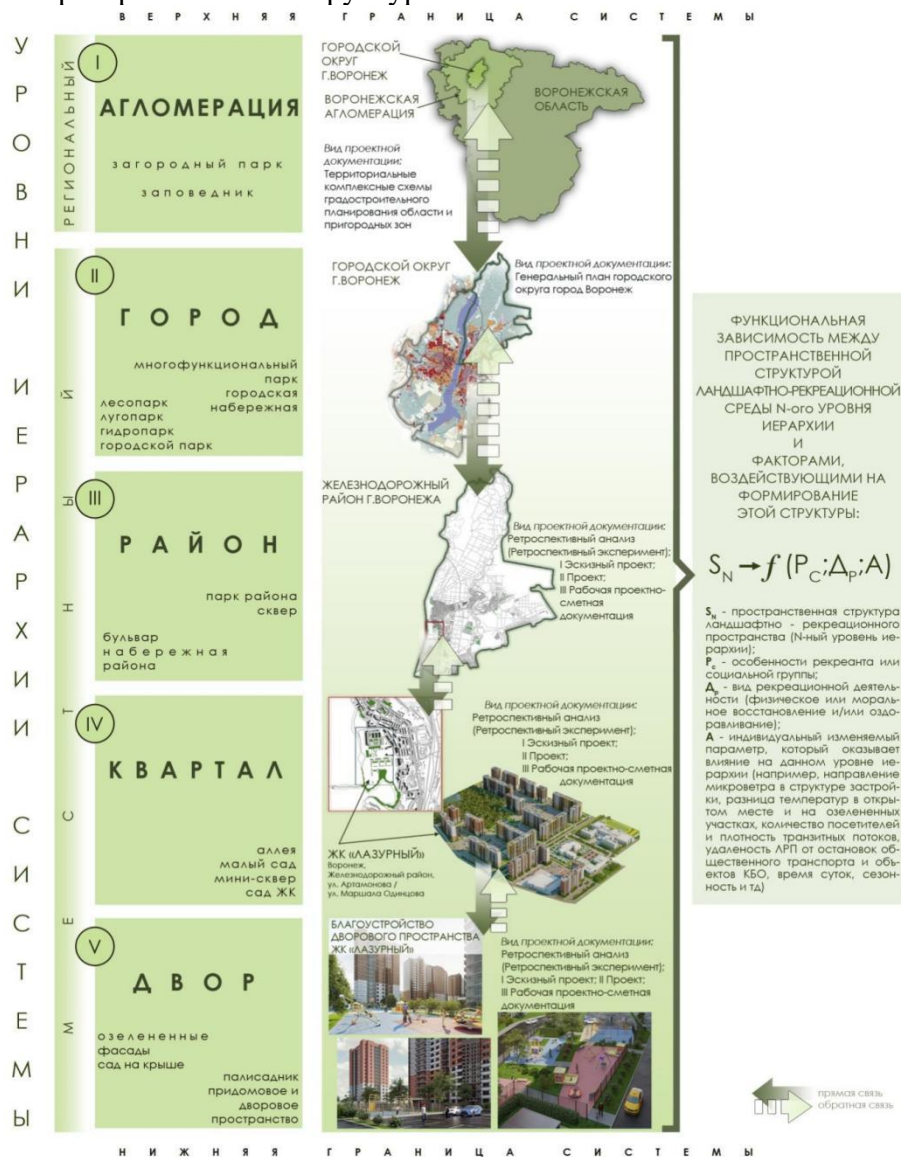


Рисунок 1 – Иерархическая классификация ЛРП городской среды (рисунок авторов)

Основными критериями структуры системы являются: наличие не только пространственных компонентов, но и функциональных связей компонентов; а также взаимосвязь и взаимовлияние пространственных компонентов и функциональных процессов, как в контексте одной какой-либо подсистемы, так и в контексте взаимосвязи нескольких подсистем схожих и различных иерархических уровней.

«Очевидный способ формирования более сложного целого кроется в комбинировании простых систем в структуре более сложных» [8, с. 39]. Для описания поведения сложных систем, необходимо понять не только поведение их частей, но и как эти части взаимодействуют, формируя поведение целого. В связи с этим, одним из главных вопросов при изучении сложных систем становится выявление характера отношения сложности целого к сложности его частей.

Свойства эмерджентности не могут быть изучены вне самой системы, рассматривая только ее компоненты - «свойства эмерджентности проявляются тогда, когда инструменты для объяснения, которые применимы к частям целого, не отвечают задачам понимания сформированной системы» [9, с. 81].

Это и есть особенность свойства эмерджентности любой системы.

Рассматриваемая система ЛРП городской среды обладает свойством эмерджентного усложнения, при котором, по мере рассмотрения ее структуры от условно простейших элементов до системы в целом структурная организация и поведение все больше усложняются за счет увеличения количества компонентов (подсистем) и усложнения взаимосвязей данных компонентов.

Наряду со свойством эмерджентного усложнения системе ЛРП городской среды соответствует свойство глобальной эмерджентности – исключение из ее структуры какой-либо подсистемы влечет изменение свойств последней. Вычлененная из структуры системы подсистема будет отличаться от своего аналога, находящегося в структуре системы компонентами (их количеством и вариативностью) и функциональными процессами (их количеством и направленностью). Причиной таких изменений служит несоответствие целей функционирования вычлененной подсистемы целям функционирования системы ЛРП городской среды.

Количественный анализ и моделирование функционально-пространственной структуры ландшафтно-рекреационных пространств городской среды

Количественный анализ функционально-пространственной структуры ЛРП городской среды имеет особое значение в поиске *метода количественного сопоставления их компонентов*.

Суть разработанного метода заключается в: – определении принадлежности существующих, проектируемых и реконструируемых ЛРП городской среды к какой-либо типологической группе за счет количественного сопоставления объектов различных функциональных групп, и выделения преобладающей группы в структуре объекта; – сопоставлении оптимальной модели структуры ЛРП городской среды со сложившейся на данный момент или предложенной в вариантных проектах развития объекта;

– корректировке структуры существующих ЛРП городской среды и планируемых в проектных предложениях их развития.

Целью применения данного метода является поиск и определение оптимальной функционально-пространственной структуры ЛРП городской среды.

При моделировании ЛРП города необходимо учитывать, что:

$$S_{\text{ЛРП}} = S_{\text{объектов производства услуг}} + S_{\text{непроизводственных объектов}} + S_{\text{объектов коммуникаций}}, \quad (1)$$

в свою очередь,

$$S_{\text{объектов производства услуг}} = S_{\text{объектов быт. обслуживания}} + S_{\text{объектов культуры и управления}} + S_{\text{объектов энергетики}}; \quad (2)$$

$$S_{\text{непроизводственных объектов}} = S_{\text{объектов просвещения и дизайна}} + S_{\text{ландшафтных объектов}}; \quad (3)$$

$$S_{\text{объектов коммуникаций}} = S_{\text{объектов тр. инфраструктуры}} + S_{\text{тр. коммуникаций}} + S_{\text{пеш. коммуникаций}}, \quad (4)$$

где, «S» - сумма площадей объектов различного функционального профиля.

Количество объектов различного функционального профиля инвариантно, определяется инвесторами и проектировщиками, и зависит от: – исходной функционально-

пространственной структуры пространства; – планируемого ранга ЛРП городской среды (общегородского, районного и т.д. значения); – планируемой типологической принадлежности ЛРП городской среды к какой-либо группе.

Расчет площадей объектов необходим для соизмерения компонентов ЛРП в количественных эквивалентах и для выявления преобладающей группы объектов какого-либо функционального профиля.

Общая площадь («S») системы ЛРП городской среды, будет зависеть от количества ЛРП городской среды и занимаемых ими площадей:

$$S_{\text{системы ЛРП}} = a + b + c, \quad (5)$$

где, a – суммарная площадь («S») всех ЛРП ранга «Город»; b – суммарная площадь («S») всех ЛРП ранга «Район»; c – суммарная площадь («S») всех ЛРП ранга «Квартал».

Количество ЛРП любых рангов также инвариантно, определяется специалистом как на стадии разработки проекта развития структурного каркаса системы ЛРП городской среды, так и может предшествовать разработке проектного предложения. В обоих случаях учитывается: – сложившаяся архитектурно-планировочная структура объекта, функционально-пространственный и планировочный потенциал пространств для развития системы ЛРП городской среды; – объем инвестиций для реализации проектного предложения развития системы ЛРП городской среды.

Необходимо учитывать разницу количества потенциальных ЛРП и количества тех, строительство и реконструкция которых представляется возможным в связи с существующими ресурсами (временными, людскими, финансовыми и т.д.):

$$R = S_{\text{системы ЛРП (реализованная)}} / S_{\text{системы ЛРП (планируемая)}}, \quad (6)$$

где, R – доля реализованных проектов;

А также количество реализованных проектов за расчетное время (« t »):

$$E = R/t, \quad (7)$$

где, E – показатель результативности процесса преобразования планировочной и функционально-пространственной структуры городской среды.

Критерий компактности эквивалентен критерию оптимальности функционально-пространственной структуры системы ЛРП городской среды, когда:

$$a \rightarrow a_{\min} \quad b \rightarrow b_{\min} \quad c \rightarrow c_{\min},$$

$$\text{то и,} \quad S_{\text{системы ЛРП}} \rightarrow S_{\text{системы ЛРП min}}. \quad (8)$$

Но, сокращение площадей под размещение компонентов ЛРП не должно отражаться на критерии качества их функционирования. Для критерия качества функционирования («F») необходимо соблюдение следующего условия:

$$F_{\text{ЛРП опт}} \text{ при } S_{\text{ЛРП max}} \leq F_{\text{ЛРП опт}} \text{ при } S_{\text{ЛРП min}}. \quad (9)$$

Чем компактнее решение функционально-пространственной структуры ЛРП городской среды, тем меньше ресурсов будет задействовано на его формирование и формирование компонентов его составляющих.

За основу для теоретического моделирования функционально-пространственной структуры системы ЛРП городской среды были взяты принципы строения фракталов. «Говоря в общем, математические и природные фракталы являются фигурами, геометрия и фрагментарность которых не тяготеет ни к исчезновению, ни к вариативности, но остается в сущности неизменной, дублируясь в процессе масштабирования объекта от его компонентов к нему самому. Следовательно, структура каждого фрагмента содержит в себе ключ к структуре целого» [9, с. 4].

Разработка теоретической модели функционально-пространственной структуры системы ЛРП городской среды включала в себя следующие этапы: – анализ рекурсивного генерирования фракталов; – построение пространственной структуры системы ЛРП; – построение функциональной структуры системы ЛРП; – детализация строения пространственной структуры ЛРП; – детализация строения функциональной структуры ЛРП.

Анализ рекурсивного генерирования фракталов показывает способ бесконечного членения целого на подобные ему части. На базе подобного принципа строится метод моделирования. Подобно тому, как каждая рассматриваемая часть фрактала, да и сама фигура в целом, включает в себя «схожие в сокращении» части, система ЛРП городской среды включает такие же подобные себе части. В исследовательской работе Х.Д.А. Исмаила выделены следующие критерии, которым должен соответствовать архитектурный объект для его соответствия числу фрактал подобных: само подобие, целостность объекта и многообразие структурно подобных (само подобных) элементов, степень фрактальной сложности, иерархическое взаимоотношение фрактальных элементов и изменения с течением времени [10].

Теоретическая модель пространственной и функциональной структуры системы ЛРП городской среды базируется на принципе «от целого к частному», согласно которому целой фигуре соответствует совокупность пространственных и функциональных компонентов архитектурной системы, а каждому последующему уровню разложения фигуры подобные ей компоненты (рис.2).

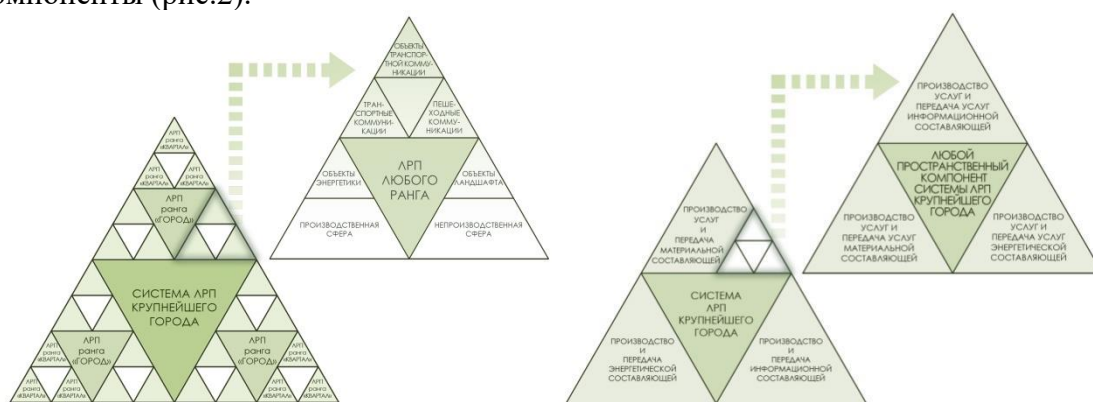


Рисунок 2 – Модель взаимосвязи и взаимовлияния системы ЛРП и модель функциональной структуры (рисунок авторов)

Вспомогательные методы количественного анализа и моделирования функционально-пространственной структуры ландшафтно-рекреационных пространств городской среды

Дополнительными предпроектными количественными методами моделирования структуры ландшафтно-рекреационных пространств являются: определение емкости и границ объектов [3,11], определение средней удаленности посетителей относительно центрального ядра [4], размещение фокусов тяготения [12,13] и т.д.

Метод определения емкости и границ объектов заключается в функциональной дифференциации компонентов ЛРП и определении целесообразности размещения того или иного объекта в пределах исследуемой территории.

Интенсивность функционирования объекта определяется за счет показателя суммарной посещаемости:

$$m = aw, \quad (10)$$

где, a – функциональная мощность объекта (кол-во работающих в одну смену для объектов, кол-во зрительных мест для зрелищных учреждений, кол-во рабочих мест обслуживающего персонала для учреждений обслуживания); w – частота посещаемости, измеряемая отношением продолжительности времени функционирования объекта в течение суток (t_p) и условного времени единичного посещения ($t_{e.n.}$).

Объекты с высокими значениями суммарной посещаемости располагаются в непосредственной близости от ядра ЛРП; иные объекты – на периферии объекта.

Критерием выделения области пространственной локализации ядра служит плотность функционально-пространственных связей между объектами (показатель связности d_{it}):

$$d_{it} = \sum_{j=1}^{j=n} m_i k_{ij}, \quad (11)$$

где, i – индекс оцениваемого объекта; j – индекс объекта, отличного от i ; m_i – суммарная посещаемость объекта i ; k_{ij} – время пешеходной доступности по кратчайшему маршруту от i до j .

Показатель интенсивности функционирования объекта:

$$P_j = Q_i d_{it}, \quad (12)$$

где, d_{it} – связность объекта; Q_i – относительная посещаемость всех объектов i , определяемая как:

$$Q = \frac{m_i}{\sum m} 100\%, \quad (13)$$

($\sum m$ – общая посещаемость всех компонентов объекта).

Для определения размещения компонента в той или иной зоне объекта может применяться критерий коммуникативности (K):

$$K = \frac{m}{m+n} 100\% \quad (14)$$

где, m – кол-во посетителей объекта в течение суток; n – кол-во работающих, учащихся и т.д.

Метод А.М. Якшина – определение средней удаленности посетителей (адресатов) – направлен на соблюдение критерия компактности планировочного решения объекта и определяет доступность основных фокусов тяготения посетителей с учетом трассировки транспортных и пешеходных связей.

Для реализации метода необходимо произвести фиксацию распределения потребителей по территории ЛРП – выделить расчетные зоны. В каждой зоне ЛРП определяется количество посетителей. Устанавливается расстояние от центра каждой расчетной зоны до исследуемой точки.

Средняя удаленность посетителей ЛРП исследуемой зоны составляет величину:

$$Bi(n) = \frac{\sum_i^j n_i \Delta_{ij}}{N} \quad (15)$$

где, n_i – посетители расчетной зоны; Δ_{ij} – расстояние от центра расчетной зоны до исследуемого центра (может приниматься в единицах времени); N – суммарное количество адресатов.

В результате выявляется величина, характеризующая удаленность всех адресатов ЛРП относительно конкретной точки в км/времени.

«Качество» трассировки транспортно-пешеходных коммуникаций определяется показателем непрямолинейности сети. Коэффициент непрямолинейности представляет собой отношение средней удаленности всех посетителей ЛРП относительно исследуемого центра по транспортно-пешеходной сети к средней удаленности посетителей по воздушным расстояниям: определяется кратчайшее воздушное расстояние от центра каждого расчетного участка до исследуемого центра; расстояние по транспортно-пешеходной сети; рассчитывается коэффициент непрямолинейности

$$\gamma = \frac{\text{удаленность по транспортно-пешех.сети}}{\text{удаленность по воздушным расстояниям}} \quad (16)$$

выявляется насколько больше расстояние придется преодолевать посетителям ЛРП по транспортно-пешеходной сети по сравнению с кратчайшим (оптимальная величина $\gamma < 1,20$).

Применим данные методы количественного анализа и моделирования на реальном объекте, а именно - **парке им. А.Л. Дурова** (рис.3):

1) *Определение емкости и границ объекта*

Интенсивность функционирования объекта определяется за счет показателя суммарной посещаемости:

$$m = aw, \quad (17)$$

где, a – функциональная мощность объекта (кол-во работающих в одну смену для объектов, кол-во рабочих мест обслуживающего персонала для учреждений обслуживания - мы брали эти показатели в зависимости от характера функционирования объекта); w – частота посещаемости, измеряемая отношением продолжительности времени функционирования объекта в течение суток (t_p) и условного времени единичного посещения ($t_{e.n.}$).

1 - Рампа для скейтбордистов: $m_1 = 5 * (10/2,5) = 20$; 2 - Сакральное место: $m_2 = 6 * (10/1) = 60$;

3 - Детская площадка: $m_3 = 15 * (10/1,5) = 99,9 \sim 100$; 4 - Кафе, выставочный павильон: $m_4 = 44 * (10/3) = 146$;

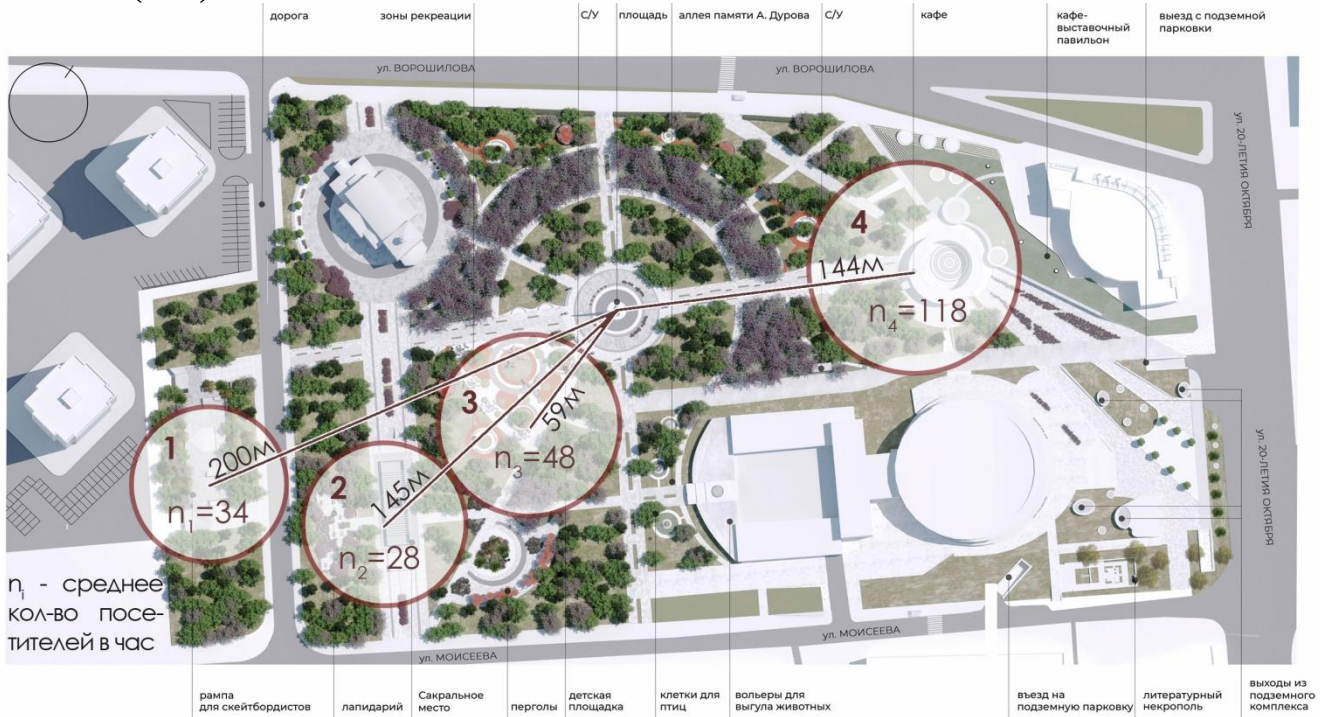


Рисунок 3 – Применение методов количественного анализа и моделирования на реальном объекте, - парке им. А.Л. Дурова в Воронеже (рисунок авторов)

Что подтверждает теоретическую часть: объекты с высокими значениями суммарной посещаемости располагаются в непосредственной близости от ядра ЛРП; иные объекты – на периферии объекта.

2) Критерием выделения области пространственной локализации ядра служит плотность функционально-пространственных связей между объектами (показатель связности d_{it}):

$$d_{it} = \sum_j^{j=n} m_i k_{ij}, \quad (18)$$

где, i – индекс оцениваемого объекта; j – индекс объекта, отличного от i ; (мы брали центральную площадь парка); m_i – суммарная посещаемость объекта i ; (мы берем среднее кол-во посетителей в час); k_{ij} – время пешеходной доступности по кратчайшему маршруту от i до j ;

$$d_{1t} = \sum_j^{j=n} 34 * 2,4 = 81,6; d_{2t} = \sum_j^{j=n} 28 * 1,73 = 48,44; d_{3t} = \sum_j^{j=n} 48 * 0,7 = 33,6; d_{4t} = \sum_j^{j=n} 118 * 1,72 = 202,96;$$

3) Показатель интенсивности функционирования объекта:

$$P_j = Q_i d_{it}, \quad (19)$$

где, d_{it} – связность объекта; Q_i – относительная посещаемость всех объектов i , определяемая как

$$Q = \frac{m_i}{\sum m} 100\% . \quad (20)$$

($\sum m$ – общая посещаемость всех компонентов объекта).

$\sum m = 34+28+48+118 = 228$; $Q_1 = 34/ 228 *100\% = 14,91 \%$; $Q_2 = 28/ 228 *100\% = 12,28 \%$; $Q_3 = 48/ 228 *100\% = 21,05 \%$; $Q_4 = 118/ 228 *100\% = 51,76 \%$;

Значит:

$P_1 = 14,91 * 81,6 = 1216,65$; $P_2 = 12,28 * 48,44 = 594,84$; $P_3 = 21,05 * 33,6 = 707,208$; $P_4 = 51,76 * 202,96 = 10505,2$;

По полученным данным, мы видим, что показатель интенсивности функционирования объекта у кафе и выставочного павильона самый высокий, следующее место занимает рампа для скейтбордистов, детская площадка и затем - объект - сакральное место.

4) Для определения размещения компонента в той или иной зоне объекта может применяться критерий коммуникативности (K):

$$K = \frac{m}{m+n} 100\% , \quad (21)$$

где, m – кол-во посетителей объекта в течение суток; n – кол-во работающих, учащихся и т.д.

$$K_1 = \frac{156}{156+74} 100\% = 67,82$$
; $K_2 = \frac{78}{78+23} 100\% = 77,22$; $K_3 = \frac{347}{347+182} 100\% = 65,59$; $K_4 = \frac{539}{539+443} 100\% = 54,88$;

5) *Определение средней удаленности компонентов и посетителей относительно центрального ядра:*

Средняя удаленность посетителей ЛРП исследуемой зоны составляет величину:

$$Bi(n) = \frac{\sum_i^j n_i \Delta l_{ij}}{N} , \quad (22)$$

где, n_i – посетители расчетной зоны; (мы брали среднее кол-во посетителей в час), Δl_{ij} – расстояние от центра расчетной зоны до исследуемого центра (может приниматься в единицах времени); N – суммарное количество адресатов.

В результате выявляется величина, характеризующая удаленность всех адресатов ЛРП относительно конкретной точки в км/времени.

$$N = n_1 + n_2 + n_3 + n_4 = 34 + 28 + 48 + 118 = 228,$$

$\Delta l_{1j} = 200$ м, при скорости человека 5 км/ч - 200 метров он пройдет за 2 минуты 24 секунды = 2,4 минуты; $\Delta l_{2j} = 145$ м, при скорости человека 5 км/ч - 145 метров он пройдет за 1 минуту 44 секунды = 1,73 минуты; $\Delta l_{3j} = 59$ м, при скорости человека 5 км/ч - 59 метров он пройдет за 42 секунды = 0,7 минуты; $\Delta l_{4j} = 144$ м, при скорости человека 5 км/ч - 145 метров он пройдет за 1 минуту 43 секунды = 1,72 минуты;

$$B_1(n) = \frac{\sum_1^j 34 * 2,4}{228} = 0,357 \text{ (рампа для скейтбордистов);}$$

$$B_2(n) = \frac{\sum_2^j 28 * 1,73}{228} = 0,212 \text{ (сакральное место);}$$

$$B_3(n) = \frac{\sum_3^j 48 * 0,7}{228} = 0,147 \text{ (детская площадка);}$$

$$B_4(n) = \frac{\sum_4^j 118 * 1,72}{228} = 0,89 \text{ (кафе).}$$

б) «Качество» трассировки транспортно-пешеходных коммуникаций определяется показателем *коэффициентом непрямолинейности сети*.

$$\gamma = \frac{\text{удаленность по транспортно-пешех.сети}}{\text{удаленность по воздушным расстояниям}} = \frac{584\text{м}}{548\text{ м}} = 1,06.$$

Оптимальная величина $\gamma < 1,20$.

Современное функционирование и развитие человеческой цивилизации разительно отличается от того состояния, под которым мы понимаем её «прошлое». Необходимо отметить, что одной из форм движения знаний вообще и в области формирования социального пространства в частности, является *цикл*, началом которого можно условно считать принятие той или иной гипотезы о развитии конкретного пространства, а окончанием – реализацию замысла в строительстве и проверку его в процессе эксплуатации. С другой стороны, одновременно с цикличностью существует такой вид движения, как *развитие*. Эти динамические состояния знаний изображены в виде структурных моделей (рис.4).

Модель I связана с идеей цикла, модель II- с идеей развития. В случае развития, каждый последующий этап представляет собой неразрывное единство с предыдущим и обуславливается им, а это говорит о том, что модель II можно представить в виде модели III. Модели I и II (III) являются условно выделенными формами единого процесса эволюции понятий «пространство» и «качество» и методов их исследования и оценки, поэтому модель IV более полно и системно отображает характер изменения знаний о «пространстве». Она содержит и движение по циклу, и «линейное» движение развития от простого к всё более сложному.

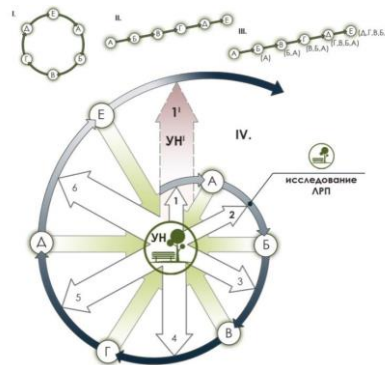


Рисунок 4 – Модель движения знаний в области формирования социального пространства

(рисунок авторов): I – модель цикла; II, III-модель развития; IV-модель, объединяющая формы цикла и p - наблюдение; А – формулирование научной гипотезы; 2- гипотетико-дедуктивные исследования; Б- построение абстрактной логической («качественной») модели; 3-исследование количественных взаимозависимостей; В – разработка количественной модели; 4- функционально-структурные исследования на моделях; Г – построение физической модели (проектирование); 5- исследование технического и стоимостного аспекта объекта; Д- разработка экспериментального образца; 6- натурный эксперимент; Е – массовое строительство; УН – уровень развития научного знания; I¹- начало нового цикла развития научного знания с позиций УН¹.

Авторы статьи и Салько А.В., ранее отмечали, что « ...Жизнь человека проходит так же по циклу - он развивается, умирает, оставляет опыт потомству, и оно идёт уже не по этому кругу, а уже с некоторым приращением. Но это не значит, что характер этого цикла меняется, нет, это всё постоянно, эволюционно. Человек приобретает знания, попадает в другие условия, другое пространство. Но сам он остаётся неизменным. Любой процесс может выглядеть в виде цикла, модели цикла. Каждый человек с каждым поколением, что-то приобретает, и передаёт следующему. Поэтому на каждом этапе, идёт добавка от предыдущего поколения. И

получается, что на каждом этапе получаем приращение и этот человек нового поколения проходит весь цикл, он выходит не в ту же точку, а выходит на точку выше. И оказывается, что человечество в целом, поколение не по циклу движется, а по спирали. И получается так, что есть движение по циклу, а есть движение развития. Оказывается, что для человека очень важно знать не то, что было и есть, а то, что будет дальше. Доказано, что человечество, как система, замкнутая. Она ограничена своими возможностями. Математик Гёдель, автор теоремы «о не полноте», сказал, что человечество никогда не может знать всего сущего, что для него важно. Биофизики, под руководством академика П.К. Анохина, пришли к такому выводу: человек знает этот цикл (рождение, учёба, женитьба, покупка машины, ...смерть), всех всё устраивает и всё повторяется снова, но человек хочет знать, что будет в будущем. Ощущение, что человек чего-то не знает, «анохинцы» определили как жуткое влечение, над которым человек не властен. Они занимались замкнутыми системами. Проводили исследования в Антарктиде, в изолированных коллективах, подземных пространствах, подводных сооружениях, космических летающих аппаратах. То есть, исследовался человек в замкнутой системе. Они утверждали, что по массообмену система может быть замкнута. Вода может очищаться с помощью оборотного водообмена, а вот информационно, энергетически система не может быть закрыта, она открыта. Она отдаёт, она получает, и главное должен сохраняться баланс того, что отдаёт и получает. От этого зависит жизнь, и человеческая натура ощущает это. И если человек не знает, что с ним будет, это состояние неопределённости, вызывают страшные сдвиги нашей психики. Оказывается, что эстетика поиска, эстетика определения неизвестного, является главной эстетикой. В том числе в архитектуре. Почему мы ищем необычные образы. Интуитивно понимаем, что используемые формы, приёмы устарели, не удовлетворяют и архитекторов и потребителей. Тогда и начинается поиск. То есть реализуется и в нашей области деятельности. В определённый период наступает предел этих поисков, связанный с экономическими аспектами, вкусовыми предпочтениями большого количества людей, потребителей и т.д. Поиски постепенно приводят к усреднённым решениям. Но в природе и в творчестве всегда существует разнообразие. И такое состояние исследователи назвали *творческим поиском*. Эстетику скупого рыцаря определить количественно можно, а эстетику поиска количественно определить нельзя. Все замкнутые системы имеют дефицит информации невосполнимый, т.е., мы никогда не можем знать всё, что нам окажется нужно важным и решающим. Как раз вопрос информационного обеспечения, как строить будущее, каким оно будет в будущем, непосредственно связан с прошлым. Теперь главным товаром стала информация и новые технологии, чтобы преуспеть и просто поспеть за прогрессом, нужно постоянно учиться на протяжении всей жизни, а одной из определяющих теорий настоящего времени стал закон Мура¹[14], который гласит, что каждые восемнадцать месяцев количество информации удваивается. Другими словами, чтобы успеть за переменами, каждые полтора года придется учиться всему практически заново. Объективная необходимость приложения принципов Общей теории систем (ОТС) и методов системного анализа к решению задач на оптимум в такой сложной и ответственной составляющей производительных сил страны как архитектура и градостроительство, в свою очередь не менее остро ставит вопрос разработки так называемого «программного продукта» - компьютерных программ, реализуемых на основе современных информационных технологий, без которых эффективный научный поиск, вариантное проектирование, оперативный мониторинг и управление архитектурными системами, мягко говоря, - проблематичны. Смена экономических и социальных парадигм сильно повлияла на

¹Закон Мура (англ. Moore's law) — эмпирическое наблюдение, изначально сделанное Гордоном Муром, согласно которому (в современной формулировке) количество транзисторов, размещаемых на кристалле интегральной схемы, удваивается каждые 24 месяца. Часто цитируемый интервал в 18 месяцев связан с прогнозом Давида Хауса из Intel, по мнению которого производительность процессоров должна удваиваться каждые 18 месяцев из-за сочетания роста количества транзисторов и быстродействия каждого из них.

архитектуру и облик городов в целом. Если раньше главным местом приложения труда и градообразующими предприятиями в центральных районах городов были заводы и фабрики, сейчас это общественные центры и штаб-квартиры информационных корпораций, образующие огромные центры притяжения в виде Сити - крупных скоплений деловых зданий. Зачастую деловое пространство вмещает в себя не только офисы, но и торговые, развлекательные и образовательные зоны, открытые ландшафтно-рекреационные пространства, превращаясь в живой, практически независимый организм, город в городе. Всестороннее общение – это процесс взаимосвязи и взаимодействия, в котором происходит обмен деятельностью, информацией и опытом, предполагающим достижение определенного результата и решение конкретной проблемы. Несмотря на повсеместную распространенность ЛРП пространств, психологические особенности сотрудников и посетителей, а также инновационные процессы, происходящие внутри таких пространств, недостаточно изучены. Мало построить просто красивое ЛРП, важно спроектировать его так, чтобы привлечь туда креативных людей и удержать их в нем, создав интересные и выгодные условия, особую атмосферу, дух места. Для этого необходимо проанализировать поведенческие типы личности участников общественных процессов, формы взаимодействия между ними, понять, что же такое креативность, и от чего она зависит» [15].

На данный момент в архитектурной сфере деятельности становится возможным разработка основ эксперимента. При этом эксперимент, разделён на стадии: 1-я стадия – проверка разработанной модели, а затем (2-я стадия) проверка соответствия данной модели (подобной), модели исследуемого объекта, который является «памятью», успешного или неуспешного эксперимента. Афинская Хартия полагает, что все архитектурные произведения, подобны, и имеют три параметра, которые нормируются (производственные процессы, бытовые процессы, рекреационные процессы) и один ненормируемый (связи). Но это, другой аспект проблемы, соответствующий определению другой задачи. Задачи проведения количественной оценки или определения целевой функции. А для первой стадии ретроспективного эксперимента, важно, что в наличии все четыре процесса. Мы можем определить их качественное содержание, и если оно подтверждается, то мы можем делать выводы и принимать решение. Это есть начало первого эксперимента. Для архитектурных объектов различного иерархического уровня, начиная от районной планировки и заканчивая, например, индивидуальным жилым домом.

Выводы

1. Проверить соответствие (адекватность) разработанной модели анализируемому объекту на существующем этапе развития демозкологии возможно только методом ретроспективного анализа. Если теоретические результаты, полученные на модели, будут практически достаточно близки существующим (или существовавшим) характеристикам моделируемой системы, то теория, положенная в основу модели, работоспособна, а сама модель может быть применена как инструмент научного анализа при исследовании, проектировании и прогнозировании систем данного класса.

2. Ретроспективный анализ, основанный на теории системного эксперимента сложных многоуровневых объектов типа «население↔среда», наряду с другими принципами (законами) функционирования («поведения») экологических систем человека (населения), таких как принцип наименьшего действия (принцип Мопертьюри П.) являются одними из определяющих при создании и управлении функционированием архитектурных объектов как систем. Суть принципа наименьшего действия заключается в том, что в основу всех без исключения «живых» систем положено неизменное стремление к минимуму («необходимому и достаточному») расходу вещества, энергии и информации.

В процессе так называемого «научно-технического прогресса», человечество всё больше впадает в преступное непроизводительное потребление вещественного (материального) и энергетического потенциала планеты, т.е. налицо – расхищение накопленных и накапливаемых Природой жизненных для человечества ресурсов [16].

3. Единственный реально осуществимый путь успешного построения и управления жизнедеятельностью демозкосистем, как объекта архитектуры, это разработка функциональных моделей, адекватных реальным экологическим системам типа «население↔среда» с точностью до «С-изоморфизма» (системного изоморфизма). Таким образом, формулировка концепции проекта реконструкции ландшафтно-рекреационного пространства базируется на понимании пространства, как демозкосистемы, достижения эффективности, взаимосвязанной работой всех компонентов и протекающих процессов (производственных, бытовых, рекреационных и коммуникационных). Таким образом, достигается целостность ландшафтно-рекреационного пространства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Енин, А.Е., Общие принципы и методы реконструкции системы ландшафтно-рекреационных пространств города. // Наука и бизнес: пути развития. 2018. № 6 (84). С. 64-70.
2. Матлин, И.О. Анализ системы обслуживания // Сб.: Вопросы географии. – М., 1972. – С. 82-91.
3. Токарева, Г.Ш. Формирование и развитие городских узловых районов: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. архитектуры: 18.00.04 /– Москва, 1985. – 23 с.
4. Якшин, А.М. Графоаналитический метод в градостроительных исследованиях и проектировании. -М.: Стройиздат, 1979. – 204 с.
5. Лаврик, Г.И. Методологические основы районной планировки. Введение в демозкологию: учебник для вузов. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2006. - 113с.
6. Мастера советской архитектуры об архитектуре. Избранные отрывки из писем, статей, выступлений и трактатов. В 2-х т. под общ. ред. М.Г. Бархина [и др.]. Т.1. – М.: Искусство, 1975. – 544 с.
7. Perloff, H.S. The art of planning.– NY: Plenum Press, 1985. – 364 p
8. Tesler, E. Philosophy of systems. From primordial chaos to the future of humanity. NY: Vantage Press, 2000. – 384 p.
9. Fleischmann, M. Fractals in the natural sciences. New Jersey: Princeton University Press, 1990.– 200 p.
10. Исмаил, Х.Д.А. Фрактальные построения в композиции архитектурных объектов (на примере памятников исламской архитектуры): автореф. дис. на соискание ученой степени канд. архитектуры: 05.23.20 / Исмаил
11. Kim, T.J. Expert systems: applications to urban planning: Springer-Verlag, 1990. – 268 p.
12. Мерлен, П. Город. Количественные методы изучения. М.: Прогресс, 1977 – 262 с.
13. Стрельников, А.И. Программа определения потенциальной транспортной потребности по воздушным расстояниям. // Автоматизация проектирования городских транспортных систем. Вып. №4– М.: Стройиздат, 1977. – 105 с.
14. Закон Мура [Электронный ресурс] - Режим доступа:
https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%BD_%D0%9C%D1%83%D1%80%D0%B0
15. Салько А.В. , Инновационные методы формирования образовательной среды высших учебных заведений.//Архитектурные исследования, №2(10), 2017, с.22-34
16. Подолинский С.А. Труд человека и его отношение к распределению энергии: изд. 2-ое. М.: Белые Альвы, 2005. – 160 с.

REFERENCES

1. Yenin, A.E., General Principles and Methods of Reconstruction of the System of Landscape and Recreational Spaces of the City. *Science and Business: Ways of Development*. 2018. № 6 (84). S. 64-70.
2. Matlin, I.O. Analiz sistemy obsluzhdenii [Analysis of the service system]. *Voprosy geografii*. Moscow, 1972. P. 82-91.
3. Tokareva, G.Sh. Formation and Development of Urban Uzlovykh Districts: Avtoref. dis. for the degree of Cand. Architecture: 18.00.04. Moscow, 1985. 23 p. (rus)
4. Yakshin A.M., Govarenkova T.M. et al. – Moscow, Stroyizdat Publ., 1979. 204 p. (rus)

5. Lavrik, G.I. Metodologicheskie osnovy rayonnoy planirovaniye [Methodological foundations of district planning]. Introduction to Demoeology: Textbook for Higher Educational Institutions. *Belgorod: BSTU named after V.G. Shukhov*, 2006. – 113 p. (rus)
6. Masters of Soviet Architecture on Architecture. Selected Excerpts from Letters, Articles, Speeches and Treatises/ In 2 vols. M.G. Barkhina [et al.]. T.1. – Moscow, Iskusstvo Publ., 1975. – 544 p.
7. Perloff, H.S. The art of planning. H.S. NY: Plenum Press, 1985. – 364 p.
8. Tesler, E. Philosophy of systems. From primordial chaos to the future of humanity .NY: Vantage Press, 2000. – 384 p.
9. Fleischmann, M. Fractals in the natural sciences. M. New Jersey: Princeton University Press, 1990. – 200 p.
10. Ismail, H.D.A. Fraktale Konstruktionen in der Komposition architektonischer Objekte (am Beispiel von Denkmälern der islamischen Architektur): Avtoref. Dis. für den Grad der Cand. Architektur: 23.05.20.
11. Kim, T.J. Expertsystems: applicationstourbanplanning .NY: Springer-Verlag, 1990. – 268 p.
12. Merlin, P. Gorod. Quantitative Untersuchungsmethoden. PProgress Publ., 1977, 262 S.
13. Strelnikov A.I. Programm zur Ermittlung des potentiellen Transportbedarfs für Luftstrecken . *Automatisierung städtischer Verkehrssysteme*. Bd. Nr. 4 – Moskau, Stroyizdat Publ., 1977. – 105 p.
14. Moore's Law [Elektronnyi resurs] - Rezhim dostupa: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%BD_%D0%9C%D1%83%D1%80%D0%B0
15. Salko A.V. , Innovatsionnye metody formirovaniya obrazovatel'noy sredy vysshego uchebnykh uchebnykh [Innovative Methoden zur Bildung des Bildungsumfelds von Hochschuleinrichtungen]. *Architectural Research*, No. 2 (10), 2017, pp. 22-34
16. Podolinsky, S.A. Trud cheloveka i ego otnosheniya k rasrasdeleniyu energii: izd. 2. Belye Alvy Publ., 2005. 160 p. (rus)

Информация об авторах:

Енин Александр Егорович

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж, Россия
кандидат архитектуры, профессор, заведующий кафедрой основ проектирования и архитектурной графики.
e-mail: a_yenin@mail.ru

Грошева Татьяна Игоревна

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж, Россия
кандидат архитектуры, доцент кафедры основ проектирования и архитектурной графики.
e-mail: tfs007@mail.ru

Information about authors:

Enin Alexander E.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Voronezh State Technical University", Voronezh, Russia candidate of architecture, professor, head of the department of fundamentals of design and architectural graphics.
E-mail: a_yenin@mail.ru

Grosheva Tatyana I.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Voronezh State Technical University", Voronezh, Russia candidate of architecture, associate professor of the department of fundamentals of design and architectural graphics.
E-mail: tfs007@mail.ru

В.З. АБДРАХИМОВ¹, Д.В. АБДРАХИМОВ²

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЗОЛОШЛАКОВОЙ СМЕСИ НА СУШИЛЬНЫЕ СВОЙСТВА КЕРАМИЧЕСКОГО ОБРАЗЦА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА

^{1, 2}ФГБОУ ВО Самарский государственный экономический университет, г. Самара, Россия

Аннотация. Многочисленные исследования показали, что регулирование и стабилизация сушки, при которой количество влаги удаляется в пределах 70%, в керамических изделиях осуществляется в основном за счет введения в глинистые композиции различные отощители, которые увеличивают расстояния межмолекулярное воздействие между глинистыми частицами, вследствие чего удаляется механически примешанная вода. **Цель работы:** исследовать влияние золошлаковой смеси на показатели сушки: водопроводность, усадку и механическую прочность керамического образца на основе техногенного сырья цветной металлургии – ГЦИ (глинистой части «хвостов» гравитации циркон-ильменитовых руд) с использованием регрессивного метода анализа. **Постановка задачи.** С учетом ограниченного во многих регионах России наличия качественных сырьевых материалов для получения керамических образцов использовались отходы энергетики и цветной металлургии без применения природного традиционного сырья. Введение в керамическую композицию в качестве отощителя золошлаковой смеси, которая не имеет усадку, способствует более равномерному по всему образцу распределению влаги, а затем ее плавному удалению во время сушки изделия. Золошлаковую смесь необходимо вводить в керамические массы для сокращения усадки при сушке, повышения влаговодности, но необходимо при этом учесть, что снижается прочность высушенного образца при сжатии. Увеличение содержания золошлаковой смеси в керамических композициях уменьшает ее пластичность. Повышение содержания золошлаковой смеси до 32% снижает пластичность до 9. Такая пластичность при формовании полуфабрикатов способствует появлению на них трещин (снижается у глинистого компонента связующая способность, что не позволяет формовать образцы без дефектов). Оптимальными составами для эффективной сушки образцов являются составы, содержащие 20-24% золошлаковой смеси. В настоящей работе использовался регрессионный метод анализа, дающий возможность выбрать необходимые модельные уравнения, которые помогут определить керамические массы, обладающие эффективными свойствами и для прогнозирования результатов, не вошедших в эксперимент.

Ключевые слова: золошлаковая смесь, сушильные свойства, ГЦИ, керамический образец, регрессионный метод анализа.

V.Z. ABDRAKHIMOV¹, D.V. ABDRAKHIMOV²

STUDY OF INFLUENCE OF ASH-SLAG MIXTURE ON DRYING PROPERTIES OF CERAMIC SAMPLE USING REGRESSION ANALYSIS METHOD

^{1, 2}Samara State University of Economics, Samara, Russia

Abstract. Numerous studies have shown that control and stabilization of drying, in which the amount of moisture is removed within 70%, in ceramic products is mainly due to the introduction of various absorbers into clay compositions, which increase the intermolecular distance between clay particles, as a result of which mechanically mixed water is removed. **The purpose of the work:** to study the effect of ash and slag mixture on drying indicators: plumbing, shrinkage and mechanical strength of a ceramic sample based on technogenic raw materials of non-ferrous metallurgy - GZI (clay part of the "tails" of gravity of zircon-ilmenite ores) using a regressive analysis method.

Task statement. *Given the limited availability of high-quality raw materials in many regions of Russia, energy waste and non-ferrous metallurgy without the use of natural traditional raw materials were used to obtain ceramic samples. The inclusion of a non-shrinkable ash-slag mixture in the ceramic composition contributes to a more uniform distribution of moisture throughout the sample and then to its smooth removal during drying of the article. The ash and slag mixture must be added to the ceramic masses to reduce shrinkage during drying, increase moisture conductivity, but it must be borne in mind that the compression strength of the dried sample decreases. Increase of ash-slag mixture content in ceramic compositions reduces its plasticity. Increasing the content of ash and slag mixture to 32% reduces ductility to 9. Such plasticity in the formation of semi-finished products contributes to the appearance of cracks on them (the binding ability of the clay component decreases, which does not allow forming samples without defects). Optimal compositions for efficient drying of samples are those containing 20-24% ash and slag mixture. In this work, a regression analysis method was used, which makes it possible to select the necessary model equations that will help determine ceramic masses with effective properties and to predict results that were not included in the experiment.*

Keywords: *ash-slag mixture, drying properties, GZI, ceramic sample, regression analysis method.*

Введение

Сушке керамического кирпича на протяжении уже более 2000 лет эволюции керамической промышленности уделяется огромное влияние, так как сушка является первостепенным и одним из решающих этапов всего технологического процесса. При сушке из кирпича удаляется большая часть воды (остаточная вода, как правило, не должна превышать 5%) как приобретенная с сырьем, так и включенная для формования. По данным автора работы [1] влага удаляется при сушке в пределах 70%, а в процессе термообработки в интервале 1000-1050°C – оставшиеся 30%.

Исследования, проведенные в работе [2] показали, что в глинистых материалах с числом пластичности в пределах 12-15 необходимо для улучшения сушильных свойств использовать отошители в количестве от 10 до 15%, а при пластичности глинистого компонента с числом 18-20 можно использовать количество отошителей 20-25%. Основная задача отошителей – это улучшение основных технологических показателей глины благодаря снижению ее сушильной усадки, за счет уменьшения пластичности глинистого компонента. Использование отошителей позволит повысить производительность формовочного отделения кирпичного цеха, и заметно сократит необходимое время для сушки кирпича [3]. Чаще всего в качестве отошающего материала употребляются минеральные и частично сырьевые материалы органического происхождения.

Избрание или отбор отошающих сырьевых материалов целесообразно производить в зависимости от места нахождения керамического завода, причем желательно в непосредственной близости. Применение отошителя, находящегося вблизи завода позволит решать вопросы транспортно-логистической инфраструктуры, за счет сокращения расстояний при перевозке сырьевых материалов. К таким отошителям можно отнести отходы ТЭК (топливно-энергетический комплекс), в частности золошлаковые смеси, так как все ТЭС (теплоэнергетические станции) находятся либо в границе населенных пунктов, либо недалеко от них. Кроме того, сырьевые компоненты для выпуска керамических кирпичей, находящиеся недалеко от заводов, либо практически заканчиваются, либо становятся менее качественными, а золошлаковые смеси все еще остаются в настоящее время крупнотоннажными отходами, которые еще и наносят непоправимый вред экологии. Во многих научных трудах [4-9] показано, что продуктивная утилизация многотоннажных отходов ТЭК – это еще и эффективное решение многих экологических проблем.

Постановка задачи. С учетом ограниченного во многих регионах России содержания качественных сырьевых материалов для выпуска керамического кирпича требуется изыскать передовые способы по их замещению на техногенное сырье ТЭК, в частности на золошлаковые смеси и отходы цветной металлургии. Такие исследования, проведенные

авангардными государствами, показали техническую осуществимость такого развивающегося направления.

Цель работы: исследовать влияние золошлаковой смеси на основные показатели сушки: водопроводность, усадку и механическую прочность керамического образца на основе техногенного сырья цветной металлургии – ГЦИ (глинистой части «хвостов» гравитации циркон-ильменитовых руд) без применения природных традиционных материалов с использованием регрессивного метода анализа

Методы исследования и сырьевые материалы

Методы исследования. Исследования техногенного сырья ТЭК и цветной металлургии, используемых в качестве сырьевых материалов для изготовления кирпича, в настоящей работе осуществляли с использованием растрового электронного микроскопа JSM 6390A фирмы Jeol, Япония для получения поэлементного анализа и электронных фото (микроструктура). Для определения минералогического (минерального) состава применялись петрографические исследования на основе иммерсионных жидкостей, прозрачных шлифов и аншлифов под микроскопом МИН-8 и МИН-7.

Определения сушильных свойств: усадку, водопроводность и механическую прочность высушенного кирпича проводили как в работах [10-14].

Сырьевые материалы. Для исследования процессов сушки полуфабриката (высушенного керамического кирпича) в качестве сырьевых материалов были использованы: отход цветной металлургии - ГЦИ (глинистая часть «хвостов» гравитации циркон-ильменитовых руд) в роли пластичного компонента и золошлаковой смеси в роли отощителя и частично исполняющего роль выгорающей добавки. Химические оксидный и поэлементный составы техногенного сырья представлены в табл. 1 и табл. 2, фракционный состав в табл. 3, технологические показатели в табл. 4, минералогический состав на рис. 1, а микроструктура (электронное фото) на рис. 2

Таблица 1 – Усредненный оксидный химический состав техногенного сырья

Техногенное сырье	Содержание оксидов, мас. %						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	R ₂ O*	Δm _{прк} ** при 1000°C
ГЦИ	59,59	22,43	6,74	1,28	1,40	1,58	7,18
Золошлаковая смесь	50,27	18,21	5,55	7,81	1,78	4,21	12,17

Примечание R₂O*=K₂O+Na₂O; **Δm_{прк} - потери при прокаливании

Таблица 2 - Поэлементный состав техногенного сырья

Техногенное сырье	Содержание элементов, мас. %								
	C	O	Na	Mg	Al+Ti	Si	K	Ca	Fe
ГЦИ	2,18	51,26	0,38	0,54	15,45	24,8	0,32	0,2	4,87
Золошлаковая смесь	7,44	45,38	1,39	0,93	10,65	21,9	1,53	6,2	4,58

Таблица 3 –Фракционный состав техногенного сырья

Техногенное сырье	Содержание фракций в %, размер частиц в мм				
	>0,063	0,063-0,01	0,01-0,005	0,005-0,001	<0,001
ГЦИ	0,8	8,1	12,1	21,0	58
Золошлаковая смесь	14,4	32,2	35,8	12,4	5,2

Таблица 4 – Технологические показатели техногенного сырья

Техногенное сырье	Теплотворная способность, ккал/кг	Огнеупорность, °C		
		начало деформации	размягчение	жидкоплавкое состояние
1. ГЦИ	450	1490	1520	1580
2. Золошлаковая смесь	1800	1300	1300	1390

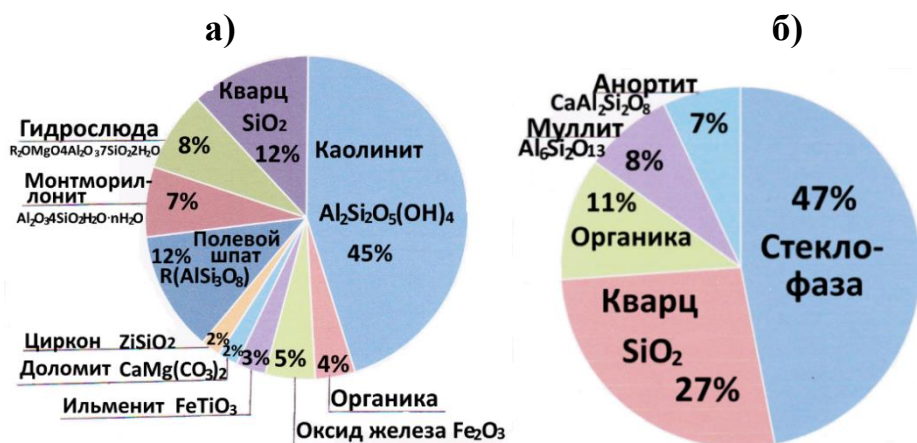


Рисунок 1 – Минералогический состав техногенного сырья:
а) – ГЦИ; б) золошлаковая смесь

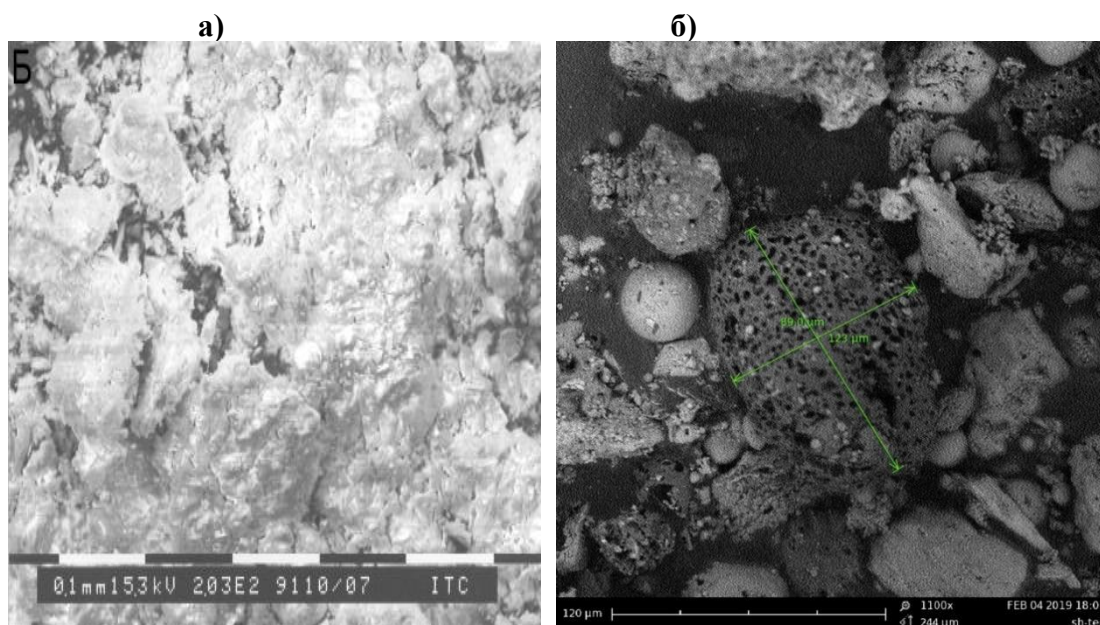


Рисунок 2- Микроструктура (электронное фото) техногенного сырья: а) ГЦИ; б- золошлакового сырья. Увеличение а) $\times 1000$; б) $\times 205$

Глинистый компонент (ГЦИ). ГЦИ применялась в качестве глинистого компонента с числом пластичности 18-20 после грохочения и дезинтеграции руды влажностью 37-45% в виде суспензии [15]. Цвет ГЦИ от розового до светло-желтого, плотность 2,36-2,42 г/см³ и, в отличие от природных традиционных глин, приобретает более гомогенные гранулометрические и химические составы, за счет образования ее микробавитационным способом. Основные свойства и показатели ГЦИ представлены в табл. 1-4 и рис. 1-2.

Золошлаковая смесь. Исследуемая золошлаковая смесь является техногенным сырьем гидроудаления ТЭС [5]. Основные свойства и показатели золошлаковой смеси представлены в табл. 1-4 и рис. 1-2.

Технология и получение керамического образца. Для получения керамических образцов, изучения влияния золошлаковой смеси на сушильные показатели и сравнительной

оценки этих показателей в зависимости от соотношения в керамической массе техногенных компонентов были исследованы составы, приведенные в табл. 5.

Таблица 5 - Составы керамических масс и их пластичность

Компонент	Содержание отходов, мас. %								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ГЦИ (X_1)	100	96	92	88	84	80	76	72	68
Золошлаковая смесь (X_2)	–	4	8	12	16	20	24	28	32
Пластичность, безразмерная единица	19	18	17	15	14	13	11	10	9

Основные показатели керамических образцов (усадка и механическая прочность) при сушке во многом зависят от пластичности используемого глинистого компонента.

По методикам, представленных в работах [16-18], для формования образцов техногенные сырьевые компоненты высушивались в сушильном шкафу при 100°C, затем перемалывали до прохода сквозь сито 1 мм. Сырьевую смесь, включающую ГЦИ и золошлак скрупулезно перемешивали увлажняли, затем через лабораторный ленточный пресс без мундштука пропускали дважды. Полученные композиции для гомогенизации в эксикаторе выдерживались при влажности W-20-26% в зависимости от содержания золошлака (от состава) в течение суток для формирования равномерной влажности

Образцы пластическим прессованием формовались на гидравлическом прессе с выходным отверстием $d = 1,5 \cdot 10^{-2}$ м. Такое формование, согласно работам [16-18] гарантировало, во-первых, тождественность для сравнения керамических масс, а во-вторых, плотность сформованных образцов приближало к плотности заводских полуфабрикатов $\rho = 1800-1850$ кг/м³. Из полученных стержней диаметром $d = 1,5 \cdot 10^{-2}$ м длиной $l = 7,0 \cdot 10^{-2}$ м вырезались образцы. Усадки и влагосодержания образцов различных составов были получены на специальной установке, как в работах [10, 19] и были занесены в табл. 6.

Таблица 6 - Физико-механические показатели образцов при сушке

Показатель	Составы								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
(Y_1). Усадка после сушке, %	5,8	5,5	5,3	4,7	4,1	3,8	3,5	3,2	2,5
(Y_2). Водопроводность, м ² /час•10 ⁻⁴	1,80	1,90	2,00	2,10	2,30	2,80	3,10	3,60	4,10
(Y_3). Механическая прочность высушенного сырца до остаточной влажности 5%, при сжатии, МПа	9,4	9,2	8,8	8,2	7,6	6,8	5,5	4,3	3,1

Регрессионный анализ

Регрессионный метод дает возможность приобрести знания о ранее неизвестных взаимоотношениях и закономерностях и выбрать необходимые модельные уравнения, которые помогут определить керамические массы, обладающие эффективными свойствами [20, 21]. Используемый метод был разделен на три этапа:

на первом этапе анализировалось влияние отношения содержания золошлаковой смеси (X_2) на усадку после сушки (Y_1);

на втором этапе анализировалось влияние отношения содержания золошлаковой смеси (X_2) на водопроводность после сушки (Y_2);

на третьем этапе анализировалось влияние отношения содержания золошлаковой смеси (X_2) на механическая прочность высушенного сырца до остаточной влажности 5%, при сжатии (Y_3).

В табл. 7 представлены значения величин регрессионного анализа показателей при

сушке для трех этапов.

Таблица 7 – Значения величин регрессионного анализа показателей при сушке

Значение	Для уравнения регрессии по:		
	Усадка после сушке, (Y ₇), %.	Водопродонность, м ² /час•10 ⁻⁴ , (Y ₈).	Механическая прочность высушенного сырца, МПа (Y ₉).
Значение коэффициента b ₀	-4,4336	8,728	-9,969
Значение коэффициента b ₁	0,1037	-0,07265	0,2021
Значение коэффициента b ₂	-0,5	-0,0625	0,5
Средняя ошибка аппроксимации A%	236,75	34,34	163,43
Значение стандартной ошибки регрессии S	11,679	1,483	11,693
Значение коэффициента детерминации R ²	-79,0776	-1,4627	-19,2923
F-наблюдаемое значение	-2,963	-1,782	-2,852

Для нахождения уравнения регрессии применили метод наименьших квадратов [20, 21].

$$Y = b_0 + b_1X + b_2X_2, \quad (1)$$

Для усадки после сушки:

$$Y_1 = -4,4336 + 0,1037X_1 - 0,5X_2, \quad (2)$$

Для водопродонности:

$$Y_2 = 8,728 - 0,07265X_1 - 0,0625X_2, \quad (3)$$

Для механической прочности высушенного сырца до остаточной влажности 5%, при сжатии:

$$Y_3 = -9,969 + 0,2021X_1 + 0,5X_2, \quad (4)$$

Графики полученных зависимостей по экспериментальным данным представлены на рис. 3-5.

Анализ модельных графиков полезен как при уточнении диапазонов состояния между опытами, так и для прогнозирования результатов, не вошедших в эксперимент.



Рисунок 3 – Зависимость усадки после сушке от содержания золошлаковой смеси

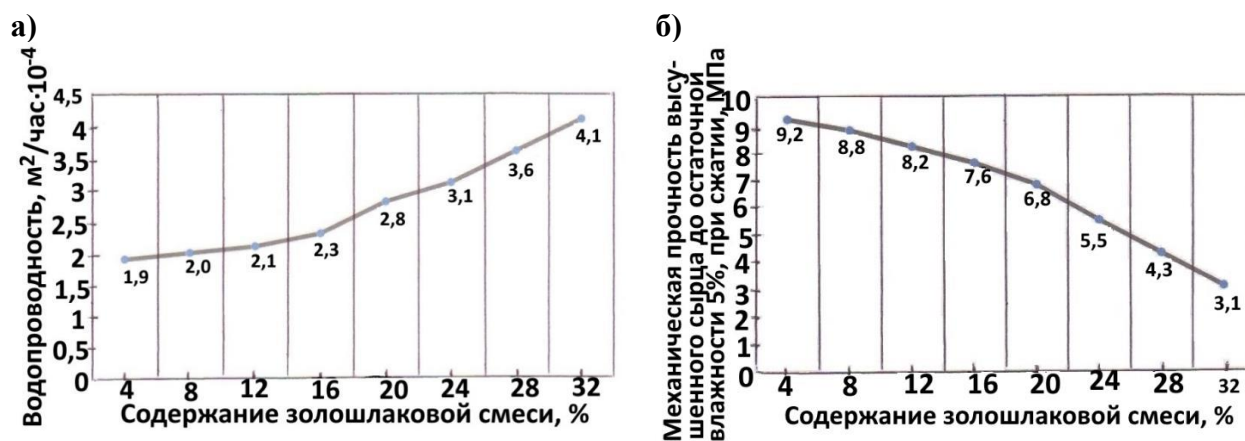


Рисунок 4 – Зависимость водопроницаемости от содержания золошлаковой смеси (а); зависимость механической прочности высушенного сырья до остаточной влажности 5%, при сжатии от содержания золошлаковой смеси (б)

Результаты обсуждения

Многочисленные исследования [10, 16, 17, 19] показывают, что регулирование и стабилизация сушки керамических изделий осуществляется в основном введением в глинистые композиции различных отощителей, которые увеличивают расстояния межмолекулярного воздействия между глинистыми частицами, вследствие чего удаляется механически примешанная вода.

Высушить керамический кирпич из глинистого материала, содержащего монтмориллонит (ГЦИ, рис. 1) без отощителей очень сложно, так монтмориллонит обладает наибольшей влагоемкостью по отношению к другим глинистым материалам. Водопроницаемость (влагопроницаемость) глинистых материалов показывает интенсивность передислокации внутри глинистой композиции влаги. Количественным показателем характеризующим глинистую композицию по влагопроницаемости служит коэффициент потенциала переноса влаги, который в некоторых случаях теории сушки называют коэффициентом потенциалопроводности, который для различных глин в зависимости от минерального состава находится в пределах $0,65\text{--}2,15 \text{ м}^2/\text{час} \cdot 10^{-4}$.

Влагоемкость монтмориллонита — это способность глинистого сырьевого компонента вмещать в себя повышенное количество воды и удерживать ее вопреки действию силы тяжести. Сорбционная способность у монтмориллонита среди глин самая высокая, поэтому водопроницаемость у состава №1 низкая (рис. 4а). У глин, содержащих в основном монтмориллонит влагопроницаемость в 10-15 раз меньше, чем у глин каолинитовых, так как монтмориллонит в наибольшей степени прочно связывает воду в силу особенностей его строения.

Отощитель, в качестве которого в настоящей работе использовалась золошлаковая смесь, практически не имеющая усадку, поэтому ее вводят в керамические массы для сокращения усадки при сушке (рис. 3), повышения влагопроницаемости (рис. 4а), но при этом снижается прочность при сжатии (рис. 4б). Введение золошлаковой смеси способствует более равномерному по всему образцу распределению влаги и ее удалению во время сушки, что положительно сказывается на процессах формования и сушке керамических изделий. Кроме того, как показывают работы [10, 11, 13], отощитель формирует структуру черепка и создает каркас при обжиге.

Увеличение содержания в керамических композициях золошлаковой смеси уменьшает пластичность (табл. 4б). Повышение содержания золошлаковой смеси до 32% снижает пластичность до 9. Такая пластичность при формовании полуфабрикатов способствует появлению на них трещин (снижается у глинистого компонента связующая способность, что

не позволяет формировать образцы без брака). В работах [10, 11] было показано, что оптимальным числом пластичности для получения керамических образцов без трещин и других дефектов можно считать число пластичности 11-13.

Таким образом, к оптимальным составам следует отнести составы №6-7, у которых образцы имеют оптимальные усадку, теплопроводность и прочность, при которой на изделиях не появляются трещины.

Выводы

1. Введение в керамическую композицию в качестве отощителя золошлаковую смесь, которая не имеет усадку, способствует более равномерному по всему образцу распределению влаги и ее удалению во время сушки полуфабриката, что положительно сказывается на процессах формования и сушки керамических изделий.

2. Золошлаковую смесь необходимо вводить в керамические массы для сокращения усадки при сушке (рис. 3), повышения теплопроводности, но необходимо учесть, что при этом снижается прочность при сжатии.

3. Увеличение содержания в керамических композициях золошлаковой смеси уменьшает пластичность. Повышение содержания золошлаковой смеси до 32% снижает пластичность до 9. Такая пластичность при формовании полуфабрикатов способствует появлению на таких образцах трещин (снижается у глинистого компонента связующая способность, что не позволяет формировать образцы без брака). Оптимальными составами для эффективной сушки являются составы, содержащие 20-24% золошлаковой смеси.

4. В настоящей работе использовался регрессионный метод анализа, дающий возможность приобрести знания о ранее неизвестных взаимоотношениях и закономерностях и выбрать необходимые модельные уравнения, которые помогут определить керамические массы, обладающие эффективными свойствами и для прогнозирования результатов, не вошедших в эксперимент.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баскаков С.В. Сушка кирпича. М.: Издательство литературы по строительству, 1966. 175 с.
2. Абдрахимов В.З. Получение керамических стеновых материалов на основе монтмориллонитовой глины и «хвостов» обогащения полиметаллических руд // Строительство и реконструкция. 2022. №4 С. 132-138. DOI: [10.33979/2073-7416-2022-102-4-132-138](https://doi.org/10.33979/2073-7416-2022-102-4-132-138)
3. Волочко А.Т., Подболотов К.Б., Хорт Н.А., Манак П.И. Влияние комплексных видов отощителей и цветонесущего сырья на свойство изделий строительной керамики // Вестник полоцкого государственного университета. Серия Ф. Строительство. Прикладные науки. 2020. №16. С. 42-46.
4. Абдрахимов В.З., Абдрахимова Е.С. Использование в производстве жаростойких бетонах алюмосодержащего нанотехногенного сырья и отходов углеобогащения // Строительство и реконструкция. 2021. №1. С. 96-105. DOI: [10.33979/2073-7416-2021-93-1-96-105](https://doi.org/10.33979/2073-7416-2021-93-1-96-105)
5. Абдрахимов В.З. Использование золошлакового материала и нанотехногенного карбонатного шлама в производстве кирпича на основе бейделлитовой глины // Строительство и реконструкция. 2019. №2. С. 81-89.
6. Столбоушкин А.Ю., Иванов А.И., Бердов Г.И., Сыромьясов В.А., Дружинин М.С. Влияние вещественного состава заполнителя из отходов сжигания топлива на формирование ячеистой структуры газозолобетона // Строительные материалы. 2014. №12. С. 42-44.
7. Кожухова Н.И., Жерновский И.В., Фомина Е.В. Фазообразование в геополимерных системах на основе золы-уноса Апатитской ТЭЦ // Строительные материалы. 2015. №12. С. 85-87
8. Ахмедьянов А.У., Киргизбаева К.Ж., Туреханова Г.И. Вторичная переработка отходов (золошлаков) промышленных предприятий // Технические науки. Горное дело. 2018. №10. С. 8-11.
9. Досмухамедов Н.К., Калан В.А., Дареуш Г.С. Инновационная технология комплексной переработки золы от сжигания угля // Уголь 2020. №1. С. 58-62.

10. Сайбулатов С.Ж., Сулейменов С.Т., Ралко А.В. Золокерамические стеновые материалы. Алма-Ата. Наука. – 1982, С 292.
11. Сулейменов С.Т. Физико-химические процессы структурообразования в строительных материалах и минеральных отходов промышленности –М: Моноскрип – 1996. 298 с.
12. Шмитко Е. И., Суслов А. А., Усачев А. М. Новый способ повышения эффективности процессов сушки керамических изделий // Строительные материалы. 2006. №5. С 20-22.
13. Горгодзе Г.А. Исследование фактора, влияющего на сушильные свойства керамического кирпича // Альманах современной науки и образования. 2009. №6. С. 49-52.
14. Дятлов Е.М., Бирюк В.А. Химическая технология керамики и огнеупоров. Лабораторный практикум. Минск: БГТУ, 2006. 275 с.
15. Kairakbaev A.K., Abdrakhimova E.S., Abdrakhimov V.Z. Use of Nonferrous Metallurgy Waste: Clayey Portion of the Zircon-Illmenite Ore Gravity Tailings and Pyrite Cinders in Tile-Making // Materials Science Forum. Trans Tech Publications Ltd, Switzerland. 2020. Vol. 989. pp 47-53.
16. Сайбулатов С.Ж. Исследование реологических свойств и напряженного состояния золокерамических масс в процессе сушки // Промышленная теплотехника. 1982. Т.2. №3. С. 62-65.
17. Абдрахимова Е.С. Исследование упруго-пластично-вязких показателей, водопроводности и усадочных свойств глинистых материалов различного химико-минералогического состава // Новые огнеупоры. 2004. С. 45-50.
18. Шмитко Е. И., Суслов А. А., Усачев А. М., Афанасьева С. Н. Оценка влагоемкостных характеристик материалов-подложек для контактно-диффузионного способа сушки изделий // Высокие технологии в экологии труды 9 международной учебно-практической конференции. Воронеж, 2006. С 141-145.
19. Сайбулатов С.Ж. Исследование влияния состава зол на фазовые превращения в золокерамике. С.Ж. Сайбулатов. // Комплексное использование минерального сырья. 1985 №11. С 78-81с.
20. Лысенко А.А. Введение в регрессионный анализ данных и регрессионные модели // Неделя науки Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2020. Т. 1. №3-1. С. 93-95.
21. Кайракбаев А.К., Абдрахимова Е.С., Абдрахимов В.З. Исследование регрессивным методом влияния содержания отходов при нефтедобыче и нефтехимии на физико-механические показатели керамического кирпича // Материаловедение 2017. №6. С. 31-35.

REFERENCES

1. Baskakov S.V. Drying bricks. M.: Publishing House of literature on construction, 1966. 175 p.
2. Abdrakhimov V.Z. Obtaining ceramic wall materials based on montmorillonite clay and "tails" of polymetallic ore enrichment // Construction and reconstruction. 2022. No.4 pp. 132-138. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-102-4-132-138
3. Volochko A.T., Podbolotov K.B., Hort N.A., Manak P.I. Influence of complex types of cleaners and color-bearing raw materials on the property of building ceramics products. *Bulletin of Polotsk State University. Series F. Construction. Applied sciences*. 2020. No.16. pp. 42-46. (rus)
4. Abdrakhimov V.Z., Abdrakhimova E.S. The use of aluminum-containing nanotechnogenic raw materials and carbon enrichment waste in the production of heat-resistant concrete/ *Construction and reconstruction*. 2021. No. 1. pp. 96-105. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-93-1-96-105. (rus)
5. Abdrakhimov V.Z. The use of ash and slag material and nanotechnogenic carbonate sludge in the production of bricks based on beidellite clay. *Construction and reconstruction*. 2019. No.2. pp. 81-89. (rus)
6. Stolboushkin A.Yu., Ivanov A.I., Berdov G.I., Syromyasov V.A., Druzhinin M.S. The influence of the material composition of the filler from fuel combustion waste on the formation of the cellular structure of gas-reinforced concrete. *Building materials*. 2014. No.12. pp. 42-44. (rus)
7. Kozhukhova N.I., Zhernovsky I.V., Fomina E.V. Phase formation in geopolymer systems based on fly ash of Apatitskaya CHP. *Building materials*. 2015. No.12. pp. 85-87. (rus)
8. Akhmedianov A.U., Kirgizbaeva K.Zh., Turekhanova G.I. Recycling of waste (ash and slag) of industrial enterprises. *Technical Sciences. Mining*. 2018. No.10. pp. 8-11.
9. Dosmukhamedov N.K., Kalan V.A., Dareush G.S. Innovative technology of complex processing of ash from coal combustion. *Coal* 2020. No. 1. pp. 58-62. (rus)
10. Saibulatov S.Zh., Suleimenov S.T., Ralko A.V. Gold-ceramic wall materials. Alma-Ata. The science. - 1982, With 292.
11. Suleimenov S.T. Physico-chemical processes of structure formation in building materials and mineral wastes of industry –М: Моноскрип – 1996. 298 p.
12. Shmitko E. I., Suslov A. A., Usachev A.M. A new way to increase the efficiency of drying processes of ceramic products. *Building materials*. 2006. No.5. From 20-22. (rus)
13. Gorgodze G.A. Investigation of the factor influencing the drying properties of ceramic bricks. *Almanac of modern science and education*. 2009. No. 6. pp. 49-52.

14. Dyatlov E.M., Biryuk V.A. Chemical technology of ceramics and refractories. Laboratory workshop. Minsk: BSTU, 2006. 275 p.
15. Kairakbaev A.K., Abdrakhimova E.S., Abdrakhimov V.Z. Use of Nonferrous Metallurgy Waste: Clayey Portion of the Zircon-Ilmenite Ore Gravity Tailings and Pyrite Cinders in Tile-Making. *Materials Science Forum. Trans Tech Publications Ltd, Switzerland*. 2020. Vol. 989. pp 47-53.
16. Saibulatov S.Zh. Investigation of rheological properties and stress state of ash-ceramic masses in the drying process. *Industrial heat engineering*. 1982. Vol.2. No. 3. pp. 62-65.
17. Abdrakhimova E.S. Investigation of elastic-plastic-viscous parameters, water resistance and shrinkage properties of clay materials of various chemical and mineralogical composition. *New refractories*. 2004. pp. 45-50.
18. Shmitko E. I., Suslov A. A., Usachev A.M., Afanasyeva S. N. Evaluation of moisture-intensive characteristics of substrate materials for the contact-diffusion method of drying products. High technologies in ecology proceedings of the 9th international educational and practical conference. Voronezh, 2006. pp. 141-145.
19. Saibulatov S.Zh. Investigation of the effect of the composition of ash on phase transformations in gold ceramics. S.Zh. Saibulatov. Complex use of mineral raw materials. 1985 No.11. P. 78-81c.
20. Lysenko A.A. Introduction to regression analysis of data and regression models. Science Week of St. Petersburg State Maritime Technical University. 2020. Vol. 1. No.3-1. pp. 93-95.
21. Kairakbaev A.K., Abdrakhimova E.S., Abdrakhimov V.Z. Investigation by a regressive method of the influence of waste content in oil production and petrochemistry on the physical and mechanical parameters of ceramic bricks. *Materials Science* 2017. No. 6. pp. 31-35.

Сведения об авторах

Абдрахимов Владимир Закирович

доктор технических наук, профессор (профессор кафедры «Землеустройство и экология»), почетный работник высшего и профессионального образования, заслуженный работник высшего профессионального образования Самарской области.

e-mail: 3375892@mail.ru

Абдрахимов Дмитрий Владимирович,

студент Самарского государственного экономического университета,

e-mail: 3375892@mail.ru

Information about the authors

Abdrakhimov Vladimir Zakirovich,

Doctor of Technical Sciences, Professor (Professor of the Department "Land Management and Ecology"), honorary worker of higher and professional education, honored worker of higher professional Education of the Samara region.

e-mail: 3375892@mail.ru

Abdrakhimov Dmitry Vladimirovich,

student of Samara State University of Economics,

e-mail: 3375892@mail.ru

А.И. РОДИН¹, А.А. ЕРМАКОВ¹, В.М. КЯШКИН¹, А.М. АСТАШОВ¹, Д.А. БУЯНКИН¹¹Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва,
г. Саранск, Россия

ПОРИСТАЯ СТЕКЛОКЕРАМИКА ИЗ ОПОКИ, КАЛЬЦИНИРОВАННОЙ СОДЫ И КОРРЕКТИРУЮЩИХ ДОБАВОК

Аннотация. Пеностекло и вспененные стеклокерамические материалы обладают целым рядом уникальных свойств. Они химически стойкие, легкие, прочные, не горят, плохо пропускают тепло и звук и т.д. Их применяют как в частном строительстве, так и при возведении особо ответственных объектов. В статье подтверждена возможность использования опоки в качестве сырья для получения пористой стеклокерамики (ПСК) за один нагрев шихты методом порошкового вспенивания. Опоку, кальцинированную соду и корректирующие добавки (мел, глина) размалывали совместно в сухом состоянии, засыпали в жаростойкие формы и обжигали. Установлены температурные интервалы спекания и вспенивания шихты на основе опоки, влияние добавок на макроструктуру и свойства пористой стеклокерамики. Результаты получены методами термического анализа (ТА), рентгенофазового анализа (РФА) и др. Мел и глина в составе шихты оказывают существенное влияние на температуру ее спекания и вспенивание при нагревании, а также фазовый состав образцов ПСК. В результате получены образцы с мелкопористой структурой в форме блоков размером 500×500×200 мм со средней плотностью от 190 кг/м³ до 1535 кг/м³, прочностью при сжатии от 2 МПа до 116 МПа и с коэффициентом теплопроводности от 0,06 Вт/м·°С до 0,61 Вт/м·°С. Пористая стеклокерамика на основе опок, кальцинированной соды и корректирующих добавок (мел, глина) по физико-механическим и теплофизическим свойствам превосходит многие аналоги и может быть использована в качестве конструкционных, теплоизоляционных и других видов строительных материалов при строительстве, ремонте и реконструкции объектов различного назначения.

Ключевые слова: пористая стеклокерамика, кремнистые породы, опока, рентгеновофазовый анализ, макроструктура, физико-механические свойства, коэффициент теплопроводности.

A.I. RODIN¹, A.A. ERMAKOV¹, V.M. KYASHKIN¹, A.M. ASTASHOV¹,
D.A. BUYANKIN¹¹National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

POROUS GLASS CERAMICS FROM OPOKA, SODA ASH AND CORRECTIVE ADDITIVES

Abstract. Foam glass and foamed glass-ceramic materials have a number of unique properties. They are chemically resistant, light, durable, do not burn, do not transmit heat and sound well, etc. They are used both in private construction and in the construction of specially responsible facilities. The article confirms the possibility of using flask as a raw material for the production of porous glass ceramics (PSK) in one charge heating by powder foaming. Flask, soda ash and corrective additives (chalk, clay) were ground together in a dry state, poured into heat-resistant molds and fired. The temperature ranges of sintering and foaming of the charge based on the flask, the effect of additives on the macrostructure and properties of porous glass ceramics have been established. The results were obtained by thermal analysis (TA), X-ray phase analysis (XFA), etc. Chalk and clay in the composition of the charge have a significant effect on the temperature of its sintering and foaming during heating, as well as the phase composition of the UCS samples. As a result, samples with a finely porous structure in the form of blocks of 500×500×200 mm in size with an average density from 190 kg/m³ to 1535 kg/m³, compressive strength from 2 MPa to 116 MPa and with a thermal conductivity coefficient from 0.06 W/m°C to 0.61 W/m°C.

Porous glass ceramics based on flasks, soda ash and corrective additives (chalk, clay) surpass many analogues in terms of physical, mechanical and thermal properties and can be used as structural, thermal insulation and other types of building materials during construction, repair and reconstruction of facilities for various purposes.

Keywords: porous glass ceramics, siliceous rocks, opoka, X-ray phase analysis, macrostructure, physical and mechanical properties, thermal conductivity coefficient.

Введение

Пеностекло и вспененные стеклокерамические материалы обладают целым рядом уникальных свойств. Они легкие, прочные, не горят, плохо пропускают тепло и звук, имеют высокую химическую стойкость и мн. др. [1]. Их используют при строительстве, реконструкции и ремонте стен зданий и сооружений, в частности в качестве утеплителя конструкций пола, кровли и фасада [1, 2]. Очень часто данные материалы используют при проведении отделочных работ [2]. В промышленности они хорошо себя зарекомендовали в качестве высокотемпературных теплоизоляционных [3], звукоизоляционных [4], антикоррозионных материалов [5] и др.

Большое количество научных исследований посвящено разработке составов и технологии получения пористой стеклокерамики из отходов различных производств: стекла [4, 6], черных и цветных металлов [2, 7], оксида алюминия [8], и мн. др. В отдельную группу строительных материалов можно отнести стеклокерамику из кремнистых пород (диатомит, трепел, опока) [9–11]. Способы получения пористых стеклокерамических материалов также разнообразны: порошковый метод [1], метод вспенивания суспензии [12] и др. Для формирования пористой структуры будущего стеклокерамического материала при таких способах производства в состав шихты добавляют вспенивающие компоненты: углеродсодержащие добавки [1, 13], карбонаты [14] и мн. др. Пористую стеклокерамику получают также из кремнистых пород. Диатомит или опоку размалывают, смешивают с щелочным раствором высокой концентрации, гранулируют, а затем обжигают во вращающихся печах [9, 10]. Вспенивающие компоненты при таком способе производства добавлять не требуется, так как они уже есть в составе породы или образуются в результате химической реакции с щелочным активатором. Известен способ получения пористой стеклокерамики в форме блока из цеолитсодержащих трепелов. Материалы получены за один нагрев шихты методом порошкового вспенивания [15–17]. Трепел, кальцинированную соду и корректирующие добавки размалывают совместно в сухом состоянии, засыпают в жаростойкие формы и обжигают при температуре до +850 °С. В результате получен экологичный, легкий, химически стойкий материал, который более чем в 2 раза прочнее газоз- и пенобетона при равной плотности. А температура его применения достигает +900 °С.

Анализируя данные химического и минералогического состава опок, а также сравнивая их с аналогичными показателями для цеолитсодержащих трепелов можно предположить, что данное сырье при незначительной корректировке состава пригодно для получения пористых стеклокерамических материалов в форме блока по порошковой технологии за один нагрев шихты. Свойства любого материала зависят от его состава и структуры. Стеклокерамические материалы не исключение. Известно, что плотность таких материалов находится в прямой зависимости от количества СаО в их составе [18]. Увеличить прочностные свойства стеклокерамики можно при увеличении в составе шихты количества Al_2O_3 или Fe_2O_3 [19, 20]. На максимальную температуру эксплуатации стеклокерамики оказывает негативное влияние целый ряд оксидов в ее составе Na_2O , Fe_2O_3 и СаО [19] и положительное – повышенное количество Al_2O_3 [19, 20]. Следовательно, чтобы получить пористую стеклокерамику из опок в качестве основных корректирующих добавок можно использовать карбонатные породы (мел, известняк) и различные глины. Результаты подобных исследований в литературе

отсутствуют. Следовательно, цель исследования: подтвердить возможность использования опоки в качестве сырья для получения пористой стеклокерамики за один нагрев шихты методом порошкового вспенивания. Задачи:

- установить температурные интервалы спекания и вспенивания, а также фазовые превращения при нагревании шихты на основе опоки, соды кальцинированной и корректирующих добавок (мел, глина);
- установить изменение фазового состава образцов от количества и вида вводимых в шихту добавок;
- установить влияние вида и количества корректирующих добавок на структуру и свойства пористой стеклокерамики.

Материалы и методы исследования

Для достижения поставленной цели экспериментальные исследования выполнены с использованием следующих компонентов: горные породы (опока, мел, глина), сода кальцинированная, хлорид калия. В таблице 1 и 2 представлен соответственно химический и минералогический состав пород.

Таблица 1 – Химический состав пород

Порода	Химический состав, % масс.										
	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	TiO ₂	Na ₂ O	SO ₃	BaO	ППП
Опока	89,7	0,5	3,8	1,1	0,8	0,5	0,2	0,1	-	-	3,3
Мел	5,7	52,0	1,3	0,6	0,2	0,4	0,1	0,1	-	-	39,6
Глина	57,4	0,6	20,4	6,3	1,1	2,4	0,7	2,5	0,2	0,1	8,3

Таблица 2 – Минералогический состав пород

Порода	Минералогический состав, % масс.				
	Кварц	Кальцит	Мусковит	ОКТ	Глинистые минералы
Опока	5,9	–	0,6	78,1	15,9
Мел	5,6	94,4	–	–	–
Глина	23,7	–	–	–	76,3

Использованная в работе кальцинированная сода >99 % состоит из основного вещества Na₂CO₃, а хлорид калия >97 % состоит из основного вещества KCl.

В ходе эксперимента были изготовлены и испытаны образцы 16 составов с разным содержанием горных пород. Составы приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Составы шихты

№ состава	Состав шихты, %				
	Опока	Мел	Глина	Na ₂ CO ₃	KCl
C1	80,8	–	–	19	0,2
C2	73,3	–	7,5		
C3	65,8	–	15		
C4	58,3	–	22,5		
C5	75,8	5	–		
C6	68,3	5	7,5		
C7	60,8	5	15		
C8	53,3	5	22,5		
C9	70,8	10	–		
C10	63,3	10	7,5		
C11	55,8	10	15		
C12	48,3	10	22,5		
C13	65,8	15	–		
C14	58,3	15	7,5		
C15	50,8	15	15		
C16	43,3	15	22,5		

Шихту готовили следующим способом: компоненты высушивали до влажности не более 2 %, дозировали (согласно таблице 3) и совместно размалывали. Размол осуществляли с использованием шаровой планетарной мельницы Retsch PM 400 (Германия) по режиму: частота вращения стаканов мельницы – 350 мин⁻¹, продолжительность – 30 мин.

Температурные интервалы спекания и вспенивания шихты на основе опоки, соды кальцинированной и корректирующих добавок определяли по следующей методике. На первом этапе из шихты массой 1,5 г под давлением 1 МПа прессовали образцы в форме цилиндра ($r=6\pm0,05$ мм). Затем их вертикально помещали в муфельную печь и нагревали со скоростью 2 °С/мин до заданной температуры. При заданной температуре образцы выдерживали в течении 10 мин. После их остывания вместе с печью до температуры не более 40 °С, сканировали их поверхность и определяли среднюю плотность. Эксперимент повторяли для каждого нового образца с увеличением заданной температуры на 20 °С. В ходе эксперимента испытано не менее 3 образцов для каждого состава в каждой температурной точке.

Влияние отдельных компонентов (мел, глина) в составе шихты на фазовые превращения в ней при нагревании установлено методом термического анализа (ТА). В алундовый тигель объёмом 70 мкл засыпали шихту массой $10\pm0,1$ мг. Тигель вместе с шихтой помещали в прибор TGA/DSC1 (Швейцария) и нагревали со скоростью 10 °С/мин от 30 до 850 °С. Прибор фиксировал изменение массы и температуры образца. Обработку полученных экспериментальных данных (кривые ДТА – дифференциально-термического анализа и ДТГ – дифференциальной термогравиметрии) выполняли с использованием программного обеспечения STARe (Mettler-Toledo, Швейцария).

Рентгенофазовый анализ (РФА) выполняли на измельченных до фракции менее 80 мкм образцах ПСК с помощью дифрактометра Empyrean PANalytical PIXcel3D (Нидерланды). Режим съемки: излучение – CuK α , угол поворота $2\theta=5-70^\circ$, скорость съемки – 0,0131°/минуту, время интеграции – 150 с. Определение фазового состава образцов выполнено методом Ханавальта на основании открытой базы данных по кристаллографии.

Кажущуюся плотность, прочность при сжатии и коэффициент теплопроводности пористой стеклокерамики определяли на образцах, выпиленных из блоков размером 500×500×200 мм по методикам, представленным в нашей предыдущей работе [15].

Результаты исследования и их анализ

Температурные интервалы спекания и вспенивания шихты при нагревании установлены по изменению средней плотности образцов в зависимости от температуры обжига (рисунок 1), а также методами термического анализа (ДТА и ДТГ).

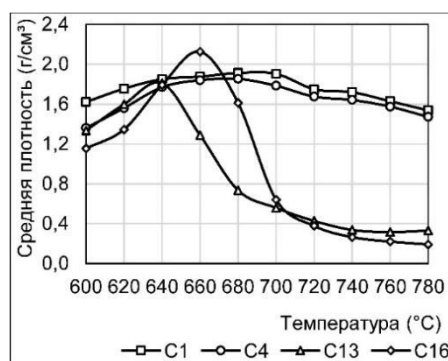


Рисунок 1 – Изменение средней плотности образцов в зависимости от температуры обжига (C1–C16 – номера составов)

Согласно данным (рисунок 1) установлено, что используемые добавки (мел, глина) в составе шихтовой смеси оказывают существенное влияние на процессы спекания и

вспенивания при ее нагревании. Шихта без корректирующих добавок (состав С1) плавно спекается при увеличении температуры обжига до $+690^{\circ}\text{C}$. Средняя плотность образцов увеличилась до $\approx 1920 \text{ кг/м}^3$. Дальнейшее увеличение температуры обжига до $+780^{\circ}\text{C}$ привело к снижению средней плотности образцов до $\approx 1540 \text{ кг/м}^3$, что свидетельствует о ее медленном вспенивании. При увеличении в составе шихты количества мела до 15 % (состав С13) процесс спекания образцов заканчивается при температуре $+640^{\circ}\text{C}$ и начинается их вспенивание. С увеличением количества мела в шихте интенсивность вспенивания увеличивается и завершается при температуре $+700^{\circ}\text{C}$. Средняя плотность вспененных образцов с максимальным количеством мела (15 %) уменьшилась до $\approx 330 \text{ кг/м}^3$. Основное влияние глины в составе шихты совместно с мелом при ее нагревании связано со смещением завершения процесса спекания и начала вспенивания образцов в сторону больших температур. При увеличении в состав шихты глины в количестве до 22,5 % шихта завершает спекаться и начинает вспениваться при температуре $+660^{\circ}\text{C}$. Средняя плотность вспененных образцов с максимальным количеством мела (15 %) и глины (22,5 %) уменьшилась до $\approx 200 \text{ кг/м}^3$.

Полученные термограммы образцов шихты приведены на рисунке 2.

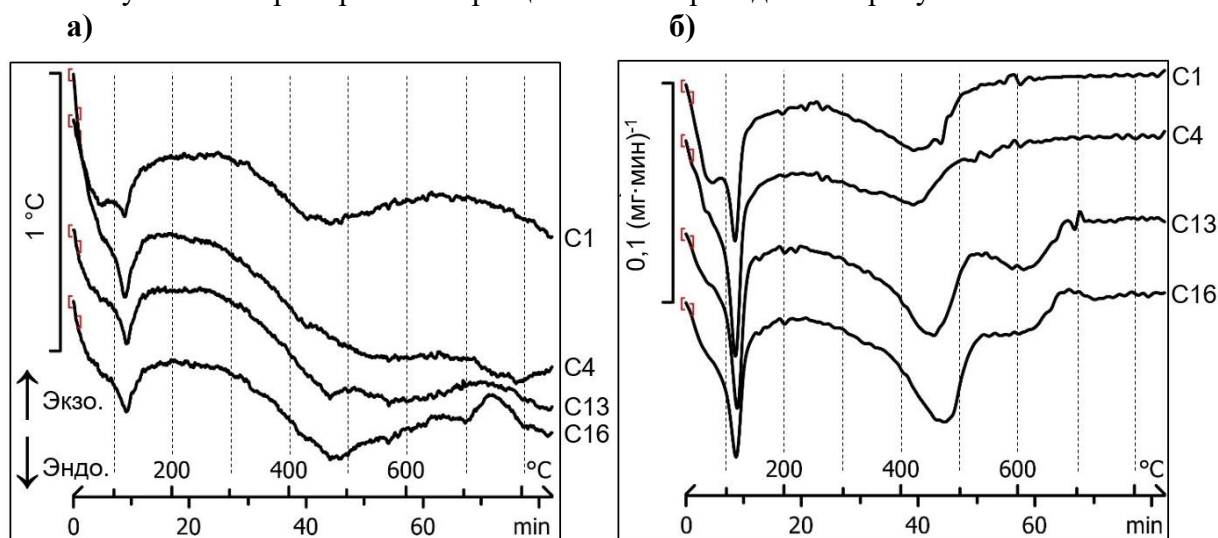


Рисунок 2 – ДТА (а) и ДТГ (б) образцов шихты
(C1–C16 – номера составов)

Согласно данным рисунка 2, корректирующие добавки мел и глина оказывают существенное влияние на фазовые превращения в шихте при нагревании. Первый эндотермический эффект на ДТА кривых (рисунок 2,а) и потеря массы на ДТГ кривых (рисунок 2,б) всех испытанных образцов при температуре с максимумом $\approx +120^{\circ}\text{C}$, связаны с разложением образовавшегося после помола шихты минерала вепшайдерита [16]. Количество данного минерала увеличивается при увеличении в составе шихты добавок. Из литературы известно, что в данной области температур у шихты для стеклокерамики из кремнеземсодержащих пород разлагаются также гидросиликаты натрия [10]. Декарбонизация кальцинированной соды и дегидратация некоторых глинистых минералов из состава шихты начинается при температуре от $\approx +240^{\circ}\text{C}$ и завершается до $\approx +520^{\circ}\text{C}$, о чем свидетельствует эндотермический эффект и потеря массы у образцов на кривых ДТА и ДТГ соответственно. Декарбонизация кальцита и дегидратация оставшихся глинистых минералов в образцах происходит при температуре от $\approx +520^{\circ}\text{C}$ до $\approx +670^{\circ}\text{C}$ (незначительный эндоэффект и достаточно большая потеря массы на рисунке 3). При увеличении в составе шихты глины при постоянном количестве кальцита потеря массы у образцов в данной области температур уменьшается, что, вероятно, связано со смещением температуры разложения кальцита в область меньших температур. Увеличивая температуру обжига шихты больше $+670^{\circ}\text{C}$, масса образцов уже не изменяется, а их температура сначала резко уменьшается (образцы

размягчаются), а затем увеличивается (образцы вспениваются). По интенсивности увеличения температуры образцов можно судить о скорости их вспенивания. Максимальная скорость вспенивания у образцов шихты с максимальным количеством добавок (мел – 15 % и глина – 22,5 %). Полученные данные согласуются с результатами, представленными на рисунке 1, и коррелируются с результатами проведенных нами ранее, в которых в качестве сырья для стеклокерамических материалов вместо опоки использовали цеолитсодержащие трепелы [15–17].

Рентгенофазовый анализ образцов ПСК. На рисунке 3 представлены результаты рентгенофазового анализа образцов пористой стеклокерамики после обжига при температуре +780 °С.

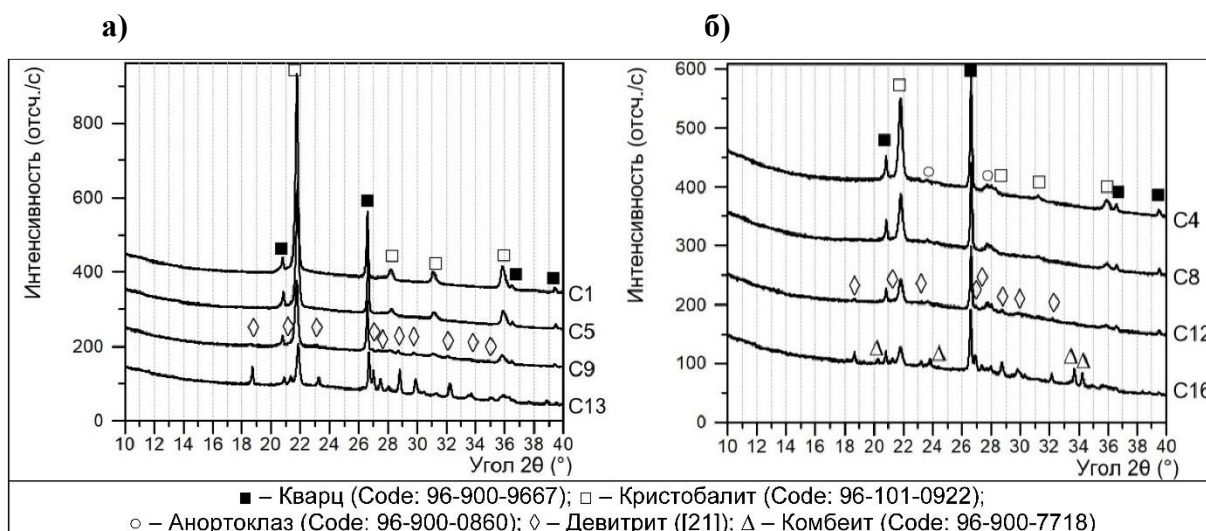


Рисунок 3 – РФА образцов ПСК из шихты с добавкой глины: (а) – 0 %; (б) – 22,5 % (C1–C16 – номера составов)

Согласно полученным данным (рисунок 3), все образцы ПСК состоят из аморфной и кристаллической фазы. Плавное повышение фона на всех рентгенограммах от 15° до 37° (2θ) свидетельствует о наличии аморфной фазы. Установлено влияние химического и минералогического состава шихты на изменение ее количественного содержания в стеклокерамике. Количество аморфной фазы незначительно увеличивается с увеличением в составе шихты добавок (мел, глина).

Кристаллическая фаза образцов без корректирующих добавок (C1) состоит из кристобалита (SiO_2) и кварца (SiO_2). При добавлении в состав шихты глины в количестве до 22,5 %, появляется новая фаза – анортоклаз ($(\text{Na}_{0.85}\text{K}_{0.15})(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$) и уменьшается количество кристобалита. При введении в состав шихты мела в количестве 10 % и более, в образцах пористой стеклокерамики появляется девитрит ($\text{Na}_2\text{Ca}_3\text{Si}_6\text{O}_{16}$) [21], количество которого уменьшается при увеличении в составе шихты глины. При одновременном добавлении мела и глины в состав шихтовой смеси в количестве не менее 15 % каждого в стеклокерамике вместо девитрита начинает кристаллизоваться минерал комбеит ($\text{Na}_2\text{Ca}_2\text{Si}_3\text{O}_9$), что связано с нехваткой в составе шихты реакционного SiO_2 . Аналогичные данные получены нами и ранее на сырье из цеолитсодержащих трепелов [17].

Макроструктура и свойства образцов ПСК. Для наглядного подтверждения влияния добавок (мел, глина) в составе шихты на изменение макроструктуры образцов стеклокерамических материалов выполнено сканирование их поверхности. На рисунке 4 представлены результаты сканирования.

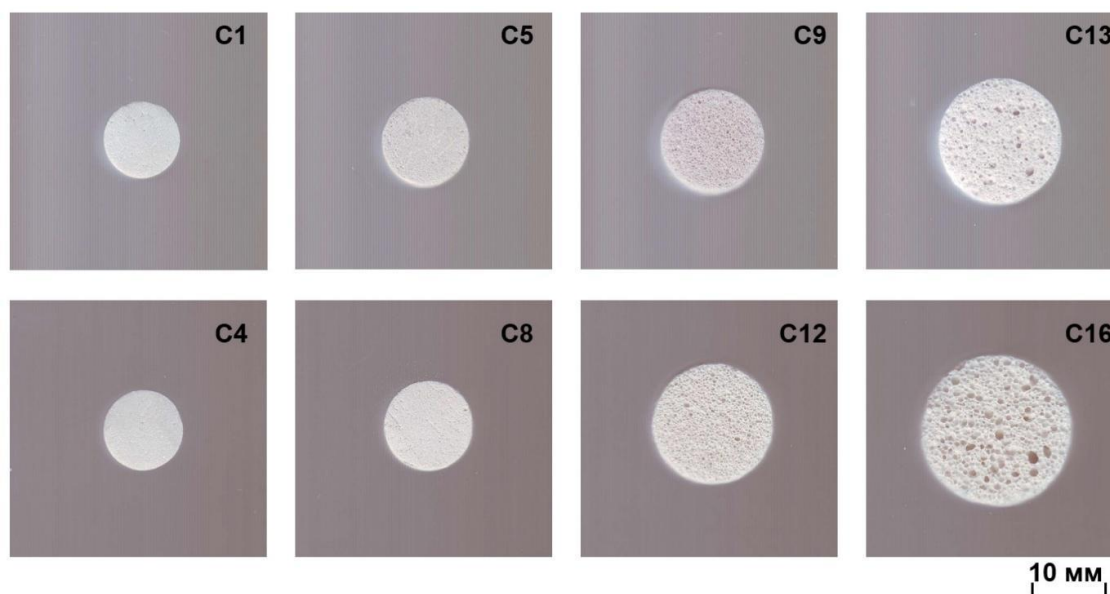


Рисунок 4 – Результаты сканирования образцов ПСК
(C1–C16 – номера составов)

Согласно данным рисунка 4, при увеличении количества мела в составе шихты до 15 % диаметр пор в стеклокерамике увеличился до 1 мм и как следствие уменьшилась средняя плотность образцов. При увеличении количества глины в составе шихты до 22,5 % (нижний ряд) диаметр пор в образцах стеклокерамики дополнительно увеличился, а их средняя плотность уменьшилась еще больше. Образцы с максимальным содержанием мела (C13, C16) имеют неравномерную макроструктуру по всей площади поверхности, что, вероятно, связано с избыточным его количеством, остатки которого в процессе декарбонизации выделяют углекислый газ, дополнительно вспенивающий шихту. Полученные данные согласуются с данными рисунка 1.

Основные физико-механические и теплофизические свойства образцов пористой стеклокерамики из опоки и кальцинированной соды с добавками (мел, глина) приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Свойства образцов ПСК

№ состава	Свойства		
	Средняя плотность, кг/м ³	Прочность при сжатии, МПа	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·°С
C1	1535	116	0,61
C4	1470	97,8	0,58
C13	330	4,6	0,085
C16	190	2	0,06

Вид и количество корректирующих добавок (мел, глина) в составе шихты оказывают существенное влияние на среднюю плотность образцов пористой стеклокерамики. При раздельном добавлении в состав шихты глины до 22,5 % и мела в количестве до 15 % средняя плотность образцов стеклокерамики уменьшилась с 1535 кг/м³ до 1470 кг/м³ и 330 кг/м³ соответственно. При совместном введении в состав шихтовой смеси 15 % мела и 22,5 % глины средняя плотность образцов стеклокерамики уменьшилась до 190 кг/м³. Известно, что прочность при сжатии, а также коэффициент теплопроводности образцов пористой стеклокерамики находятся в линейной зависимости от их кажущейся плотности [15, 17]. В рамках представленной работы данная закономерность не устанавливалась. Прочность при сжатии образцов пористой стеклокерамики с кажущейся плотностью 1535 кг/м³ (C1) – 116 МПа, коэффициент теплопроводности – 0,61 Вт/м·°С. У образцов C16 с наименьшей кажущейся плотностью 190 кг/м³ прочность при сжатии составила 2 МПа, коэффициент

теплопроводности 0,06 Вт/м·°С. По физико-механическим и теплофизическим свойствам разработанная пористая стеклокерамика из опоки с добавками мела и глины превосходит многие аналоги [9, 11, 22–24].

Выводы

1. Подтверждена возможность использования опоки в качестве сырья для получения пористой стеклокерамики за один нагрев шихты методом порошкового вспенивания. Опоку, кальцинированную соду и корректирующие добавки (мел, глина) размалывали совместно в сухом состоянии, засыпали в жаростойкие формы и обжигали. В результате получены образцы с мелкопористой структурой в форме блоков размером 500×500×200 мм со средней плотностью от 190 кг/м³ до 1535 кг/м³, прочностью при сжатии от 2 МПа до 116 МПа и с коэффициентом теплопроводности от 0,06 Вт/м·°С до 0,61 Вт/м·°С.

2. Установлено влияние вида и количества корректирующих добавок (мел, глина) на температурные интервалы спекания и вспенивания шихты и фазовые превращения в ней при нагревании. При увеличении в составе шихты количества мела до 15 % процесс спекания образцов заканчивается при температуре +640 °С, а при температуре +700 °С завершается их интенсивное вспенивание. Основное влияние глины (до 22,5 %) в составе шихты совместно с мелом при ее нагревании связано со смещением процесса спекания и начала вспенивания образцов в сторону больших температур.

3. Образцы пористой стеклокерамики на основе опоки, кальцинированной соды и корректирующих добавок (мел, глина) состоят из аморфной и кристаллической фазы. Количество аморфной фазы незначительно увеличивается с увеличением в составе шихты добавок. Основной кристаллической фазой в образцах без добавок является кристобалит и кварц. При введении в состав шихты глины (до 22,5 %) уменьшается количество кристобалита и увеличивается количество анортотклаза. В образцах из шихты с мелом (10–15 %) основной кристаллической фазой является диветрит, а с мелом (15 %) и глиной (22,5 %) – комбеит.

4. Пористая стеклокерамика на основе опок, кальцинированной соды и корректирующих добавок (мел, глина) по физико-механическим и теплофизическим свойствам превосходит многие аналоги и может быть использована в качестве конструкционных, теплоизоляционных и других видов строительных материалов при строительстве, ремонте и реконструкции объектов различного назначения.

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-79-10422).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. König J., Lopez-Gil A., Cimavilla-Roman P., Rodriguez-Perez M.A., Petersen R.R., Østergaard M.B., Iversen N., Yue Y., Spreitzer M. Synthesis and properties of open- and closed-porous foamed glass with a low density // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 247. 118574. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2020.118574](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118574)
2. Cao J., Lu J., Jiang L., Wang Z. Sinterability, microstructure and compressive strength of porous glass-ceramics from metallurgical silicon slag and waste glass // *Ceramics International*. 2016. Vol. 42(8). Pp. 10079–10084. doi: [10.1016/J.CERAMINT.2016.03.113](https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2016.03.113)
3. Guo H., Ye F., Li W., Song X., Xie G. Preparation and characterization of foamed microporous mullite ceramics based on kyanite // *Ceramics International*. 2015. Vol. 41(10): Pp. 14645–14651. doi: [10.1016/j.ceramint.2015.07.186](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.07.186)
4. Kyaw Oo D'Amore G., Caniato M., Travan A., Turco G., Marsich L., Ferluga A., Schmid C. Innovative thermal and acoustic insulation foam from recycled waste glass powder // *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 165. Pp. 1306–1315. doi: [10.1016/j.jclepro.2017.07.214](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.214)
5. Yatsenko E.A., Ryabova A.V., Goltsman B.M. Development of fiber-glass composite coatings for protection of steel oil pipelines from internal and external corrosion // *Chernyye Metally*. 2019. No. 12. Pp. 46–51.

6. Hisham N.A.N., Zaid M.H.M., Aziz S.H.A., Muhammad F.D. Comparison of foam glass-ceramics with different composition derived from ark clamshell (ACS) and soda lime silica (SLS) glass bottles sintered at various temperatures // *Materials*. 2021. Vol. 14(3). 570. doi: [10.3390/ma14030570](https://doi.org/10.3390/ma14030570)
7. Yatsenko E.A, Goltsman B.M, Kosarev A.S, Karandashova N.S, Smolii V.A, Yatsenko L.A. Synthesis of Foamed Glass Based on Slag and a Glycerol Pore-Forming Mixture // *Glass Physics and Chemistry*. 2018. Vol. 44(2). Pp. 152–155. doi: [10.1134/S1087659618020177](https://doi.org/10.1134/S1087659618020177)
8. Liu T., Li X., Guan L., Liu P., Wu T., Li Z., Lu A. Low-cost and environment-friendly ceramic foams made from lead-zinc mine tailings and red mud: Foaming mechanism, physical, mechanical and chemical properties // *Ceramics International*. 2016. 42(1). Pp. 1733–1739. doi: [10.1016/j.ceramint.2015.09.131](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.09.131)
9. Ivanov K.S. Associated Synthesis of Microgranular Foam-Glass-Ceramic from Diatomaceous Shales // *Glass and Ceramics (English translation of Steklo i Keramika)*. 2022. Vol. 79: Pp. 234–238. doi: [10.1007/s10717-022-00491-4](https://doi.org/10.1007/s10717-022-00491-4)
10. Kazantseva L.K, Rashchenko S.V. Optimization of porous heat-insulating ceramics manufacturing from zeolitic rocks // *Ceramics International*. 2016. Vol. 42(16): Pp. 19250–19256. doi: [10.1016/j.ceramint.2016.09.091](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.09.091)
11. Yatsenko E.A, Smolii V.A, Goltsman B.M, Ryabova A.V, Klimova L.V, Goltsman N.S. Optimal Fractional Composition of Batch for Synthesis of Foam-Glass Materials Based on Diatomite from the Chernoyarskoe Deposit // *Glass and Ceramics (English translation of Steklo i Keramika)*. 2019. Vol. 75. Pp. 391–393. doi: [10.1007/s10717-019-00092-8](https://doi.org/10.1007/s10717-019-00092-8)
12. Huo W., Yan S., Wu J.-M., Liu J., Chen Y., Qu Y., Tang X., Yang J. A novel fabrication method for glass foams with small pore size and controllable pore structure // *Journal of the American Ceramic Society*. 2017. Vol. 100(12). Pp. 5502–5511. doi: [10.1111/jace.15089](https://doi.org/10.1111/jace.15089)
13. König J., Petersen R.R., Iversen N., Yue Y. Application of foaming agent–oxidizing agent couples to foamed-glass formation // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2021. Vol. 553. 120469. doi: [10.1016/j.jnoncrysol.2020.120469](https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2020.120469)
14. Xi C., Zheng F., Xu J., Yang W., Peng Y., Li Y., Li P., Zhen Q., Bashir S., Liu J.L. Preparation of glass-ceramic foams using extracted titanium tailing and glass waste as raw materials // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 190. Pp. 896–909. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2018.09.170](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.170)
15. Rodin A., Ermakov A., Erofeeva I., Erofeev V. Effect of Chlorides Content on the Structure and Properties of Porous Glass Ceramics Obtained from Siliceous Rock // *Materials*. 2022. Vol. 15(9). 3268. doi: [10.3390/ma15093268](https://doi.org/10.3390/ma15093268)
16. Rodin A.I., Ermakov A.A., Kyashkin V.M., Rodina N.G., Erofeev V.T. Processes of foaming and formation of the structure of porous glass ceramics from siliceous rocks // *Magazine of Civil Engineering*. 2023. Vol. 121(5). 12109. doi: [10.34910/MCE.121.9](https://doi.org/10.34910/MCE.121.9)
17. Rodin A.I., Ermakov A.A., Erofeeva I.V., Erofeev V.T. Structure and properties of porous glass ceramics from siliceous rocks with the addition of Mg(OH)₂ // *Materials Physics and Mechanics*. 2023. Vol. 51(5). Pp. 127–141. doi: [10.18149/MPM.5152023_13](https://doi.org/10.18149/MPM.5152023_13)
18. Jia R., Deng L., Yun F., Li H., Zhang X., Jia X. Effects of SiO₂/CaO ratio on viscosity, structure, and mechanical properties of blast furnace slag glass ceramics // *Materials Chemistry and Physics*. 2019. Vol. 233. Pp. 155–162. doi: [10.1016/j.matchemphys.2019.05.065](https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.05.065)
19. Li Y., Zhao L.-H., Wang Y.-K., Cang D.-Q. Effects of Fe₂O₃ on the properties of ceramics from steel slag // *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2018. Vol. 25(4). Pp. 413–419. doi: [10.1007/s12613-018-1586-7](https://doi.org/10.1007/s12613-018-1586-7)
20. Costa F.P.D., Morais C.R.D.S., Pinto H.C., Rodrigues A.M. Microstructure and physico-mechanical properties of Al₂O₃-doped sustainable glass-ceramic foams // *Materials Chemistry and Physics*. 2020. Vol. 256. 123612. doi: [10.1016/j.matchemphys.2020.123612](https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.123612)
21. Kahlenberg V., Girtler D., Arroyabe E., Kaindl R., Többsen D.M. Devitrite (Na₂Ca₃Si₆O₁₆) – structural, spectroscopic and computational investigations on a crystalline impurity phase in industrial soda-lime glasses // *Mineralogy and Petrology*. 2010. Vol. 100. Pp. 1–9. doi: [10.1007/s00710-010-0116-8](https://doi.org/10.1007/s00710-010-0116-8)
22. Ji R., Zheng Y., Zou Z., Chen Z., Wei S., Jin X., Zhang M. Utilization of mineral wool waste and waste glass for synthesis of foam glass at low temperature // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 215. Pp. 623–632. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2019.04.226](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.226)
23. Beregovoi V.A., Sorokin D.S., Beregovoi A.M. Glass-crystalline materials of a cellular structure, formed by vibration foaming technology // *Defect and Diffusion Forum*. 2021. Vol. 410. Pp. 823–828. doi: [10.4028/www.scientific.net/DDF.410.823](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.410.823)
24. Erofeev V.T., Korotaev S.A., Vatin N.I. Deformation and Heat-Insulating Characteristics of Light Concrete on Porous Burned Binder Under Heating // *Materials Physics and Mechanics*. 2023. Vol. 51(1). Pp. 33–41. doi: [10.18149/MPM.5112023_4](https://doi.org/10.18149/MPM.5112023_4)

REFERENCES

1. König J., Lopez-Gil A., Cimavilla-Roman P., Rodriguez-Perez M.A., Petersen R.R., Østergaard M.B., Iversen N., Yue Y., Spreitzer M. Synthesis and properties of open- and closed-porous foamed glass with a low density. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 247. 118574. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2020.118574](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118574)
2. Cao J., Lu J., Jiang L., Wang Z. Sinterability, microstructure and compressive strength of porous glass-ceramics from metallurgical silicon slag and waste glass. *Ceramics International*. 2016. Vol. 42(8). Pp. 10079–10084. doi: [10.1016/J.CERAMINT.2016.03.113](https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2016.03.113)
3. Guo H., Ye F., Li W., Song X., Xie G. Preparation and characterization of foamed microporous mullite ceramics based on kyanite. *Ceramics International*. 2015. Vol. 41(10): Pp. 14645–14651. doi: [10.1016/j.ceramint.2015.07.186](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.07.186)
4. Kyaw Oo D'Amore G., Caniato M., Travan A., Turco G., Marsich L., Ferluga A., Schmid C. Innovative thermal and acoustic insulation foam from recycled waste glass powder. *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 165. Pp. 1306–1315. doi: [10.1016/j.jclepro.2017.07.214](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.214)
5. Yatsenko E.A., Ryabova A.V., Goltsman B.M. Development of fiber-glass composite coatings for protection of steel oil pipelines from internal and external corrosion. *Chernye Metally*. 2019. No. 12. Pp. 46–51.
6. Hisham N.A.N., Zaid M.H.M., Aziz S.H.A., Muhammad F.D. Comparison of foam glass-ceramics with different composition derived from ark clamshell (ACS) and soda lime silica (SLS) glass bottles sintered at various temperatures. *Materials*. 2021. Vol. 14(3). 570. doi: [10.3390/ma14030570](https://doi.org/10.3390/ma14030570)
7. Yatsenko E.A., Goltsman B.M., Kosarev A.S., Karandashova N.S., Smolii V.A., Yatsenko L.A. Synthesis of Foamed Glass Based on Slag and a Glycerol Pore-Forming Mixture. *Glass Physics and Chemistry*. 2018. Vol. 44(2). Pp. 152–155. doi: [10.1134/S1087659618020177](https://doi.org/10.1134/S1087659618020177)
8. Liu T., Li X., Guan L., Liu P., Wu T., Li Z., Lu A. Low-cost and environment-friendly ceramic foams made from lead-zinc mine tailings and red mud: Foaming mechanism, physical, mechanical and chemical properties. *Ceramics International*. 2016. 42(1). Pp. 1733–1739. doi: [10.1016/j.ceramint.2015.09.131](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.09.131)
9. Ivanov K.S. Associated Synthesis of Microgranular Foam-Glass-Ceramic from Diatomaceous Shales. *Glass and Ceramics (English translation of Steklo i Keramika)*. 2022. Vol. 79: Pp. 234–238. doi: [10.1007/s10717-022-00491-4](https://doi.org/10.1007/s10717-022-00491-4)
10. Kazantseva L.K., Rashchenko S.V. Optimization of porous heat-insulating ceramics manufacturing from zeolitic rocks. *Ceramics International*. 2016. Vol. 42(16): Pp. 19250–19256. doi: [10.1016/j.ceramint.2016.09.091](https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.09.091)
11. Yatsenko E.A., Smolii V.A., Goltsman B.M., Ryabova A.V., Klimova L.V., Goltsman N.S. Optimal Fractional Composition of Batch for Synthesis of Foam-Glass Materials Based on Diatomite from the Chernoyarskoe Deposit. *Glass and Ceramics (English translation of Steklo i Keramika)*. 2019. Vol. 75. Pp. 391–393. doi: [10.1007/s10717-019-00092-8](https://doi.org/10.1007/s10717-019-00092-8)
12. Huo W., Yan S., Wu J.-M., Liu J., Chen Y., Qu Y., Tang X., Yang J. A novel fabrication method for glass foams with small pore size and controllable pore structure. *Journal of the American Ceramic Society*. 2017. Vol. 100(12). Pp. 5502–5511. doi: [10.1111/jace.15089](https://doi.org/10.1111/jace.15089)
13. König J., Petersen R.R., Iversen N., Yue Y. Application of foaming agent–oxidizing agent couples to foamed-glass formation. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2021. Vol. 553. 120469. doi: [10.1016/j.jnoncrysol.2020.120469](https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2020.120469)
14. Xi C., Zheng F., Xu J., Yang W., Peng Y., Li Y., Li P., Zhen Q., Bashir S., Liu J.L. Preparation of glass-ceramic foams using extracted titanium tailing and glass waste as raw materials. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 190. Pp. 896–909. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2018.09.170](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.170)
15. Rodin A., Ermakov A., Erofeeva I., Erofeev V. Effect of Chlorides Content on the Structure and Properties of Porous Glass Ceramics Obtained from Siliceous Rock. *Materials*. 2022. Vol. 15(9). 3268. doi: [10.3390/ma15093268](https://doi.org/10.3390/ma15093268)
16. Rodin A.I., Ermakov A.A., Kyashkin V.M., Rodina N.G., Erofeev V.T. Processes of foaming and formation of the structure of porous glass ceramics from siliceous rocks. *Magazine of Civil Engineering*. 2023. Vol. 121(5). 12109. doi: [10.34910/MCE.121.9](https://doi.org/10.34910/MCE.121.9)
17. Rodin A.I., Ermakov A.A., Erofeeva I.V., Erofeev V.T. Structure and properties of porous glass ceramics from siliceous rocks with the addition of Mg(OH)₂. *Materials Physics and Mechanics*. 2023. Vol. 51(5). Pp. 127–141. doi: [10.18149/MPM.5152023_13](https://doi.org/10.18149/MPM.5152023_13)
18. Jia R., Deng L., Yun F., Li H., Zhang X., Jia X. Effects of SiO₂/CaO ratio on viscosity, structure, and mechanical properties of blast furnace slag glass ceramics. *Materials Chemistry and Physics*. 2019. Vol. 233. Pp. 155–162. doi: [10.1016/j.matchemphys.2019.05.065](https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.05.065)
19. Li Y., Zhao L.-H., Wang Y.-K., Cang D.-Q. Effects of Fe₂O₃ on the properties of ceramics from steel slag. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2018. Vol. 25(4). Pp. 413–419. doi: [10.1007/s12613-018-1586-7](https://doi.org/10.1007/s12613-018-1586-7)

20. Costa F.P.D., Morais C.R.D.S., Pinto H.C., Rodrigues A.M. Microstructure and physico-mechanical properties of Al₂O₃-doped sustainable glass-ceramic foams. *Materials Chemistry and Physics*. 2020. Vol. 256. 123612. doi: [10.1016/j.matchemphys.2020.123612](https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.123612)
21. Kahlenberg V., Girtler D., Arroyabe E., Kaindl R., Többsen D.M. Devitrite (Na₂Ca₃Si₆O₁₆) – structural, spectroscopic and computational investigations on a crystalline impurity phase in industrial soda-lime glasses. *Mineralogy and Petrology*. 2010. Vol. 100. Pp. 1–9. doi: [10.1007/s00710-010-0116-8](https://doi.org/10.1007/s00710-010-0116-8)
22. Ji R., Zheng Y., Zou Z., Chen Z., Wei S., Jin X., Zhang M. Utilization of mineral wool waste and waste glass for synthesis of foam glass at low temperature. *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 215. Pp. 623–632. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2019.04.226](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.226)
23. Beregovoi V.A., Sorokin D.S., Beregovoi A.M. Glass-crystalline materials of a cellular structure, formed by vibration foaming technology. *Defect and Diffusion Forum*. 2021. Vol. 410. Pp. 823–828. doi: [10.4028/www.scientific.net/DDF.410.823](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.410.823)
24. Erofeev V.T., Korotaev S.A., Vatin N.I. Deformation and Heat-Insulating Characteristics of Light Concrete on Porous Burned Binder Under Heating. *Materials Physics and Mechanics*. 2023. Vol. 51(1). Pp. 33–41. doi: [10.18149/MPM.5112023_4](https://doi.org/10.18149/MPM.5112023_4)

Информация об авторах

Родин Александр Иванович

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», г. Саранск, Россия, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительных материалов и технологий, E-mail: AL_Rodin@mail.ru

Ермаков Анатолий Анатольевич

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», г. Саранск, Россия, аспирант кафедры строительных материалов и технологий, E-mail: anatoly.ermakov97@mail.ru

Кяшкин Владимир Михайлович

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», г. Саранск, Россия, кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник кафедры строительных материалов и технологий, E-mail: kyashkin@mail.ru

Асташов Алексей Михайлович

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», г. Саранск, Россия, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой инженерной и компьютерной графики, E-mail: astalexm@mail.ru

Буянкин Дмитрий Андреевич

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», г. Саранск, Россия, лаборант-исследователь кафедры строительных материалов и технологий, E-mail: super.buyanin@mail.ru

Information about authors

Rodin Aleksander I.

National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia, candidate of technical sciences, docent, associate professor of the department of building materials and technologies, E-mail: AL_Rodin@mail.ru

Ermakov Anatoly A.

National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia, postgraduate student of the department of building materials and technologies, E-mail: anatoly.ermakov97@mail.ru

Kyashkin Vladimir M.

National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia,
candidate of physical and mathematical sciences, docent, senior scientist of the department of building materials and technologies,

E-mail: kyashkin@mail.ru

Astashov Alexey M.

National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia,
candidate of technical sciences, docent, head of the department of engineering and computer graphics,

E-mail: astalexm@mail.ru

Buyankin Dmitry A.

National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia,
laboratory researcher of the department of building materials and technologies,

E-mail: super.buyankin@mail.ru

Уважаемые авторы!
Просим Вас ознакомиться с основными требованиями
к оформлению научных статей

- Представляемый материал должен быть **оригинальным, не опубликованным ранее** в других печатных изданиях.
- Объем материала, предлагаемого к публикации, измеряется числом знаков с учетом пробелов. Рекомендуемый объем статей: **от 15000 до 45000 знаков с пробелами**.
- Статья должна быть набрана на листах формата А4 шрифтом Times New Roman, размер 12 pt с одинарным интервалом, текст выравнивается по ширине; абзацный отступ – 1,25 см, правое поле – 2 см, левое поле – 2 см, поля внизу и вверху – 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

Адрес издателя:

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»
302026, Орловская область, г. Орел, ул. Комсомольская д. 95
+7 (4862) 75-13-18

www.oreluniver.ru
E-mail: info@oreluniver.ru

Адрес редакции

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»
302030, Орловская область, г. Орел, ул. Московская, 77.
+79065704999

<http://oreluniver.ru/science/journal/sir>
E-mail: str_and_rek@mail.ru

Материалы статей печатаются в авторской редакции.
Право использования произведений предоставлено авторами на основании
п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации

Технический редактор О.В. Юрова
Компьютерная верстка О.В. Юрова

Подписано в печать
Дата выхода в свет
Формат 70×108/16. Печ. л. 14,6
Цена свободная. Тираж 500 экз.
Заказ №

Отпечатано с готового оригинал-макета
на полиграфической базе ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»
302026, г. Орел, ул. Комсомольская, 95.