

Научно-технический журнал

Издается с 2003 года.

Выходит шесть раз в год.

№ 5 (121) 2025

СТРОИТЕЛЬСТВО И РЕКОНСТРУКЦИЯ

Учредитель – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»
(ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева»)

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)

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

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

Редколлегия:

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)

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

Есаулов Г.В., акад. РААСН, д-р арх., проф. (Россия)

Каприлов С.С., акад. РААСН, д.т.н., проф.
(Россия)

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

Колчунов Вл.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.И., 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)

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

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

Себешев В.Г., почетный чл. РААСН, канд. техн.
наук, проф. (Россия)

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

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

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

Тур В.В., иностр. чл. 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)

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 обединенному каталогу «Пресса России»
на сайтах www.pressa-rf.ru и www.akc.ru

© ОГУ имени И.С. Тургенева, 2025

Содержание

Теория инженерных сооружений. Строительные конструкции

Кабанцев О.В., Крылов С.Б., Трофимов С.В. Экспериментальные исследования прочности на продавливание монолитных железобетонных плит большой толщины	3
Курбацкий Е.Н., Зернов И.И. Метод решения задач строительной механики, основанный на теоремах Коши.....	27
Травуш В.И., Конин Д.В., Крылов А.С., Арленинов П.Д., Рожкова Л.С., Жданова А.А., Гаврилов Д.Н., Ведяков М.И. Прочность и деформативность изгибаемых сталежелезобетонных элементов с листовым армированием с учетом трещин	42

Безопасность зданий и сооружений

Алексеев А.В., Юрусов К.В. Практический метод расчета по нормальному сечению коррозионно поврежденных колонн при горизонтальном ударе.....	57
Московцева В.С. Расчет параметра живучести железобетонной рамной системы при особом воздействии.....	73

Архитектура и градостроительство

Воличенко О.В., Чечель И.П. Теоретическая модель образовательного комплекса полного дня.....	85
Розанцева Н.В. Реконструкция замка Инстербург с приспособлением для современного использования.....	107
Федорова Т.С. Федорова Н.В. Принципы реставрационной деятельности в концепции парадигмы биосферносовместимых городов и поселений.....	122

Строительные материалы и технологии

Абдуллаев А.М., Муртазаев С.-А.Ю., Абдуллаев М.А.-В., Сайдумов М.С., Абдуллаев Р.М. Влияние комплексной добавки на поверхностное напряжение воды и основные свойства цементного камня	133
--	-----

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

BUILDING AND RECONSTRUCTION

Scientific and technical journal
The journal is published since 2003.
The journal is published 6 times a year.

№ 5 (121) 2025

The founder – Federal State Budgetary Educational Institution
of Higher Education
«Orel State University named after I.S. Turgenev»
(Orel State University)

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

Editor-in-Chief Assistants:
Gordon V.A., 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)
Erofeev V.T., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Esaulov G.V., doc. arc., prof. (Russia)
Kapriev S. S., 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)
Sebeshev V.G., candidate sc. tech., prof. (Russia)

Tamrazyan A.G., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Travush V.I., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Treschev A.A., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Tur V.V., doc. sc. tech., prof. (Belorussia)
Fedorov V.S., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Fedorova N.V., doc. sc. tech., prof. (Russia)
Schach R., doc. sc. tech., prof. (Germany)

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:
ПИ №ФС 77-67169 from 16.09.2016 г.

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

© Orel State University, 2025

Contents

Theory of engineering structures. Building units

Kabantsev O.V., Krylov S.B., Trofimov S.V. Experimental studies on the punching shear strength of thick reinforced concrete slabs.....	3
Kurbatsky E.N., Zernov I.I. A method for solving problems of structural mechanics based on Cauchy's theorems.....	27
Travush V.I., Konin D.V., Krylov A.S., Arleninov P.D., Rozhkova L.S., Zhdanova A.A., Gavrilov D.N., Vedyakov M.I. Strength and deformability of elements with steel-plate reinforcement with bending cracks.....	42

Building and structure safety

Alekseytsev A.V., Yurusov K.V. A practical calculation method for the normal section of corrosion-damaged columns under transverse impact.....	57
Moskovtseva V.S. Calculation of robustness parameter of reinforced concrete frame system under special impact.....	73

Architecture and urban planning

Volichenko O.V., Chechel I.P. Theoretical model of an all-day educational complex.....	85
Rozantseva N.V. Reconstruction of Insterburg castle with adaptation for modern use.....	107
Fedorova T.S., Fedorova N.V. Principles of restoration activity within the concept of the biosphere-compatible cities and settlements paradigm.....	122

Construction materials and technologies

Abdullaev A.M., Murtazaev S.-A.Yu., Abdullaev M.A.-V., Saidumov M.S., Abdullaev R.M. Porous filler based on metallurgical slag and liquid-glass composition.....	133
---	-----

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.

О.В. КАБАНЦЕВ¹, С.Б. КРЫЛОВ², С.В. ТРОФИМОВ^{1,2}

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

²Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона (НИИЖБ) им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», г. Москва, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ НА ПРОДАВЛИВАНИЕ МОНОЛИТНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ БОЛЬШОЙ ТОЛЩИНЫ

Аннотация. В статье представлены результаты экспериментальных исследований прочности на продавливание монолитных железобетонных плит большой толщины (600 мм) без поперечного армирования. Исследовано влияние коэффициента продольного растянутого армирования ($\mu_s = 0,56\%$ и $1,12\%$) на несущую способность и характер разрушения. Установлено, что увеличение процента армирования в 2 раза приводит к росту прочности на продавливание лишь на 10,8%, что свидетельствует о снижении влияния этого фактора для «толстых» плит по сравнению с «тонкими». Проанализировано сложное напряженно-деформированное состояние бетона в приопорной зоне и распределение напряжений в арматуре. Проведен сравнительный анализ экспериментальных данных с расчетами по нормативным документам (СП 63.13330, EC2, ACI 318, MC2020), который показал значительную переоценку несущей способности по методике СП 63.13330, особенно для плит с малым процентом армирования. Сделан вывод о необходимости учета продольного армирования в расчетных моделях.

Ключевые слова: железобетонные плиты большой толщины, продавливание, напряженно-деформированное состояние, экспериментальные исследования.

O.V. KABANTSEV¹, S.B. KRYLOV², S.V. TROFIMOV^{1,2}

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

²Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete (NIIZHB) named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center "Construction", Moscow, Russia

EXPERIMENTAL STUDIES ON THE PUNCHING SHEAR STRENGTH OF THICK REINFORCED CONCRETE SLABS

Abstract. This paper presents the results of experimental studies on the punching shear strength of thick reinforced concrete slabs (600 mm) without shear reinforcement. The influence of the tensile reinforcement ratio ($\mu_s = 0,56\%$ and $1,12\%$) on the load-bearing capacity and failure mode was investigated. It was found that a two-fold increase in the reinforcement ratio leads to an increase in punching shear strength of only 10,8%, indicating a reduced influence of this factor for "thick" slabs compared to "thin" ones. The complex stress-strain state of concrete in the support zone and the stress distribution in the reinforcement were analyzed. A comparative analysis of the experimental data with calculations based on regulatory documents (SP 63.13330, EC2, ACI 318, MC2020) was carried out, which showed a significant overestimation of the load-bearing capacity according to the SP 63.13330 methodology, especially for slabs with a low reinforcement ratio. It is concluded that it is necessary to account for the longitudinal reinforcement in the design models.

Keywords: thick reinforced concrete slabs, punching shear, stress-strain state, experimental studies.

1. Введение

Исследование схемы сопротивления железобетонных плит средней и большой толщины действию продавливающих нагрузок представляет собой в высокой степени актуальную задачу, что определяется рядом важных аспектов.

Анализ научной литературы, посвященной экспериментальным исследованиям, служившим основой для действующих норм РФ по расчету несущей способности плитных конструкций при действии продавливающих нагрузок, представленный в [1], показывает, что подавляющее число экспериментов выполнено с нагружением образцов плит малой толщины (от 100 до 250 мм), которые применяются для устройства перекрытий и (по устоявшейся в научной литературе терминологии) относятся к классу «тонких» плит. Однако развитие практики строительства потребовало широкого применения железобетонных плит существенно большей толщины для устройства перекрытий с высокими значениями эксплуатационных нагрузок, а также для устройства так называемых «трансферных плит» – конструкций, обеспечивающих совместную работу и передачу нагрузок от одной группы вертикальных конструкций к другой группе, при этом продольные оси двух групп конструкций не совпадают.

Трансферные плиты, как правило, воспринимают значительные по своим значениям поперечные усилия, вследствие чего такие конструкции должны обладать повышенной несущей способностью по критерию прочности на продавливание. Трансферные плиты проектируются, как правило, с толщиной, равной или превышающей 600 мм, что позволяет классифицировать (в рамках устоявшейся терминологии) такие плиты как «толстые».

На сегодняшний день учет размерного эффекта при расчете несущей способности плит при продавливании является одной из актуальных тем зарубежных исследований и научных дискуссий, о чем свидетельствует ряд научных статей Muttoni A. [2] и Bažant Z.P. [3], критикующих тот или иной подход к учету фактора влияния толщины плиты. При этом выполненный сопоставительный анализ показывает, что на получаемые результаты влияет, в основном, два фактора: 1 – толщина данных конструкций; 2 – принятый процент продольного растянутого армирования μ_s .

Представляется вполне обоснованным в целях решения актуальной задачи разработки метода расчета несущей способности железобетонных плит с увеличенной толщиной («толстых» плит) определить в рамках экспериментальных исследований особенности силового сопротивления, трещинообразования и механизмов разрушения таких типов железобетонных плит без устройства поперечного армирования, включая влияние продольного армирования плитных конструкций. Настоящая статья является продолжением ранее опубликованной работы [1].

В статье представлены результаты экспериментальных исследований прочности железобетонных плит без поперечного армирования при действии статических продавливающих нагрузок.

2. Модели и методы

На основе результатов выполненного анализа [1] для изучения силового сопротивления, трещинообразования и механизмов разрушения железобетонных «толстых» плит без поперечного армирования с разным коэффициентом продольного рабочего растянутого армирования при действии статической продавливающей нагрузки выполнены экспериментальные исследования экспериментальных образцов в виде двух серий монолитных прямоугольных железобетонных плит с размерами в плане 2440×2440 мм толщиной 600 мм. Основные принятые параметры для экспериментальных образцов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные параметры для экспериментальных образцов плит

Серия №	Маркировка образцов	Толщина плиты h , мм	Величина защитного слоя бетона для нижней и верхней грани плиты, мм	Принятый диаметр/шаг продольных верхних арматурных	Принятый диаметр/шаг продольных нижних арматурных	μ_s , %	h_0 , мм	h'_0 , мм	c , мм	r_s , мм
1	KKT_1_№1	600	20	28/100	12/100	1,12	552	568	400	1120
	KKT_1_№2									
	KKT_1_№3									
2	KKT_2_№1	600	20	28/200	12/200	0,56	552	568	400	1120
	KKT_2_№2									
	KKT_2_№3									

Примечание: c – размеры поперечного сечения стальной квадратной колонны; h'_0 – приведенная высота рабочего сечения плиты для нижних продольных арматурных стержней. Методика испытаний детально была представлена в [1].

3. Результаты исследования и их анализ

По результатам анализа данных, полученных в ходе выполнения экспериментальных исследований, установлено, что все образцы разрушились при продавливании их стальной колонной. Испытания плит проводились в практически одинаковых условиях, а фактические прочностные и деформационные характеристики материалов образцов были близки по значениям для двух серий плит. А принятное отношение $r_s/h_0 \approx 2.028$ [1] позволило обеспечить так называемое «свободное продавливание».

Нагружение всех образцов плит выполнялось поэтапно ступенями, каждая из которых не превышала 10% от максимальной ранее полученной теоретической разрушающей нагрузки в соответствии с принятой методикой испытаний [1].

Практически все образцы плит разрушились от действия продавливающего усилия в процессе перехода с 9 ступени нагружения на 10 ступень [1], за исключением образца марки KKT_2_№2. Для указанного образца плиты при достижении 10 этапа нагружения ($F_{исп.} = 4000$ кН) разрушение не произошло. В этой связи на 10 ступени нагружения данный образец был выдержан под нагрузкой в течение 30 минут согласно п. 9.7 ГОСТ 8829-2018, а затем поэтапное нагружение продолжилось. Разрушение плиты марки KKT_2_№2 произошло в момент достижения статической нагрузки 11 этапа.

Результаты экспериментальных исследований деформирования образцов железобетонных плит без поперечного армирования при действии статической продавливающей нагрузки

В соответствии с принятой методикой испытаний плит на продавливание [1] для измерения вертикальных перемещений образцов при действии статической нагрузки использованы цифровые индикаторы перемещений, которые были установлены в контрольных точках под нижней поверхностью плит марок KKT_1 и KKT_2 (рисунок 1).

Результаты измерения вертикальных перемещений в контрольных точках образцов представлены на рисунке 2. Как видно из графиков «нагрузка-вертикальные перемещения» для контрольных точек №7, №10 и №13 образцов марок KKT_1_№3 и KKT_2_№3, с увеличением процента продольного растянутого армирования μ_s жесткость конструкций увеличивается, но характер разрушения плит становится более хрупким.

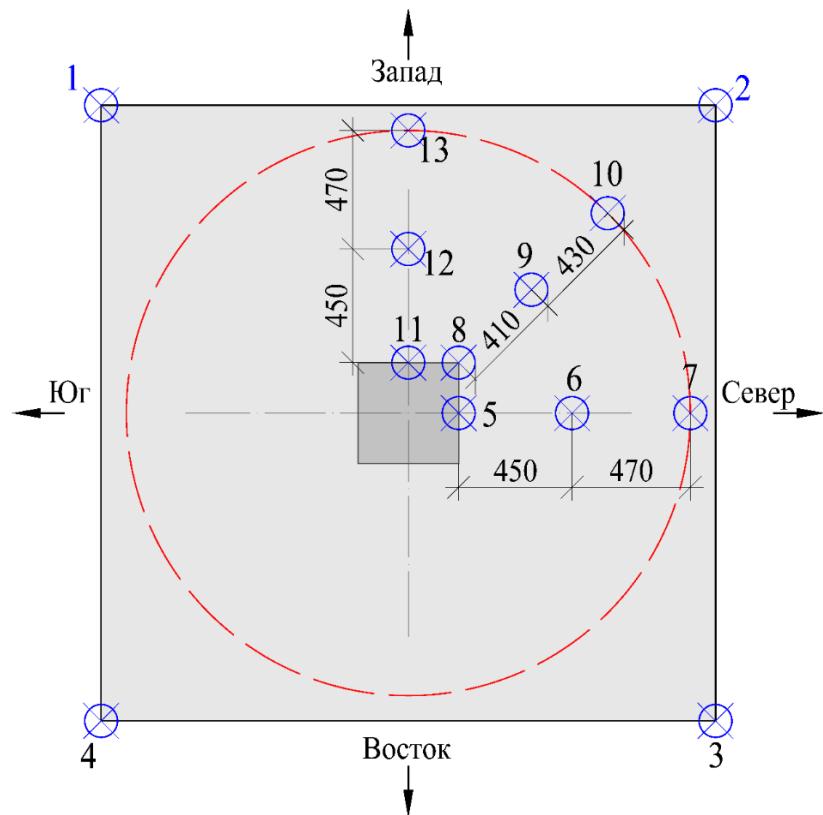


Рисунок 1 – Принятая схема расположения и маркировка цифровых индикаторов перемещений, устанавливаемых под нижнюю грань образцов плит марок ККТ_1 и ККТ_2

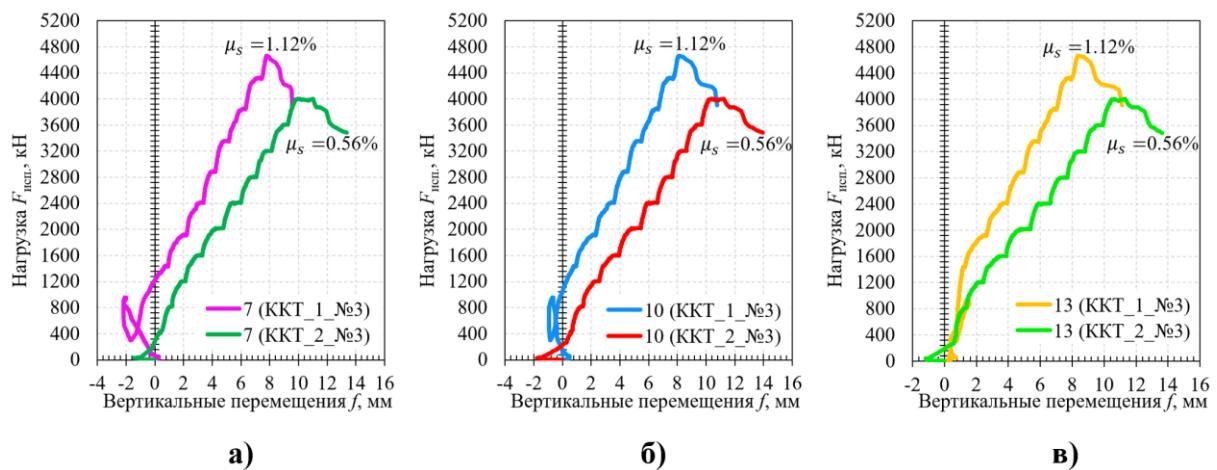


Рисунок 2 – Сопоставление полученных вертикальных перемещений для образцов плит марок ККТ_1 №3 и ККТ_2 №3 в процессе их нагружения для контрольных точек: а) №7, б) №10, в) №13

Результаты экспериментального определения несущей способности железобетонных плит без поперечного армирования по критерию продавливания

Данные по несущей способности железобетонных плит без поперечного армирования по критерию продавливания $F_{\text{исп.}}$, полученные в результате экспериментальных исследований, представлены в таблице 2 в сопоставлении с нормативными оценками несущей способности на продавливание по ряду действующих норм [4-7] и альтернативной методике [8].

Таблица 2 – Результаты сопоставительного анализа

№ Серии	Образец	$F_{исп.}$, кН	$F_{исп.срд.}$, кН	$F_{исп.}/F_{pred}$				
				СП63	Коровин Н.Н. [8]	EC2	MC2020 (LoA II)	ACI 318
Первая	KKT_1_№1	4678,08	4537,65	0,812	0,927	0,916	0,874	1,238
	KKT_1_№2	4271,44		0,742	0,846	0,836	0,798	1,130
	KKT_1_№3	4663,44		0,810	0,924	0,913	0,871	1,234
Среднее значение для образцов первой серии:				0,788	0,899	0,888	0,848	1,201
Вторая	KKT_2_№1	3881,84	4095,36	0,628	0,717	0,960	0,944	1,031
	KKT_2_№2	4401,36		0,712	0,813	1,088	1,070	1,168
	KKT_2_№3	4002,88		0,648	0,739	0,990	0,973	1,063
Среднее значение для образцов второй серии:				0,663	0,756	1,013	0,996	1,087

Примечание к таблице 2:

– Характеристики экспериментальных образцов представлены в [1].

– В приведенных значениях разрушающих нагрузок $F_{исп.}$, полученных в момент разрушения плит при продавливании, значения нагрузки от собственного веса образцов не учитывались, поскольку технологически не представлялось возможным определить точное фактическое значение.

– При определении несущей способности на продавливание экспериментальных образцов плит по нормативным подходам [5-7] среднее значение цилиндрической прочности бетона на осевое сжатие, определялось по формуле (1) согласно [9].

$$f_c = \left((R_m^{150} - 8,0) \cdot 0,85 \right) + 8, \quad (1)$$

где R_m^{150} – фактическая средняя кубиковая прочность бетона (таблица 5 [1]).

Анализ данных из таблицы 2 показывает, что принятая в СП 63.13330 [4] методика расчета по определению прочности на продавливание даёт наибольшую переоценку несущей способности для экспериментальных образцов плит толщиной 600 мм по сравнению с другими нормативными подходами. Так, для плит первой серии ($\mu_s = 1,12\%$) среднее значение переоценки несущей способности составило $\Delta = 22,0\%$, а для плит второй серии ($\mu_s = 0,56\%$) $-\Delta = 33,7\%$.

При этом применение корректирующего коэффициента К, предложенного Коровиным Н.Н. [8] в рамках доработки методики СП 63.13330 [4], незначительно улучшило сходимость расчетных и экспериментальных данных, так для плит второй серии переоценка несущей способности составила $\Delta = 22,4\%$.

Результаты исследования относительных деформаций в сжатом бетоне при действии продавливающих нагрузок

С целью определения данных о напряженно-деформированном состоянии бетона сжатой зоны в окрестности опирания образцов на стальную колонну были установлены тензорезисторы фирмы «Tokyo Measuring Instruments Laboratory Co., Ltd.» с длиной чувствительного элемента 60 (PL-60-11) и 90 (PL-90-11) мм по схеме, представленной на рисунке 3.

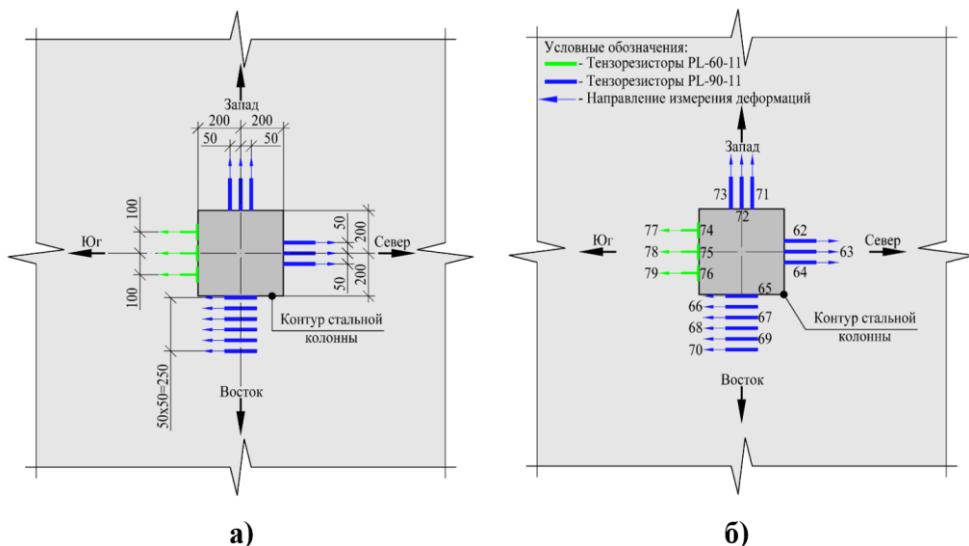


Рисунок 3 – Принятая схема расположения (а) и маркировки (б) тензометрических датчиков, устанавливаемых на нижнюю поверхность бетона плит в окрестности стальной колонны, для экспериментальных образцов марки: ККТ_1 и ККТ_2

Результаты исследований относительных деформаций бетона сжатой зоны образцов представлены на рисунке 4 и 5.

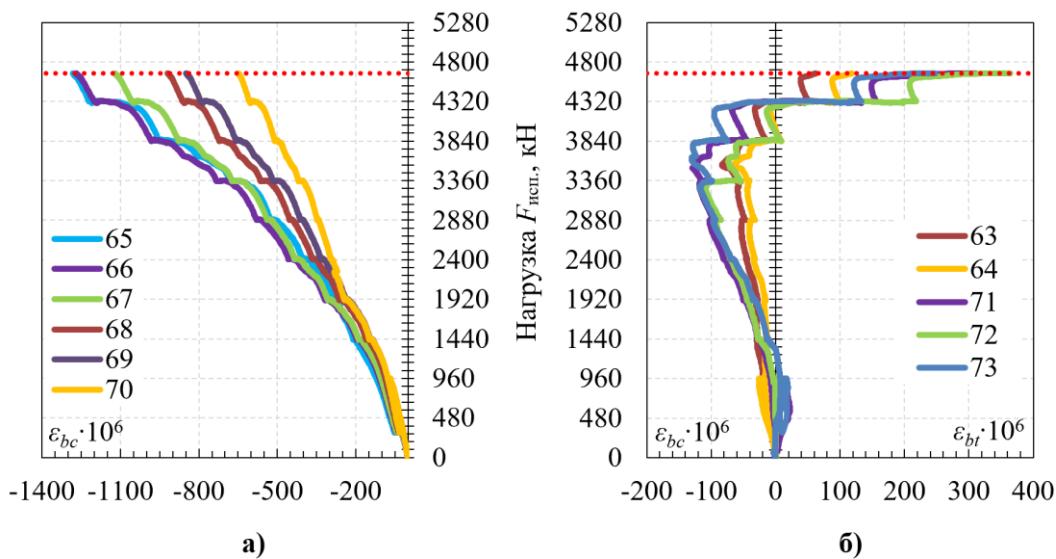


Рисунок 4 – Графики нагрузка – относительные деформации бетона в окрестности опирания образца плиты марки ККТ_1_№3 в направлениях: а) в тангенциальном, б) в радиальном

По результатам анализа полученных значений тангенциальных ε_{bc} и радиальных ε_{bc} относительных деформаций установлено, что бетон в окрестности колонны в процессе нагружения плит испытывает сложное напряженно-деформированное состояние. На начальных этапах нагружения в бетоне действуют сжимающие тангенциальные и радиальные деформации в горизонтальном направлении, а также в вертикальном в окрестности опирания образцов на колонну (трехосное сжатие). Затем с увеличением нагрузки радиальные деформации ε_{bc} (на этапе 80...90% от разрушающей нагрузки) из сжимающих переходят в растягивающие ε_{bc} . При этом тангенциальные и вертикальные деформации остаются по-прежнему сжимающими (растяжение-сжатие-сжатие). Из чего можно сделать вывод о том, что

при приближении к разрушению образца в целом, в окрестности колонны после достижения радиальными относительными деформациями на нижней поверхности плиты некоторого предельного значения ε_{bc}^{ult} , в изначально сжатом бетоне начинается быстрое развитие растягивающих радиальных деформаций (рисунок 4 и 5), которые в дальнейшем приводят к разрушению сжатой зоны бетона (рисунок 9 (б)). Так, для образцов плит первой серии среднее фактическое предельное значение относительных радиальных деформаций сжатия ε_{bc}^{ult} , после которого начинается процесс перехода в растягивающие деформации, составляет -0,000102, а для образцов марки ККТ_2 $\varepsilon_{bc}^{ult} = -0,000238$.

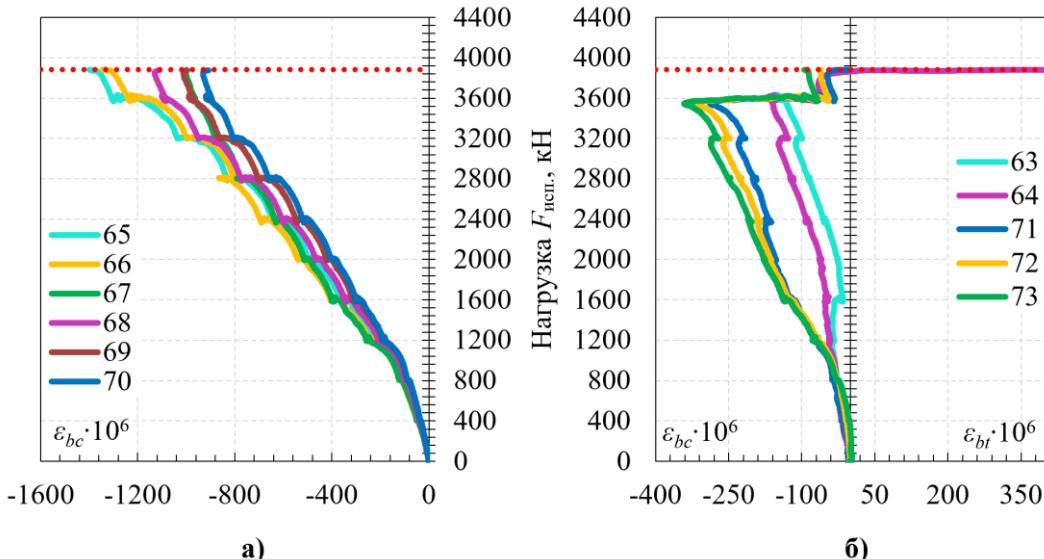


Рисунок 5 – Графики нагрузка – относительные деформации бетона в окрестности опирания образца плиты марки ККТ_2 №1 в направлениях: а) в тангенциальном, б) в радиальном

Фактические величины тангенциальных деформаций значительно больше, чем радиальные. При этом максимальные значения ε_{bc} достигаются непосредственно вблизи колонны. Затем по мере удаления от штампа приложения продавливающего усилия происходит снижение тангенциальных деформаций в бетоне. Максимальные средние значения ε_{bc} для образцов плит марки ККТ_1 ($\varepsilon_{bc} = -0,00124$) незначительно отличаются от полученных значений при испытании образцов плит марки ККТ_2 ($\varepsilon_{bc} = -0,00151$). При этом зафиксированные средние значения сжимающих радиальных деформаций, полученные в ходе выполнения испытаний плит первой и второй серий, отличаются практически в два раза при $\mu_s = 1,12\%$ и $0,56\%$.

Необходимо отметить, что фактические максимальные значения относительных радиальных и тангенциальных деформаций сжатия в процессе нагружения и разрушения плит не превысили своих предельных значений, соответствующих призменной прочности бетона при одноосном осевом сжатии R_b . Так, для бетона первой серии данные предельные деформации составляют $\hat{\varepsilon}_b = -0,00270$, а для бетона второй серии $\hat{\varepsilon}_b = -0,00284$ согласно приложению Г [4].

Анализ характера разрушения «толстых» плит при продавливании

С целью установления фактического угла наклона боковых граней фигуры (пирамиды) разрушения после испытаний выполнено распиливание экспериментальных образцов плит дисковой пилой (рисунок 6).

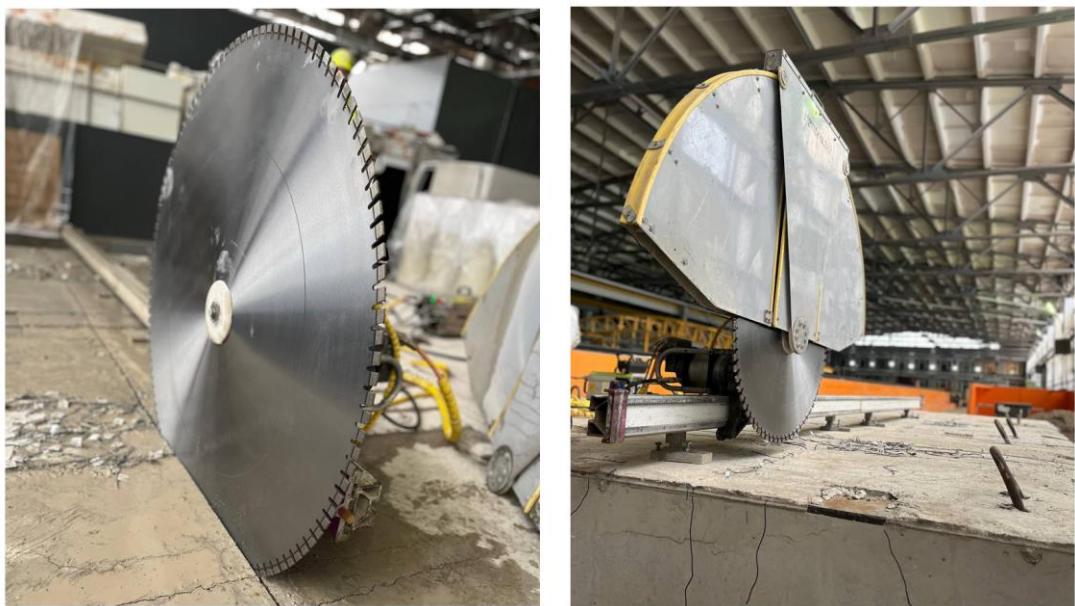


Рисунок 6 – Процесс резки экспериментальных образцов плит

Поскольку плиты находились между восемью П-образными рамами [1], а также на верхней горизонтальной грани были установлены гидравлические домкраты, то доступ в процессе испытаний к образцам с целью определения момента образования изгиблых радиальных и тангенциальных трещин на растянутой горизонтальной поверхности плит двух серий был ограничен.

Однако по результатам обработки данных, полученных тензометрическими датчиками, установленными на продольном рабочем верхнем (растянутом) армировании, были обнаружены всплески в показаниях, вызванные образованием изгиблых трещин (рисунок 11 и 12). При этом переход изгиблых радиальных трещин с растянутой горизонтальной поверхности плит на боковые грани (рисунок 7) был зафиксирован практически на начальных этапах нагружения (20-30% от разрушающего значения при продавливании образцов).

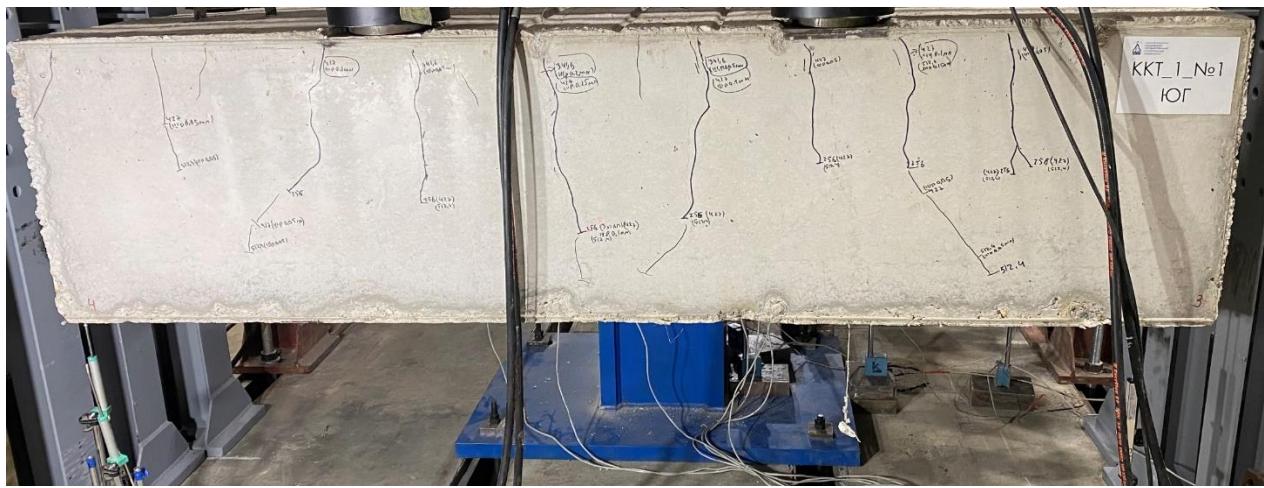
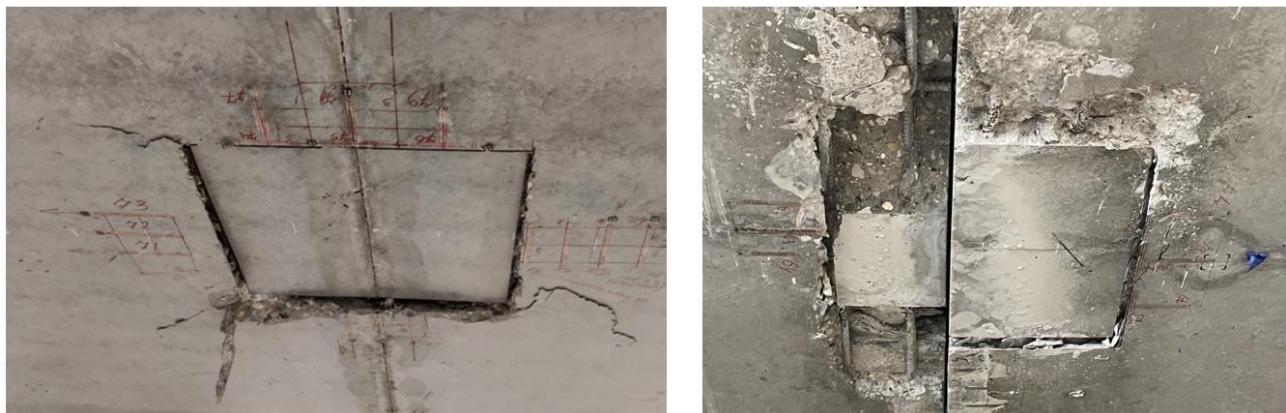


Рисунок 7 – Характер образования трещин на боковой грани образца плиты марки ККТ_1 №1 после разрушения

Во всех случаях момент разрушения экспериментальных образцов при продавливании был хрупким, как видно из графиков, представленных на рисунке 2, 4, 5, 20, и сопровождался следующими процессами:

- Образованием радиальных, тангенциальных и диагональных трещин на растянутой поверхности плит со значительной шириной раскрытия (в ряде случаев более 5 мм) на расстоянии от ≈ 620 до 820 мм от грани штампа продавливающей нагрузки.

- Хрупким разрушением (выкалыванием) сжатого бетона в окрестности опирания плит на стальную колонну, вызванным вертикальным смещением продавливающего штампа относительно нижней поверхности плиты (рисунок 8).



a)

б)

Рисунок 8 – Характер разрушения сжатого бетона в окрестности опирания плит марки: а) KKT_1 №1; б) KKT_1 №3

По результатам резки образцов двух серий была определена схема образования внутренних как изгибных трещин, так и критических наклонных трещин, формирующих боковые грани фигуры (пирамиды) продавливания - детальная информация приведена в работе [10].

Характер разрушения образцов железобетонных плит без поперечного армирования при действии статических продавливающих нагрузок представлен на рисунке 9.

Все образцы демонстрируют типичный характер разрушения плит при продавливании без устройства поперечного армирования, который определяется преимущественно наклонной критической трещиной, направленной от края колонны к верхней арматуре. Установлено, что фактический угол наклона к горизонтали критических наклонных трещин, формирующих боковые грани пирамиды продавливания, является переменным по толщине плиты.

Во всех образцах представляется возможным выделить две выраженные зоны с различными углами наклона трещин:

- В зонах, примыкающих к штампу продавливающей нагрузки, выявлено разрушение бетона образцов, соответствующее хрупкому механизму разрушения (рисунок 9 (в)). При этом на указанном участке наблюдается наиболее высокий угол наклона трещины к горизонтали – в отдельных случаях до $59^\circ \dots 63^\circ$.

- В зоне бетона, расположенной над объемом хрупкого разрушения бетона в приопорной части образца (центральная часть плит), трещины расположены более полого – под углами от 27° до 37° (рисунок 9 (а) и 9 (б)).

Полученные данные позволяют утверждать, что схема трещинообразования железобетонных плит без устройства поперечного армирования при действии статических продавливающих нагрузок является билинейной, что определяет криволинейную форму тела (пирамиды) продавливания опорной зоны плит.

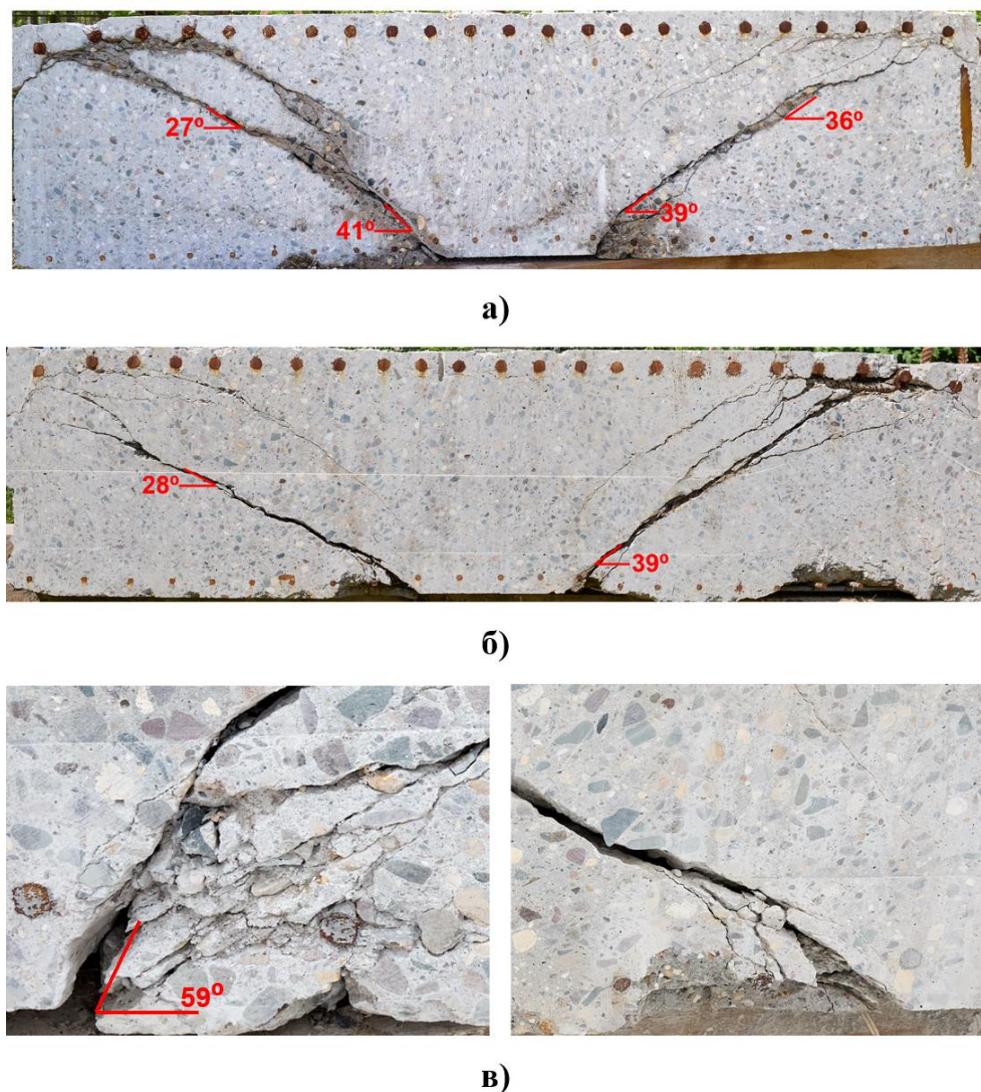


Рисунок 9 – Общий вид и угол наклона боковых граней к вертикали пирамиды продавливания для образцов марок: а) ККТ_1, б) ККТ_2; в) характер разрушения бетона в окрестности опирания плит на колонну образцов плит: первой серии (слева), второй серии (справа)

Анализ напряжений и деформаций в арматурных стержнях растянутой зоны образцов

В процессе изготовления образцов плит двух серий в соответствии с разработанной методикой [1] на верхнее продольное рабочее армирование, располагаемое вдоль направления «Север–Юг», были установлены тензометрические датчики фирмы «Tokyo Measuring Instruments Laboratory Co., Ltd.» с длиной чувствительного элемента 5 мм (FLAB-5-11) с целью определения фактических значений действующих напряжений σ_{st} и относительных деформаций ε_s в стержнях как в процессе поэтапного нагружения, так и в момент разрушения плит. Принятые схемы расположения и маркировки данных датчиков для образцов марок ККТ_1 и ККТ_2 приведены на рисунке 10.

Установлено, что в момент разрушения образцов фактические значения растягивающих напряжений σ_{st} в продольном верхнем рабочем армировании плит обеих серий не достигли своих предельных значений (рисунок 11-13). Максимальные зафиксированные напряжения составили:

- для образцов первой серии (при $\mu_s = 1,12\%$) – $\sigma_{st} = 284,48$ МПа;
- для образцов второй серии (при $\mu_s = 0,56\%$) – $\sigma_{st} = 491,9$ МПа.

Однако по результатам испытаний контрольных образцов стержней было определено, что среднее фактическое значение предела текучести для данных арматурных стержней Ø28 мм составляет σ_{st} (R_s) = 554,2 МПа.

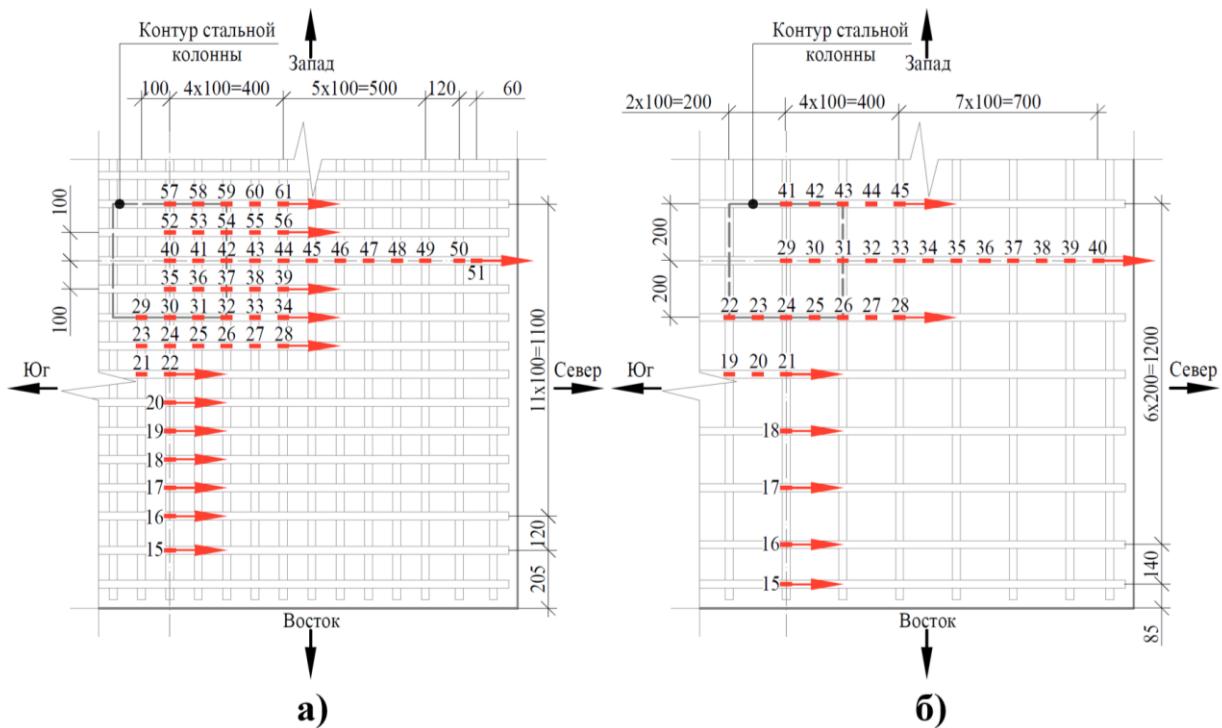


Рисунок 10 – Принятая схема расположения и маркировка тензометрических датчиков FLAB-5-11, устанавливаемых на продольные верхние арматурные стержни экспериментальных образцов марок: а) ККТ_1, б) ККТ_2

Исследование характера распределения растягивающих напряжений σ_{st} по длине центрального арматурного стержня (датчики №40...50) в образцах марки ККТ_1 выявило следующую закономерность. На начальной стадии нагружения максимальные напряжения наблюдались в центральной части образцов плит. Однако по мере роста нагрузки зона максимальных значений растягивающих напряжений была зафиксирована уже на расстоянии 500...1020 мм от центра стальной колонны на участках образования изгибных трещин (рисунок 11).

Анализ распределения растягивающих напряжений вдоль центрального стержня в образцах марки ККТ_2 (датчики №29...40) показал, что при нагрузке $\approx 50\%$ от разрушающей величины максимальные значения σ_{st} локализуются в зонах образования первичных трещин, вызванные изгибом плиты (рисунок 12).

На рисунках 14 и 15 представлены графики распределения растягивающих напряжений σ_{st} в средней части стержней, расположенных на различных расстояниях от центра плит марок: ККТ_1 №3 (датчики №15-20, 24, 30, 35, 40, 52, 57); ККТ_2 №3 (датчики №15-21, 24, 29, 41).

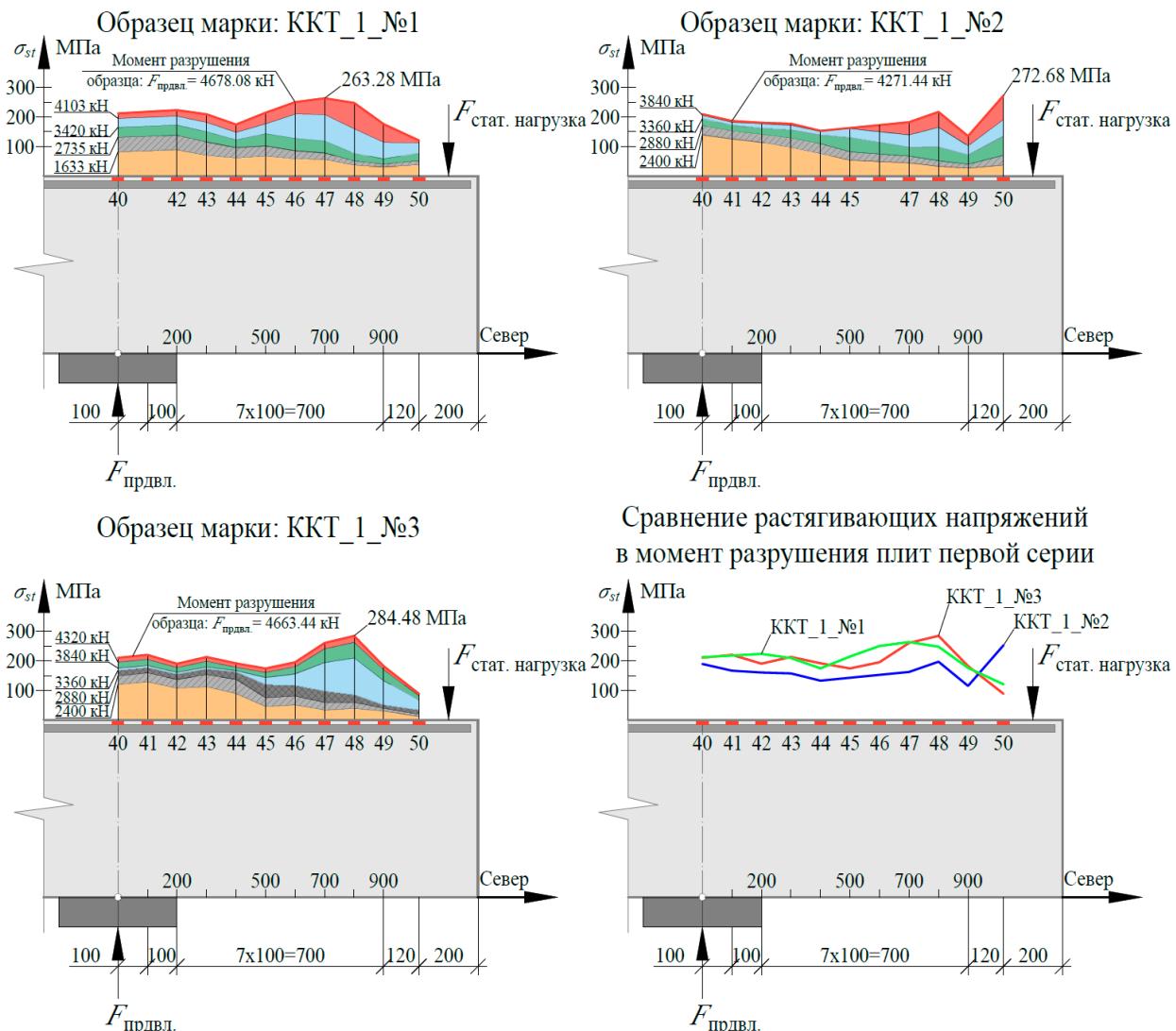


Рисунок 11 – Фактическое распределение растягивающих напряжений в центральном продольном верхнем арматурном стержне в процессе нагружения образцов марки ККТ_1

Из графиков распределения напряжений σ_{st} (рисунок 14 и 15), действующих в средней части длины стержней, расположенных на разных расстояниях от центра плит, можно сделать следующие выводы:

- в процессе нагружения все продольные арматурные стержни в пределах пирамиды продавливания включаются в работу;
- максимальные значения σ_{st} при разрушении наблюдаются в зонах образования изгиблых трещин;
- по мере роста нагрузки отмечается значительное увеличение напряжений в средней части длины стержней, расположенных ближе к краям плит.

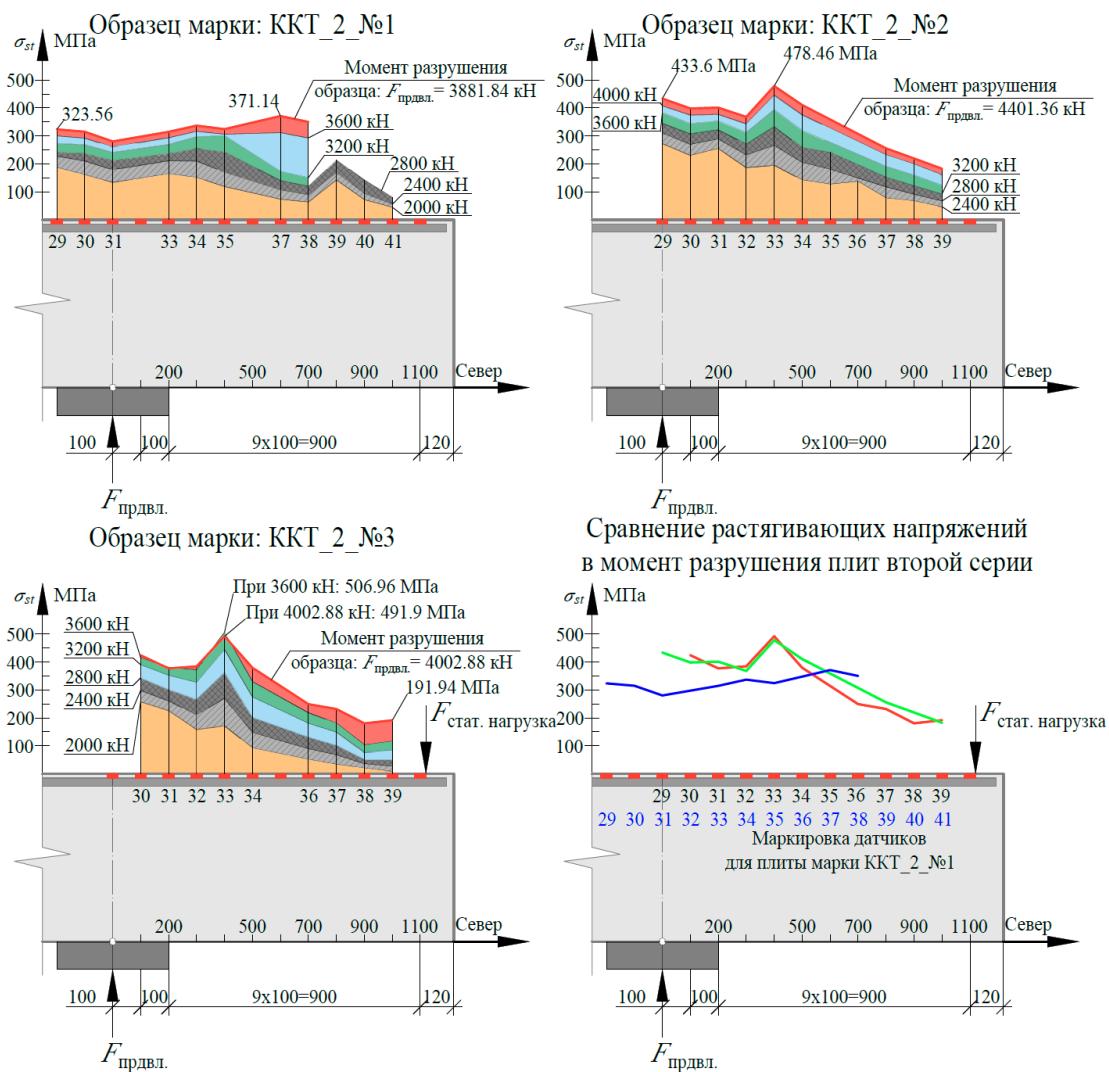


Рисунок 12 – Фактическое распределение растягивающих напряжений в центральном продольном верхнем арматурном стержне в процессе нагружения образцов марки ККТ_2

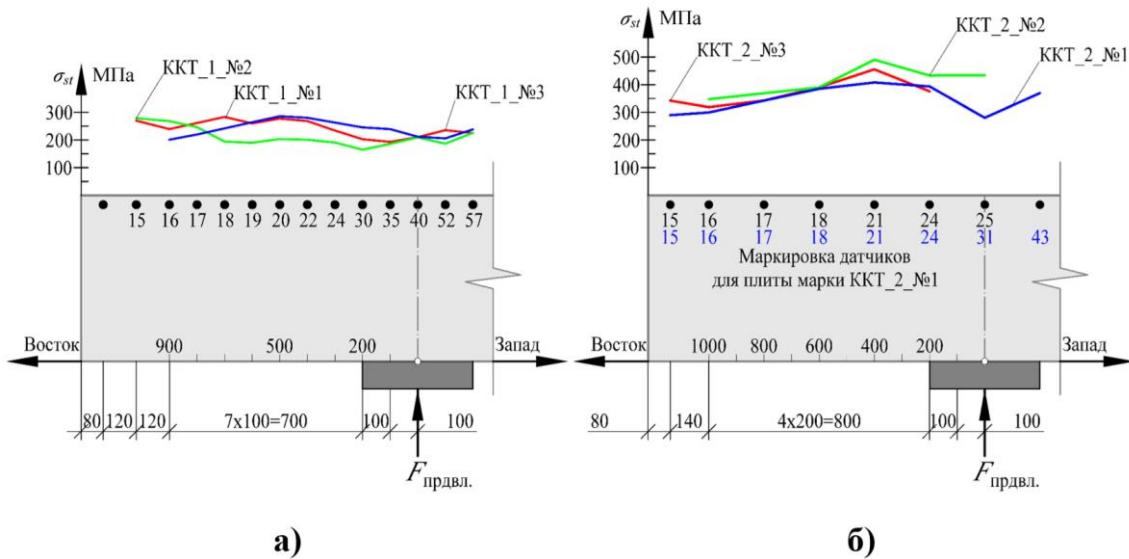


Рисунок 13 – Сравнение растягивающих напряжений, действующих в средней части длины стержней, расположенных на разных расстояниях от центра плиты в момент разрушения образцов марок: а) ККТ_1, б) ККТ_2

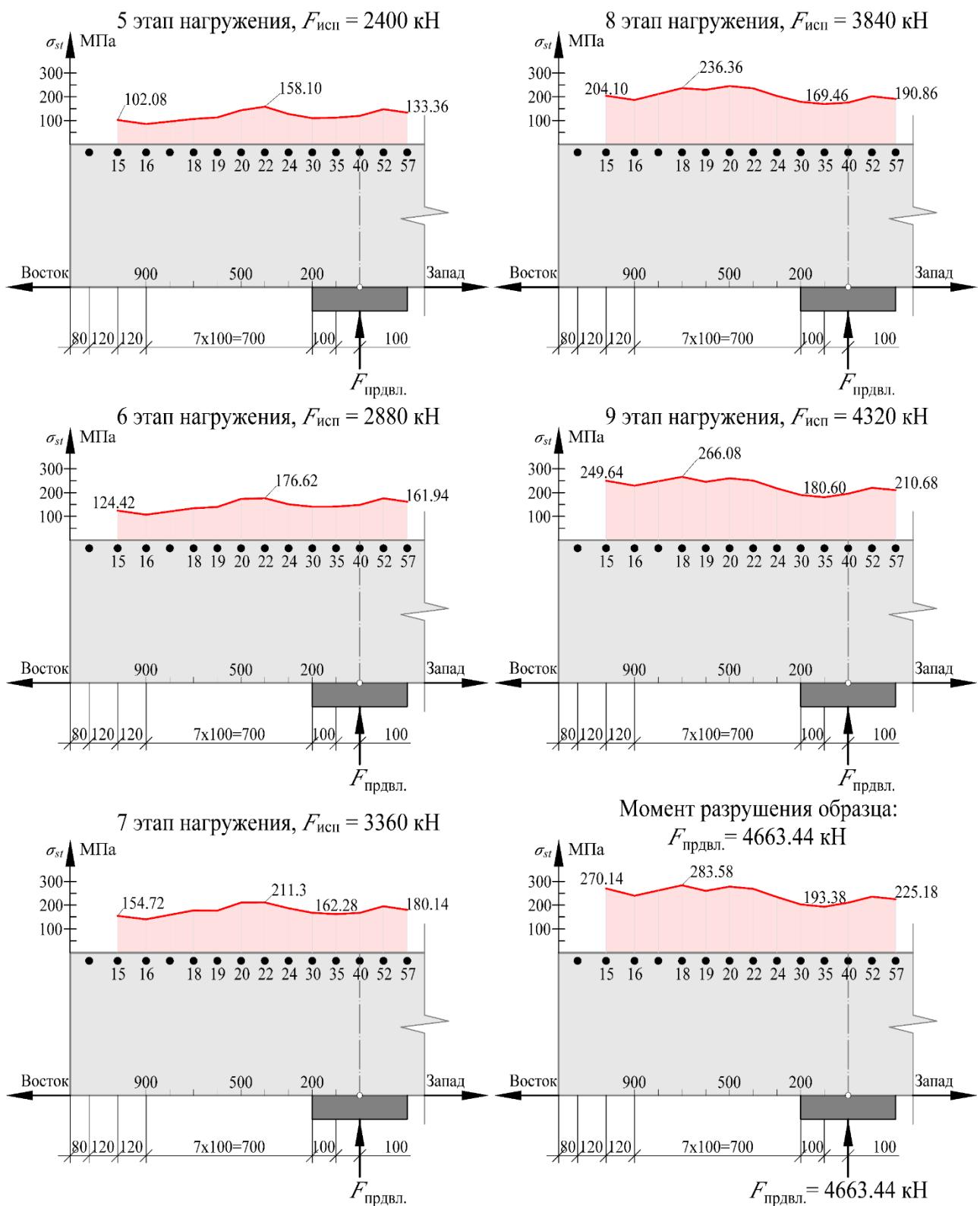


Рисунок 14 – Распределение растягивающих напряжений, действующих в средней части длины стержней, расположенных на разных расстояниях от центра плиты в процессе нагружения и разрушения образца марки ККТ_1_№3

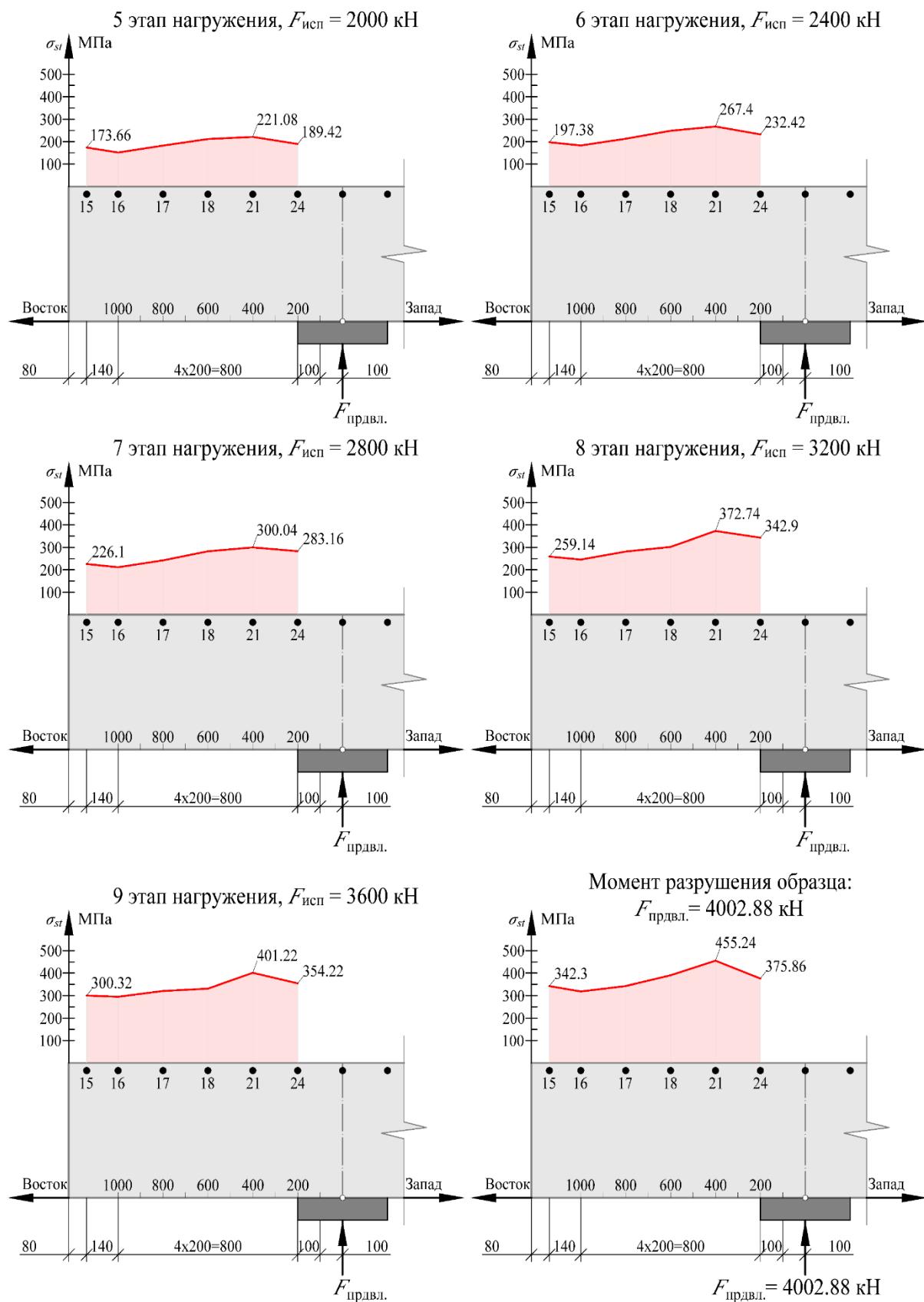


Рисунок 15 – Распределение растягивающих напряжений, действующих в средней части длины стержней, расположенных на разных расстояниях от центра плиты в процессе нагружения и разрушения образца марки ККТ_2_№3

Результаты экспериментальных исследований демонстрируют, что с началом роста относительных деформаций растяжения на удаленных от центральной части плиты участках стержней происходит изменение напряжено-деформированного состояния в бетоне в окрестности стальной колонны. Данное изменение вызвано началом перехода действующих радиальных относительных деформаций из сжимающих в растягивающие (рисунок 16 и 17).

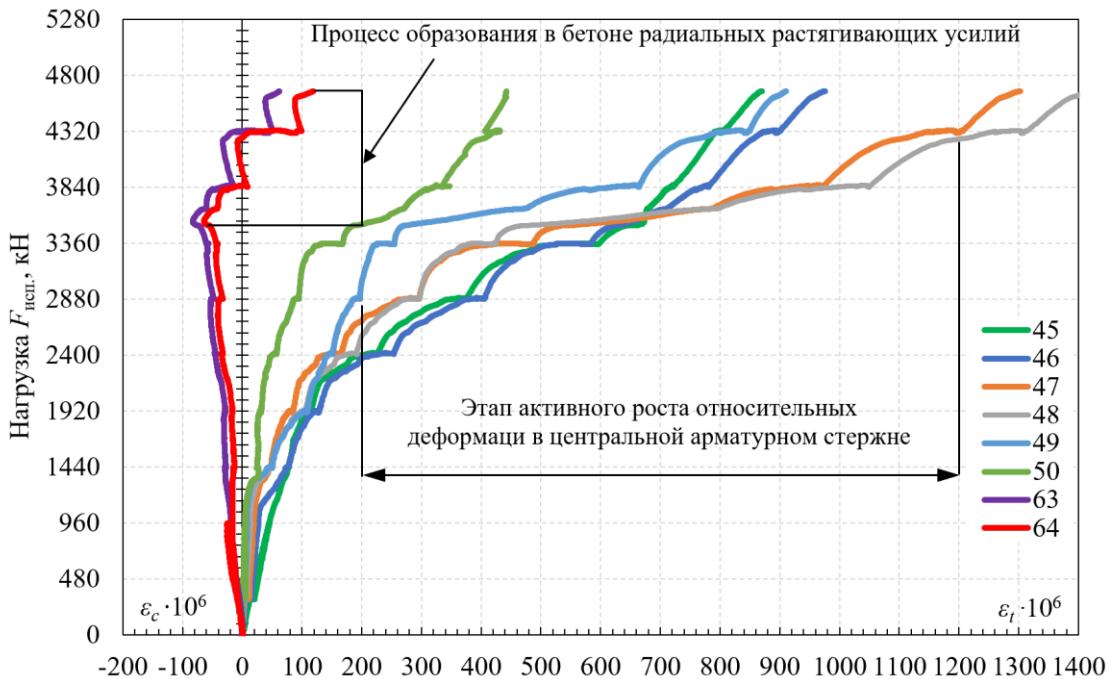


Рисунок 16 – Сопоставление изменения значений относительных деформаций в центральном верхнем арматурном стержне (датчики №45...50) и на нижней поверхности бетона в окрестности стальной колонны (№63, 64) для образца марки ККТ_1_№3

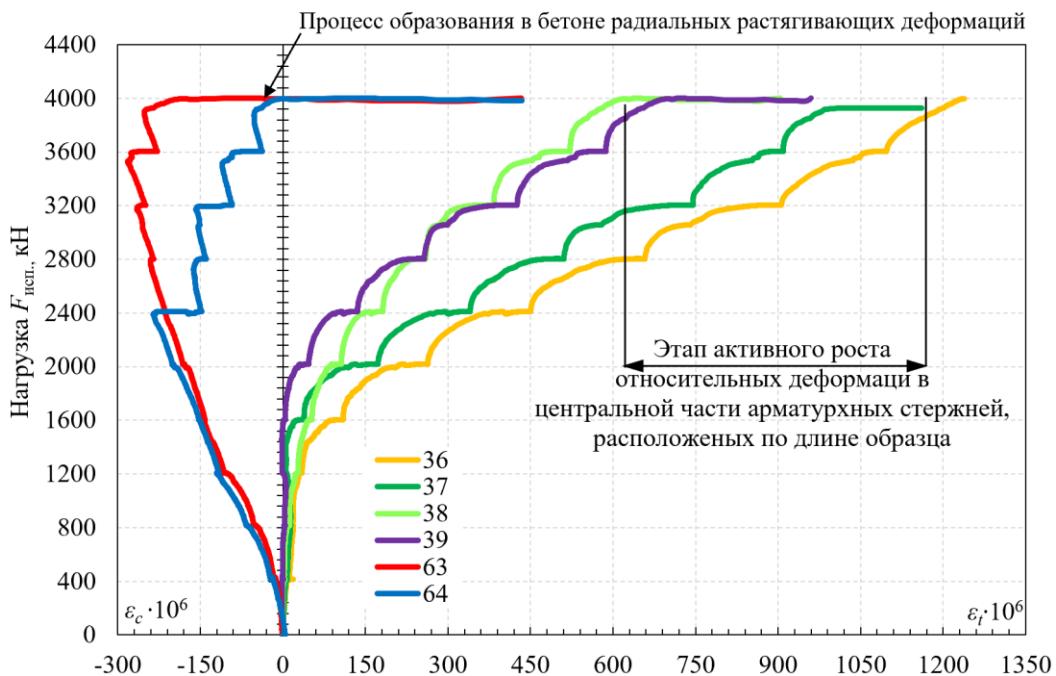


Рисунок 17 – Сопоставление изменения значений относительных деформаций в центральном верхнем арматурном стержне (датчики №36...39) и на нижней поверхности бетона в окрестности стальной колонны (№63, 64) для образца марки ККТ_2_№3

Анализ напряжений и деформаций в арматурных стержнях сжатой зоны образцов

В соответствии с принятой методикой [1], на нижние стержни продольного рабочего армирования сжатой зоны плит перед бетонированием устанавливались тензометрические датчики фирмы «Tokyo Measuring Instruments Laboratory Co., Ltd.» с длиной чувствительного элемента 5 мм (FLAB-5-11) согласно схемам их расстановки, приведенным на рисунке 18.

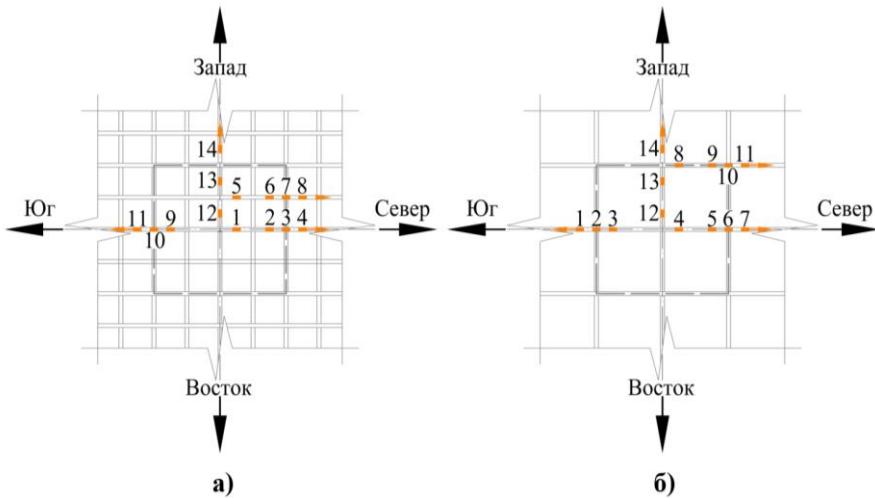


Рисунок 18 – Принятая маркировка тензометрических датчиков, установленных на продольные нижние арматурные стержни образцов марки: а) ККТ_1; б) ККТ_2

На рисунке 19 представлены результаты исследований изменения напряжений в арматурных стержнях сжатой зоны при увеличении нагрузки на образец.

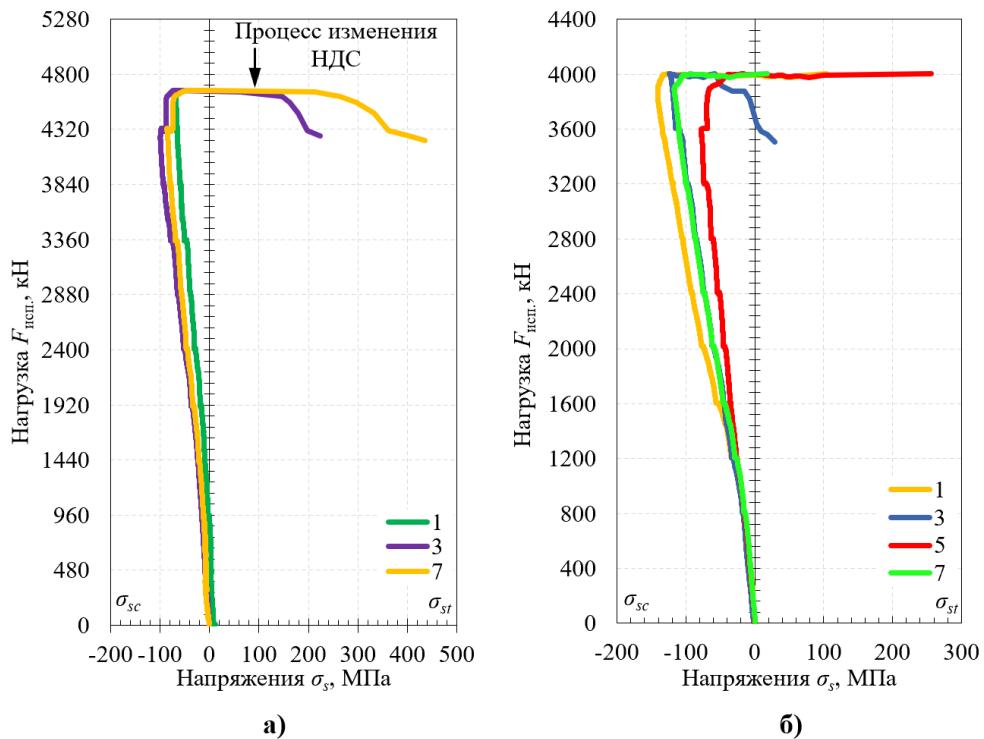


Рисунок 19 – Графики «нагрузка – напряжения» в процессе нагружения и разрушения плит вследствие взрыва бетона фигуры (пирамиды) продавливания, полученные в ходе обработки тензометрических датчиков, установленных на нижних арматурных стержнях образцов марок: а) ККТ_1_№3; б) ККТ_2_№3

Необходимо отметить, что тензометрическими датчиками, установленными на продольном рабочем армировании сжатой зоны образцов, было зафиксировано, что в процессе возникновения в бетоне радиальных растягивающих относительных деформаций ε_{btr} на

нижней горизонтальной поверхности плит в окрестности стальной колонны (рисунок 4 и 5) в контрольных точках стержней действующие напряжения из сжимающих изменяются в растягивающие (рисунок 19 и 20) в процессе разрушения плит при продавливании вследствие выдавливания фигуры (пирамиды) продавливания (рисунок 21).

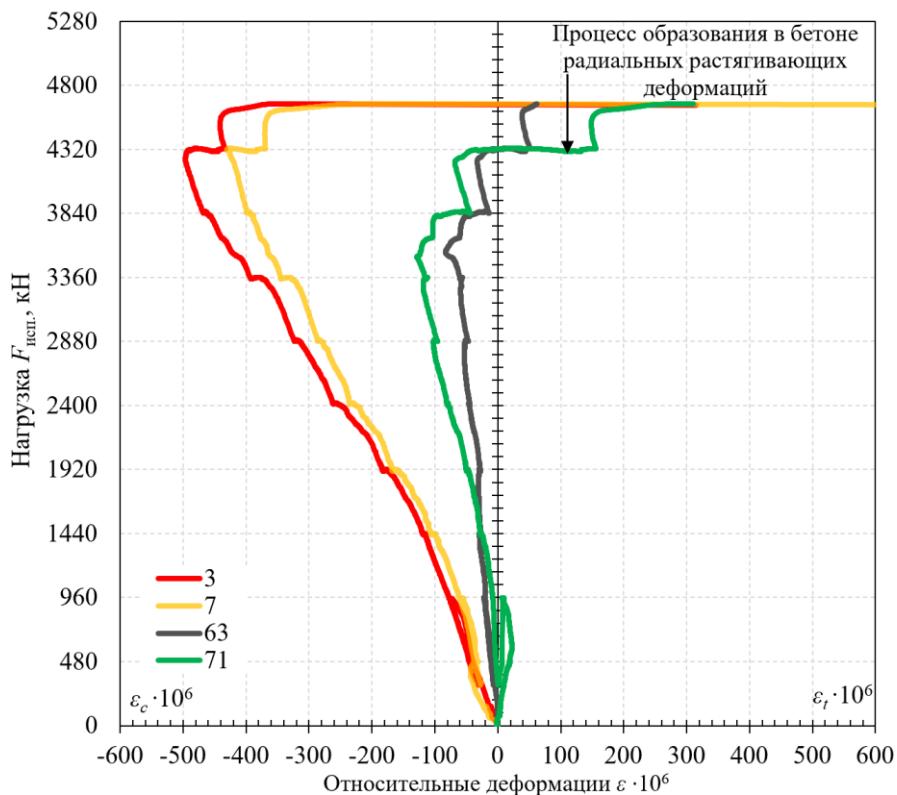


Рисунок 20 – Сопоставление графиков «Нагрузка – Относительные деформации», полученных по результатам обработки показаний тензометрических датчиков, установленных на продольные арматурные стержни сжатой зоны (№3, 7) и на нижней поверхности сжатой зоны бетона в приопорной зоне стальной колонны (№63, 71), для образца марки ККТ_1 №3



Рисунок 21 – Характер деформирования продольных арматурных стержней сжатой зоны плиты марки ККТ_1 №1 в процессе выдавливания пирамиды продавливания. Данные получены после распилки образцов плит

Влияние продольного армирования растянутой зоны бетона на несущую способность железобетонных плит без поперечной арматуры при продавливании

Выполненный сопоставительный анализ разрушающих нагрузок для образцов двух серий (таблица 2) демонстрирует, что для плит с $h = 600$ мм увеличение коэффициента продольного растянутого армирования μ_s с 0,56% до 1,12% (в 2 раза) привело к росту несущей способности на продавливание для данных конструкций всего на 10,8% (с $F_{исп.} = 4095,36$ кН до $F_{исп.} = 4537,65$ кН).

Полученные данные позволяют утверждать, что в отличие от результатов испытаний «тонких» плит [11], где аналогичное изменение μ_s с 0,33% (PG-10) до 0,75% (PG-11) вызывает значительный прирост прочности на продавливание на 41,2% (с $F_{исп.} = 540$ кН до $F_{исп.} = 763$ кН), для «толстых» плит увеличение процента продольного растянутого армирования не приводит к существенному повышению несущей способности на продавливание.

Таким образом, представляется возможным сделать вывод о том, что с ростом приведенной высоты сечения плит h_0 наблюдается тенденция снижения влияния продольного растянутого армирования на прочность таких образцов при продавливании, что, в свою очередь, указывает о принципиальном различии в механизмах разрушения «толстых» и «тонких» плит (рисунок 22).

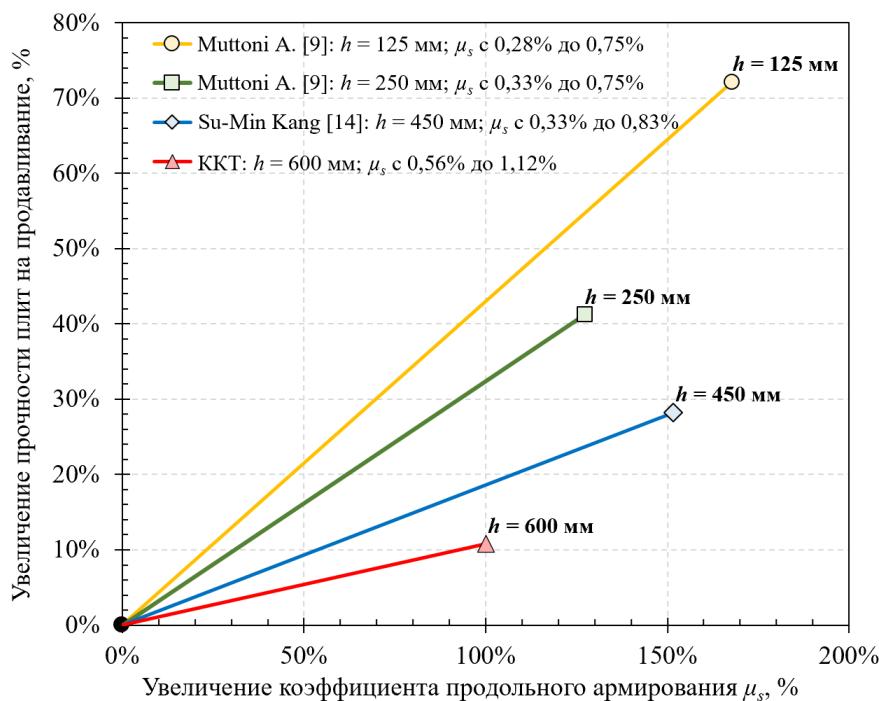


Рисунок 22 – Влияние продольного армирования на прочность плит при продавливании в зависимости от толщины конструкции

Из представленного анализа следует, что одним из основных противоречий в принятой методике СП 63.13330 [4] является неучёт продольного растянутого рабочего армирования при определении несущей способности на продавливание железобетонных элементов. Так, в рамках данного исследования был выполнен сопоставительный анализ (рисунок 23) экспериментально полученных значений разрушающих нагрузок при продавливании образцов плит с разным коэффициентом продольного армирования μ_s [8, 11-16] с расчётными значениями, определёнными по методикам нормативных документов [4-7].

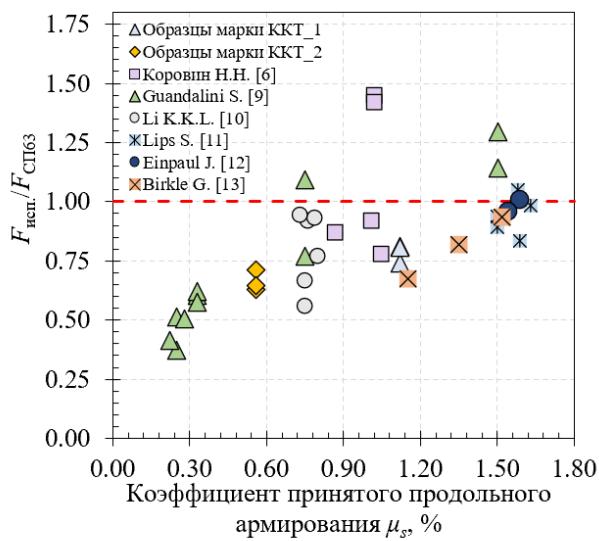
Как видно из графиков, представленных на рисунке 23, для образцов плит с малым коэффициентом продольного растянутого армирования ($\mu_s \leq 0,33\%$), получаемые расчетные значения несущей способности при продавливании по нормативным документам СП 63.13330 [4] и ACI 318-19 [6] в значительной степени переоценивают несущую способность данных конструкций при продавливании относительно экспериментально полученных значений

разрушающих нагрузок. Так, для образца плиты марки PG-2b [11] при $h = 250$ мм и $\mu_s = 0,25\%$ переоценка несущей способности составила 63,0% согласно [4] и 47,0% в соответствии с [6]. Данный негативный эффект вызван тем, что в принятых нормативных методиках расчета [4, 6], вклад продольного растянутого армирования на прочность плит при продавливании не учитывается.

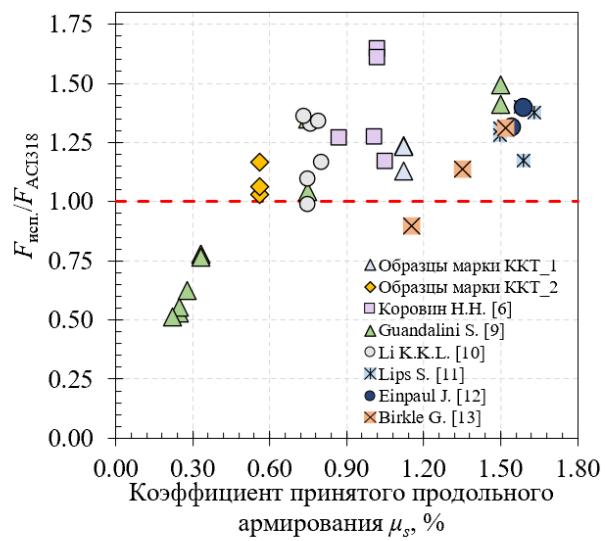
При этом предложенный Muttoni A. [1717] принцип прогноза прочности железобетонных элементов на продавливание [7] для плит с малым процентом продольного армирования существенно занижает несущую способность таких конструкций по сравнению с экспериментальными данными (рисунок 23).

Таким образом, можно заключить, что продольное армирование является ключевым фактором, определяющим прочность плит на продавливание. Поэтому совершенно недопустимо не учитывать его вовсе или учитывать с помощью коэффициентов, как принято в зарубежных методах расчёта.

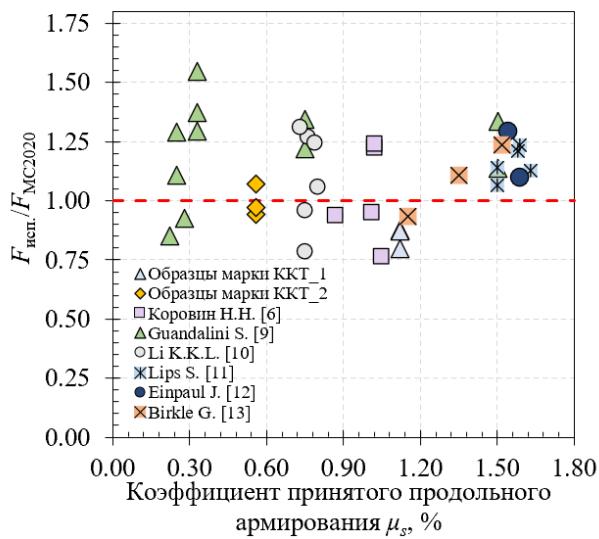
СП 63.13330.2018



ACI 318-19



Model Code 2020



EN 1992-1-1:2004

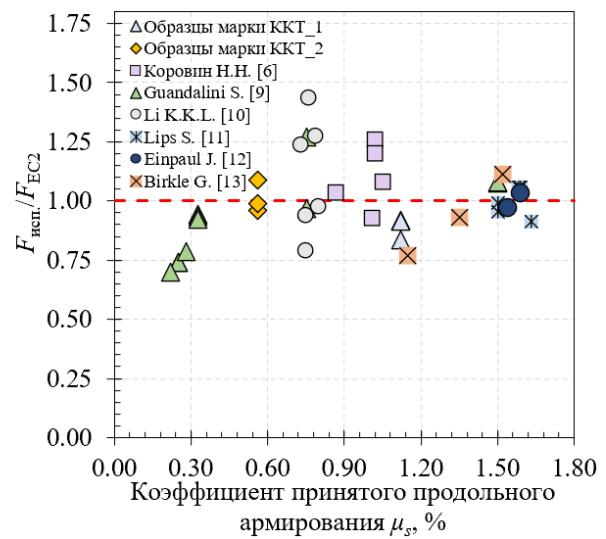


Рисунок 23 – Графики соответствия экспериментальных и расчетных данных по нормативным документам в зависимости от принятого коэффициента продольного растянутого армирования плит

4. Заключение

В результате выполненных экспериментальных исследований по определению прочности железобетонных плит толщиной 600 мм без поперечного армирования с различным коэффициентом продольного рабочего растянутого армирования при действии статических продавливающих нагрузок были установлены следующие закономерности:

1. С ростом приведенной высоты сечения железобетонных плит h_0 наблюдается тенденция снижения влияния фактора увеличения продольного растянутого армирования на фактор увеличения прочности таких плит при продавливании, что, в свою очередь, указывает на принципиальные различия в механизмах разрушения «толстых» и «тонких» плит. Выполнены исследованиями установлено, что для плит с $h_0 = 552$ мм увеличение коэффициента продольного растянутого армирования μ_s с 0,56% до 1,12% (в 2 раза) привело к росту несущей способности на продавливание для данных конструкций всего на 10,8% (с $F_{исп.} = 4095,36$ кН до $F_{исп.} = 4537,65$ кН).

2. Во всех случаях момент разрушения экспериментальных образцов при продавливании был хрупким и сопровождался следующими процессами:

- Образованием радиальных, тангенциальных и диагональных трещин на растянутой поверхности плит со значительной шириной раскрытия (в ряде случаев более 5 мм) на расстоянии от ≈ 620 до 820 мм от грани штампа продавливающей нагрузки.

- Хрупким разрушением (выкалыванием) сжатого бетона в окрестности опирания плит на стальную колонну, вызванным вертикальным смещением продавливающего штампа относительно нижней поверхности плиты.

3. Установлено, что фактический угол наклона к горизонту критических наклонных трещин, формирующих боковые грани (пирамиды) продавливания, является переменным по толщине плиты. Полученные данные позволяют утверждать, что схема трещинообразования железобетонных плит без устройства поперечного армирования при действии статических продавливающих нагрузок является билинейной, что определяет криволинейную форму фигуры (пирамиды) продавливания опорной зоны плит.

4. По результатам анализа полученных значений вертикальных перемещений нижней горизонтальной грани плит было установлено, что с увеличением процента продольного растянутого армирования μ_s жесткость конструкций увеличивается, но характер разрушения плит становится более хрупким.

5. Установлено, что в момент разрушения образцов фактические значения растягивающих напряжений σ_{st} в продольном армировании растянутой зоны плит обеих серий не достигли своих предельных значений. Максимальные зафиксированные напряжения составили:

- для образцов первой серии (при $\mu_s = 1,12\%$) – $\sigma_{st} = 284,48$ МПа;
- для образцов второй серии (при $\mu_s = 0,56\%$) – $\sigma_{st} = 491,9$ МПа.

6. Анализ графиков распределения напряжений σ_{st} , действующих в средней части длины стержней, расположенных на разных расстояниях от центра плит, позволяет установить следующие закономерности:

- в процессе нагружения все продольные арматурные стержни в пределах пирамиды продавливания включаются в работу;
- максимальные значения σ_{st} при разрушении наблюдаются в зонах образования изгибных трещин;
- по мере роста нагрузки отмечается значительное увеличение напряжений в средней части длины стержней, расположенных ближе к краям плит.

7. Тензометрическими датчиками, установленными на нижнем продольном армировании образцов, было зафиксировано, что в процессе разрушения плит при

продавливании после появления в бетоне радиальных растягивающих относительных деформаций ε_{blr} на нижней поверхности плит в окрестности стальной колонны в контрольных точках стержней действующие напряжения переходят из сжимающих в растягивающие вследствие выкалывания из бетона фигуры (пирамиды) продавливания.

8. По результатам выполненного сопоставительного анализа экспериментально полученных значений разрушающих нагрузок при продавливании образцов плит с расчётными значениями, определёнными по методикам нормативных документов, было установлено, что принятый в СП 63.13330.2018 подход к определению прочности на продавливание даёт наибольшую переоценку несущей способности как для плит с увеличенной приведенной рабочей высотой сечения («толстые» плиты) без поперечного армирования, так и для плит с малым коэффициентом продольного растянутого армирования μ_s .

5. Благодарности

Данная работа была реализована в рамках Программы развития НИУ МГСУ на 2025-2036 годы в рамках реализации Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кабанцев О.В., Крылов С.Б., Трофимов С.В. Методика экспериментальных исследований прочности толстых железобетонных плит при действии продавливающей нагрузки // Строительство и реконструкция. 2025. №4. С. 22-40. DOI: 10.33979/2073-7416-2025-120-4-22-38
2. Muttoni A., Fernández Ruiz M. Size effect on punching shear strength: Differences and analogies with shear in one-way slabs // fib Bulletin. Punching shear of structural concrete slabs. 2017. №81. Pp. 59-72. DOI: 10.35789/fib.BULL.0081.Ch04
3. Bažant Z.P., Dönmez A. Size Effect on Punching Strength of Reinforced Concrete Slabs with and without Shear Reinforcement // ACI Structural Journal. 2017. Vol. 114 №4. Pp. 875-886. DOI: 10.14359/51689719.
4. СП 63.13330.2018 «СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения». Москва: Минстрой России, 2018. 143 с.
5. EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels: CEN, 2004.
6. ACI Committee 318. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary (ACI 318R-19). American Concrete Institute: Farmington Hills, MI, 2019. 624 pp.
7. fib Model Code for Concrete Structures 2020. fib Lausanne: Ernst&Sohn, 2020.
8. Коровин Н.Н., Голубев А.Ю. Продавливание толстых железобетонных плит // Бетон и железобетон. 1989. №11. С. 20-23.
9. Cervenka, V. ATENA Program Documentation. Part 1. Theory / V. Cervenka, L. Jendele, J. Cervenka // Prague. Cervenka Consulting, 2020. – p. 344.
10. Трофимов С.В. Определение фактического угла наклона боковых граней пирамиды продавливания для плит большой толщины по результатам экспериментальных исследований // Инженерный вестник Дона. 2025. №7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/n7y2025/10242.
11. Guandalini S., Burdet O.L., Muttoni A. Punching tests of slabs with low reinforcement ratios // ACI Structural Journal. 2009. Vol. 106. №. 1. Pp. 87-95.
12. Li K.K.L. Influence of Size on Punching Shear Strength of Concrete Slabs: MEng dissertation. Montreal: McGill University, 2000. 92 pp.
13. Lips S., Fernández Ruiz M., Muttoni A. Experimental Investigation on Punching Strength and Deformation Capacity of Shear-Reinforced Slabs // ACI Structural Journal. 2012. Vol. 109 pp. 889-900.
14. Einpaul J. Punching strength of continuous flat slabs: PhD thesis. Lausanne: EPFL, 2016. 211 pp.
15. Birkle G. Punching of Fat Slabs: The Influence of Slab Thickness and Stud Layouts: PhD dissertation. Calgary: UCalgary, 2004. 217 pp.
16. Kang S.M., NA S.J., Hwang H.J. Two-way shear strength of reinforced concrete transfer slab-column connections // Engineering Structures. 2021. № 231. Pp. 1-11.
17. Muttoni A., Ruiz M.F., Bentz E., Foster S.J. Background to the Model Code 2010 Shear Provisions - Part II Punching Shear // Structural Concrete. 2013. Vol. 14. №. 3. Pp. 195-203.

REFERENCES

1. Kabanchev O.V., Krylov S.B., Trofimov S.V. Experimental research methodology for punching shear strength of thick reinforced concrete slabs. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2025;(4):22-40. DOI: 10.33979/2073-7416-2025-120-4-22-38. (rus)
2. Muttoni A., Fernández Ruiz M. Size effect on punching shear strength: Differences and analogies with shear in one-way slabs. *fib Bulletin. Punching shear of structural concrete slabs.* 2017;(81):59-72. DOI: 10.35789/fib.BULL.0081.Ch04.
3. Bažant Z.P., Dönmez A. Size effect on punching strength of reinforced concrete slabs with and without shear reinforcement. *ACI Structural Journal.* 2017;114(4):875-886. DOI: 10.14359/51689719.
4. *SP 63.13330.2018 "SNiP 52-01-2003 Concrete and reinforced concrete structures. Main provisions". Moscow: Minstroy Rossii, 2018. 143 p. (rus)
5. *EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*. Brussels: CEN, 2004.
6. ACI Committee 318. *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary (ACI 318R-19)*. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2019. 624 p.
7. *fib Model Code for Concrete Structures 2020*. Lausanne: Ernst&Sohn, 2020.
8. Korovin N.N., Golubev [A.Yu.](#) Punching of thick reinforced concrete slabs. *Beton i zhelezobeton.* 1989;(11):20-23. (rus)
9. Cervenka V., Jendele L., Cervenka J. *ATENA Program Documentation. Part 1. Theory.* Prague: Cervenka Consulting, 2020. 344 p.
10. Trofimov S.V. Determination of the actual angle of inclination of the side faces of the punching pyramid for slabs of great thickness based on the results of experimental research. *Inzhenernyy vestnik Dona.* 2025;(7). URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2025/10242](#). (rus)
11. Guandalini S., Burdet O.L., Muttoni A. Punching tests of slabs with low reinforcement ratios. *ACI Structural Journal.* 2009;106(1):87-95.
12. Li K.K.L. *Influence of Size on Punching Shear Strength of Concrete Slabs.* MEng dissertation. Montreal: McGill University, 2000. 92 p.
13. Lips S., Fernández Ruiz M., Muttoni A. Experimental Investigation on Punching Strength and Deformation Capacity of Shear-Reinforced Slabs. *ACI Structural Journal.* 2012;109:889-900.
14. Einpaul J. *Punching strength of continuous flat slabs.* PhD thesis. Lausanne: EPFL, 2016. 211 p.
15. Birkle G. *Punching of Fat Slabs: The Influence of Slab Thickness and Stud Layouts.* PhD dissertation. Calgary: UCalgary, 2004. 217 p.
16. Kang S.M., Na S.J., Hwang H.J. Two-way shear strength of reinforced concrete transfer slab-column connections. *Engineering Structures.* 2021;(231):1-11.
17. Muttoni A., Ruiz M.F., Bentz E., Foster S.J. Background to the Model Code 2010 Shear Provisions - Part II Punching Shear. *Structural Concrete.* 2013;14(3):195-203.

Информация об авторах

Кабанцев Олег Васильевич

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,
д-р техн. наук, директор научно-технических проектов, профессор кафедры железобетонных и каменных конструкций,
E-mail: ovk531@gmail.com

Крылов Сергей Борисович

Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона им. А.А. Гвоздева АО «Научно-исследовательский центр «Строительство» г. Москва, Россия,
д-р техн. наук, академик РААСН, заведующий лабораторией механики железобетона,
E-mail: niizhb_lab8@mail.ru

Трофимов Сергей Владиславович

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия, аспирант кафедры Железобетонные и каменные конструкций
Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона им. А.А. Гвоздева АО «Научно-исследовательский центр «Строительство» г. Москва, Россия,
научный сотрудник лаборатории механики железобетона,
E-mail: [niizhb_lab8@mail.ru](#)

Information about authors

Kabantsev Oleg V.

Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Moscow State University of Civil Engineering», Moscow, Russia,

Dr. Sci. (Engineering), Director of Scientific and Technical Projects, Professor of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures,

E-mail: ovk531@gmail.com

Krylov Sergey B.

Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete (NIIZHB) named after A.A. Gvozdev JSC Research Center "Construction", Moscow, Russia,

Dr. Sci. (Engineering), Academician of the RAACS, Head of the Laboratory of Reinforced Concrete Mechanics,

E-mail: niizhb_lab8@mail.ru

Trofimov Sergey V.

National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Moscow, Russia, Postgraduate Student of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures,

A.A. Gvozdev Research, Design and Technological Institute of Concrete and Reinforced Concrete, JSC Research Center "Construction", Moscow, Russia,

Researcher at the Laboratory of Reinforced Concrete Mechanics,

E-mail: niizhb_lab8@mail.ru

Статья поступила в редакцию 01.10.2025

Одобрена после рецензирования 09.10.2025

Принята к публикации 13.10.2025

The article was submitted 01.10.2025

Approved after reviewing 09.10.2025

Accepted for publication 13.10.2025

Е.Н. КУРБАЦКИЙ¹, И.И. ЗЕРНОВ²

¹Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ), г. Москва, Россия

²АО «Мосгипротранс», г. Москва, Россия

МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ СТРОИТЕЛЬНОЙ МЕХАНИКИ, ОСНОВАННЫЙ НА ТЕОРЕМАХ КОШИ

Аннотация. Представлен метод решения задач строительной механики, в основу которого положены теоремы Коши. Метод излагается на простых примерах: изгиб балок на упругом основании и колебаниях системы с одной степенью свободы. Дифференциальные уравнения представляются в обобщенных функциях, метод позволяет учитывать в уравнениях граничные и начальные условия. В правых частях записанных таким образом уравнений находятся параметры, определяющие как заданные граничные условия, так и неизвестные. При решении используется интегральное преобразование Фурье.

Для определения неизвестных граничных условий используется условие аналитичности изображений Фурье функции перемещений в верхней комплексной полуплоскости (интегральная теорема Коши). Таким образом получается система уравнений для получения неизвестных граничных условий. При выполнении обратного преобразования Фурье используется теорема Коши о вычетах. В качестве примера приведено решение колебаний системы с одной степенью свободы с различными коэффициентами демпфирования.

Ключевые слова: теоремы Коши, обобщенные функции, преобразование Фурье, балка на упругом основании, изолированные особые точки, вычеты, собственная частота

E.N. KURBATSKY¹, I.I. ZERNOV²

¹Russian University of Transport (RUT (MIIT), Moscow, Russia

²AO «Mosgiprotrans», Moscow, Russia

A METHOD FOR SOLVING PROBLEMS OF STRUCTURAL MECHANICS BASED ON CAUCHY'S THEOREMS

Abstract. A method for solving problems in structural mechanics is presented, based on Cauchy's theorems. The method is presented using simple examples: beam bending on an elastic foundation and vibrations of a system with one degree of freedom. Differential equations are presented in generalized functions, which allows taking into account boundary and initial conditions in the equations. The right-hand sides of the equations written in this way contain parameters that determine both the specified boundary conditions and the unknowns. The integral Fourier transform is used in the solution.

To determine the unknown boundary conditions, the conditions for the analyticity of the Fourier images of the displacement function in the upper complex half-plane are used (the Cauchy integral theorem). Thus, a system of equations is obtained for obtaining unknown boundary conditions. When performing the inverse Fourier transform, the Cauchy residue theorem is used. As an example, the solution of oscillations of a system with one degree of freedom with different damping coefficients is given.

Keywords: Cauchy's theorems, generalized functions, Fourier transform, beam on elastic foundation, isolated singularities, residue, natural frequency

1. Введение

При разработке метода решения воспользуемся интеллектом известных математиков, доказавшим теоремы в области фундаментальной математики, позволяющие эффективно, и даже, можно сказать, изящно решать задачи строительной механики и теории упругости. В основе метода будем использовать широко используемые в различных проблемах математического анализа теоремы Коши.

Огюстен-Луи Коши окончил Парижскую Школу мостов и дорог в 1807 году. Несмотря на инженерное образование, стал величайшим математиком, труды которого заложили основы математического анализа, привели к разработке теории аналитических функций комплексного переменного. Его многочисленные труды в области фундаментальной и прикладной математики до сих пор широко используются при решении сложных задач в различных областях науки, включая строительную механику и теорию упругости.

Отметим, что в современной математике все задачи, в которых решаются дифференциальные уравнения с начальными условиями, называются задачами Коши: например, задача Коши для волнового уравнения, задача Коши для уравнения теплопроводности и т.д.[1,2]. Приведём теоремы, которые будут использоваться в излагаемом методе.

Интегральная теорема Коши. [3] *Если функция $f(z)$ - аналитическая в односвязной области G , ограниченной замкнутым контуром C , а также в точках этого контура, то:*

$$\int_C f(z)dz = 0 \quad (1)$$

Эту теорему называют центральной теоремой теории аналитических функций комплексного переменного [3].

Теорема Коши о вычетах. [4] *Интеграл от функции $f(z)$, взятый по замкнутому контуру C , содержащемуся в области, где функция является однозначной и аналитической, за исключением изолированных особых точек однозначного характера, и не проходящему через особые точки, равен произведению суммы вычетов функции относительно всех особых точек, заключённых внутри C , на $2\pi i$.*

Теорема о вычетах с многочисленными приложениями впервые была представлена в Мемуаре об определённых интегралах (1814). Несмотря на то, что теорема была доказана более двухсот лет назад, она мало известна инженерам-строителям и на практике используется редко. По-видимому, это связано с тем, что теория функций комплексного переменного и комплексные параметры представляются ими как нечто чисто математическое, абстрактное, не связанное с описанием поведения реальных сооружений. Но следует отметить и исключения. В 1960 году была опубликована работа Евгения Семёновича Сорокина [5], в которой для учета влияния демпфирования при колебаниях упругих систем было введено понятие комплексного модуля упругости. Введение комплексного модуля упругости позволило корректно учсть затухание колебаний, учитывая, что при колебаниях циклическая деформация отстает по фазе от циклического напряжения. Благодаря удобному математическому аппарату, теория, предложенная Е. С. Сорокиным, вызвала в печати многочисленные отклики.

Следует отметить и зарубежных исследователей Н. В. Seed и I. M Idriss, в работе которых [6] при анализе взаимодействия сооружений с грунтом при землетрясении используется комплексная жёсткость, включающая в себя параметры, характеризующие и жёсткость, и демпфирование. Отметим, что результаты этой работы используются в нормах по расчёту атомных станций на сейсмостойкость ASCE/SEI 4- «Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures» [7,8].

2. Методы и модели

Для решения будем использовать обобщённые функции и преобразование Фурье. Обобщённые функции обладают замечательными свойствами, расширяющими возможности классического математического анализа. Преобразование Фурье обобщённых функций всегда существует. Применение техники обобщённых функций расширяет область математических моделей, упрощает элементарные операции [9,10]. Первое действие, предлагаемого метода решения задач будет заключаться в представлении дифференциальных уравнений в обобщённых функциях.

Представление дифференциальных уравнений строительной механики в форме, учитывающей граничные и начальные условия

Характеристической функцией ограниченной области Ω с границей S называется функция $\theta_\Omega(x)$, равная 1 при $x \in \Omega$ и равная 0 при $x \notin \Omega$. Характеристическая функция $\theta_{a,\infty}(x)$ полуоси $x \geq a$ называется функцией Хэвисайда (единичной ступенькой) и обозначается $\theta(x - a)$ [6].

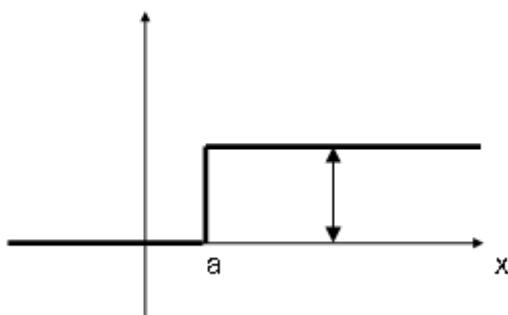


Рисунок 1 - Функция Хэвисайда (единичная ступенька)

Функция Хэвисайда позволяет описывать как разрывные силовые воздействия, так и разрывные характеристики элементов и сред. Теория обобщённых функций позволяет определить производную функции Хэвисайда, которая представляет собой функцию Дирака.

$$\delta(x - x_0) = \frac{d}{dx} \theta(x - x_0) \quad (2)$$

Это выражение можно понять, используя графические изображения дельта-функции Дирака и функции Хэвисайда.

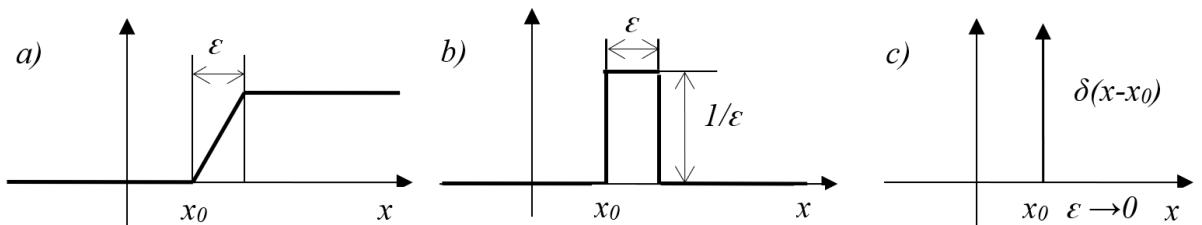


Рисунок 2 - а) Кусочно-непрерывная функция $\theta(x)$; б) Производная кусочно-непрерывной функции $\theta(x)$; в) Предел производной кусочно-непрерывной функции $\theta(x)$ при $\varepsilon \rightarrow 0$

Пусть Ω – ограниченная область с границей S ,

$$\theta(\Omega) = \begin{cases} 1, & x \in \Omega \\ 0, & x \notin \Omega \end{cases} \quad (3)$$

Тогда функция $U(x) = u(x)\theta(\Omega)$ совпадает с функцией $u(x)$ в области Ω и равна нулю вне этой области. Пусть L дифференциальный оператор с постоянными коэффициентами в области Ω . Применяя дифференциальный оператор к функции $U(x)$, получим дифференциальное уравнение, представленное в обобщённых функциях:

$$LU(x) = q(x) + \sum \mu_k \delta^{(k)}(S) + \sum \gamma_k \delta^{(k)}(S), \quad (4)$$

где $q(x)$ в задачах механики – внешняя нагрузка,

$\delta^{(k)}(S)$ – дельта-функции и их производные, сосредоточенные на границе области S ,

μ_k – заданные значения функции $u(x)$ и её производных на границах области S ,

γ_k – неизвестные значения функции $u(x)$ и её производных на границах области S

При решении динамических задач в правых частях дифференциальных уравнений появляются начальные условия. Такое представление дифференциальных уравнений будем называть «представление уравнений в обобщённых функциях». Методику решения задач строительной механики на основании теорем Коши представим на примере балок на упругом основании.

Полубесконечная балка на упругом основании

В качестве примера рассмотрим полубесконечную балку на упругом основании (Рис.3). Классическое дифференциальное уравнение прогиба балки на упругом основании:

$$EI \frac{d^4 u}{dx^4} + ku = q(x), \quad (5)$$

представим в обобщённых функциях, используя функцию:

$$U(x) = \theta(x)u(x), \quad (6)$$

которая совпадает с искомой функцией при $x \geq 0$ и равна нулю при $x < 0$.

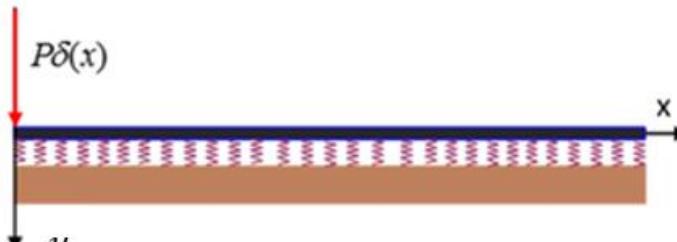


Рисунок 3 -Модель полубесконечной балки на упругом основании

Найдем первую производную произведения (6)

$$\frac{dU}{dx} = EI \left\{ \frac{du(x)}{dx} \theta(x) + u(x)\delta(x) \right\} = \left\{ \frac{du(x)}{dx} \theta(x) + u(0)\delta(x) \right\} \quad (7)$$

Использовалось следующее свойство дельта функции $u(x)\delta(x) = u(0)\delta(x)$

Производная четвёртого порядка функция $U(x)$ имеет вид:

$$\frac{d^4 U}{dx^4} = \frac{d^4 u(x)}{dx^4} [\theta(x)] + u(0)\delta'''(x) + u'(0)\delta''(x) + u''(0)\delta'(x) + u(0)\delta'''(x) \quad (8)$$

Подставляя полученное выражение в исходное уравнение, получим уравнение в обобщённых функциях:

$$EI \frac{d^4 U}{dx^4} + kU = EI[u(0)\delta'''(x) + u'(0)\delta''(x) + u''(0)\delta'(x) + u(0)\delta'''(x)] \quad (9)$$

Разделив левую и правую части уравнения (9), на жёсткость при изгибе и введём обозначение $\frac{k}{EI} = 4\beta^4$. Учитывая заданные граничные условия:

$$u''(0) = -\frac{P}{EI}; \quad u''(0) = \frac{M}{EI} = 0; \quad (10)$$

$$\text{получим: } \frac{d^4 U}{dx^4} + 4\beta^4 U = \frac{P}{EI} \delta(x) + u'(0)\delta''(x) + u(0)\delta'''(x) \quad (11)$$

Применим преобразование Фурье к обеим частям уравнения:

$$\tilde{u}(v)[(-iv)^4 + 4\beta^4] = \frac{P}{EI} + u'(0)(-iv)^2 + u(0)(-iv)^3 \quad (12)$$

Изображение Фурье функции прогиба балки имеет вид:

$$\tilde{u}(v) = \frac{-u'(0)v^2 - u(0)iv^3 + \frac{P}{EI}}{v^4 + 4\beta^4} \quad (13)$$

При выполнении прямого преобразования Фурье используется следующее представление:

$$\tilde{u}(v) = \int_{-\infty}^{\infty} u(x)e^{ivx}dx$$

и следующие свойства дельта функций и её производных $F[D^\alpha \delta] = (-iv)^\alpha$

Параметры: угол поворота $u'(0)$ и прогиб $u(0)$ в начале координат - аналогичны константам интегрирования, которые определим в области изображений, используя теоремы Коши, не находя общих решений.

Для определения функции прогиба необходимо выполнить обратное преобразование Фурье следующего выражения

$$u(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{-u'(0)v^2 - u(0)iv^3 + \frac{P}{EI}}{v^4 + 4\beta^4} e^{-ivx} dv \quad (14)$$

Подынтегральное выражение представляет собой комплексную функцию комплексного переменного. Поскольку плоскость v двумерна ($Re v, Im v$), существует большая свобода в понимании того, что представляет собой комплексный интеграл. Интегрирование функций комплексного переменного выполняется вдоль линий, называемых путём или контуром интегрирования [4,13]. Результатом вычисления интеграла по контуру является комплексное число или выражение. В отличие от аналога для действительных переменных, эта величина не имеет физической интерпретации, например площади под кривой. Для вычисления интеграла воспользуемся интегрированием по контуру и теоремой Коши о вычетах.

Для этой цели найдём корни знаменателя подынтегрального выражения $v^4 + 4\beta^4 = 0$. При извлечении корней и возведения в степень комплексных чисел удобно использовать представление чисел в полярной форме. Поэтому представим корни в двух формах:

$$\begin{aligned} v_1 &= \sqrt{2}\beta e^{i\frac{\pi}{4}} = \beta(1+i); & v_2 &= -\sqrt{2}\beta e^{-i\frac{\pi}{4}} = -\beta(1-i); \\ v_3 &= -\sqrt{2}\beta e^{i\frac{3\pi}{4}} = -\beta(1+i); & v_4 &= \sqrt{2}\beta e^{-i\frac{3\pi}{4}} = \beta(1-i). \end{aligned} \quad (15)$$

Расположение корней на комплексной плоскости представлено на рисунке 4.

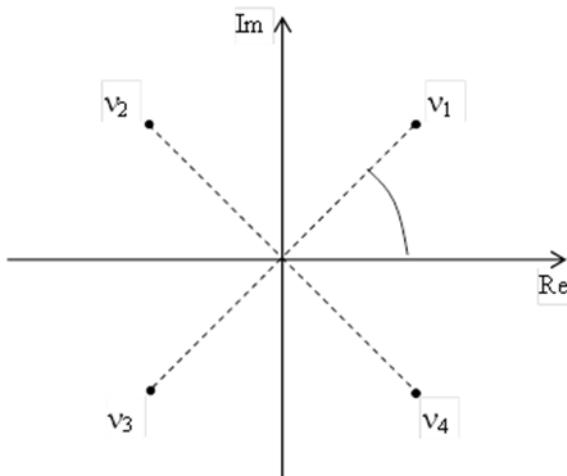


Рисунок 4 - Схема расположения корней знаменателя подынтегрального выражения на комплексной плоскости

Учитывая, что подынтегральное выражение на контуре С при больших значениях радиуса при $x>0$ стремится к нулю для вычисления несобственного интеграла- функции $u(x)$ при $x>0$, выберем замкнутый контур, состоящий из дуги, расположенной в нижней полуплоскости и действительной оси (Рис.5).

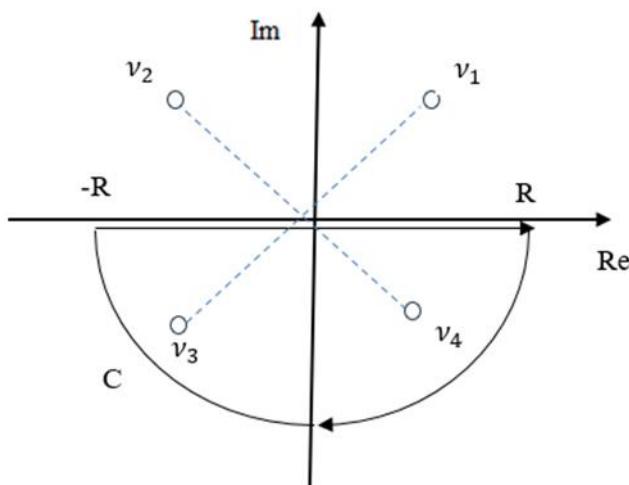


Рисунок 5 - Контур интегрирования для вычисления интеграла (14) при $x>0$

В соответствии с теоремой Коши интеграл, взятый по замкнутому контуру равен сумме вычетов относительно всех особых точек, попадающих внутрь контура. В нашем случае это точки v_3 и v_4 . Ввиду того, что подынтегральная функция имеет вид: $\psi(v) = \frac{F(v)}{G(v)}$, где $F(v) \neq 0$ при $v=v_3$ и $v=v_4$ и производные знаменателя $G'(v_3) \neq 0$ и $G'(v_4) \neq 0$ так же в этих точках не равны нулю, вычеты $\psi(v)$ определяются выражениями:

$$\text{Выч. } \psi(v) = \frac{F(v_3)}{G'(v_3)} + \frac{F(v_4)}{G'(v_4)} \quad (16)$$

Используя эти соотношения представим интеграл (23) в виде суммы вычетов:

$$u(x) = \frac{2\pi i}{2\pi} \frac{1}{4} \left\{ \left[-iu(0) - \frac{u'(0)}{v_3} + \frac{P}{v_3^3 EI} \right] e^{-iv_3 x} + \left[-iu(0) - \frac{u'(0)}{v_4} + \frac{P}{v_4^3 EI} \right] e^{-iv_4 x} \right\} \quad (17)$$

Отметим, что в полученном выражении находятся два неизвестных параметра угол поворота $u'(0)$ и перемещение конца балки $u(0)$. Для определения этих параметров воспользуемся интегральной теоремой Коши.

Для определения функции $u(x)$ при $x<0$, необходимо выбрать замкнутый контур, состоящий из дуги, расположенной в верхней полуплоскости и действительной оси (рисунок 6).

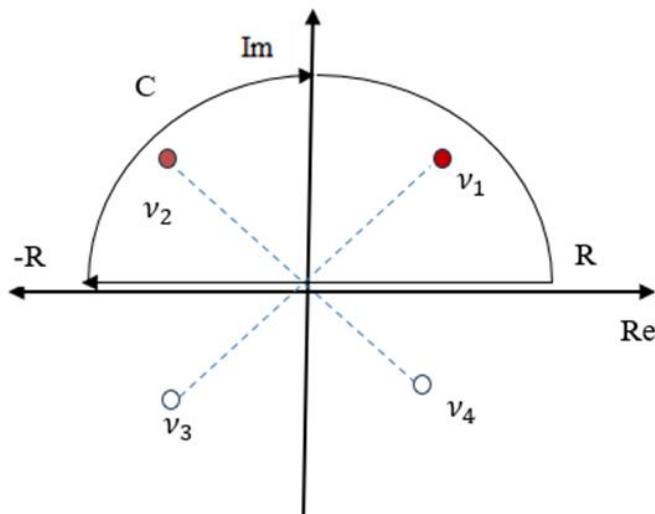


Рисунок 6 - Контур интегрирования для вычисления интеграла (14) при $x<0$

Так как при $x < 0$ функция должна быть тождественно равна нулю $u(x) = 0$, интеграл по замкнутому контуру, состоящему из действительной оси и дуги полуокружности, должен быть равен нулю. В соответствии с интегральной теоремой таком случае функция в замкнутом контуре должна быть аналитической. Поэтому в верхней полуплоскости не должно быть особых точек (на рисунке отмечены красным цветом). Для того, чтобы исчезли эти особые точки, необходимо чтобы числитель делился без остатка на $(v - v_1)$ и $(v - v_2)$.

Аналитическую функцию можно аппроксимировать с любой степенью точности многочленом (теорема Вейерштрасса) [11,12]. Обозначим числитель $G(v)$. В соответствии с теоремой Безу остаток от деления многочлена на одночлен $(v - v_i)$, который равен значению делимого при $v = v_i$ должен быть равен нулю: $G(v_i) = 0$. Таким образом, получаем систему двух уравнений для определения угла поворота $u'(0)$ и перемещения конца балки $u(0)$.

$$\begin{aligned} -u'(0)v_1^2 - u(0)i\nu_1^3 + \frac{P}{EI} &= 0 \\ -u'(0)v_2^2 - u(0)i\nu_2^3 + \frac{P}{EI} &= 0 \end{aligned} \quad (18)$$

Коэффициентами этой системы уравнений являются корни знаменателя подынтегрального выражения ν_1 и ν_2 в соответствующих степенях. Решив систему уравнений, получим:

$$u(0) = -\frac{P}{2\beta^3 EI}; \quad u'(0) = \frac{P}{2\beta^2 EI} \quad (19)$$

Подставив найденные значения в решение (26), представленное в виде суммы вычетов, получим:

$$u(x) = \frac{P}{2EI\beta^3} e^{-\beta x} \cos \beta x \quad (20)$$

Для определения прогиба полу бесконечной балки от пары сил, приложенной к концу балки с моментом равным M необходимо в уравнении (20) заменить сосредоточенную силу сосредоточенной парой сил. В результате получим:

$$\frac{d^4 u}{dx^4} + 4\beta^4 u = \frac{M}{EI} \delta'(x) + u'(0)\delta''(x) + u(0)\delta'''(x) \quad (21)$$

Таким же образом можно определить изгиб балки на заданные кинематические воздействия: угол поворота $EIu'(0)\delta''(x)$ и $EIu(0)\delta'''(x)$

Отметим, что все эти воздействия имеют размерности распределённой нагрузки.

Балка конечной длины

В качестве второго примера краевой задачи рассмотрим балку конечной длины на упругом основании (рисунок 7).

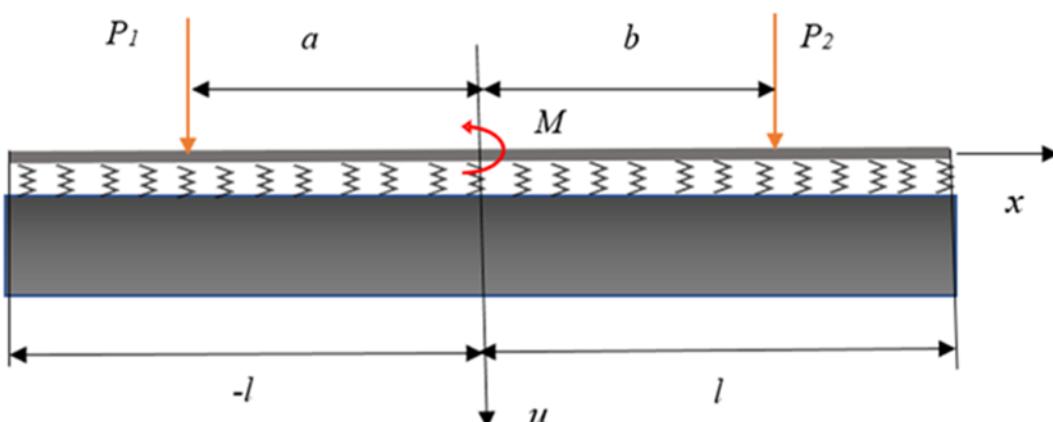


Рисунок 7 - Модель балки конечной длины на упругом основании

Внешняя нагрузка: $q(x) = P_1\delta(x + a) + M\delta'(x) + P_3\delta(x - b)$

Заданные граничные условия: $Q(-l) = 0; Q(l) = 0; M(-l) = 0; M(l) = 0.$

Неизвестные граничные условия: $u(-l); u'(-l); u(l); u'(l)$

Дифференциальное уравнение изгиба балки имеет вид:

$$EI \frac{d^4u}{dx^4} + ku = q(x) \quad (22)$$

Представим дифференциальное уравнение в обобщенных функциях. Для этой цели запишем функцию прогиба в виде произведения:

$$U(x) = u(x)[\theta(x+l) - \theta(x-l)] \quad (23)$$

Выражение $[\theta(x+l) - \theta(x-l)]$ представляет собой разность функций Хэвисайда и имеет следующий вид:

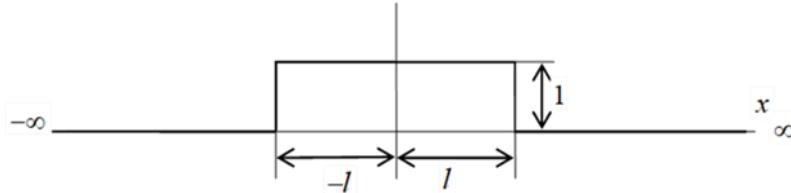


Рисунок 8 - Разность Функций Хэвисайда

Производная первого порядка:

$$EI \frac{dU}{dx} = EI \left\{ \frac{du(x)}{dx} [\theta(x+l) - \theta(x-l)] + u(x)\delta(x+l) + u(x)\delta(x-l) \right\} \quad (24)$$

Производная четвёртого порядка финитной на интервале $[-l, l]$ функция имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{d^4U}{dx^4} &= \frac{d^4u(x)}{dx^4} [\theta(x+l) - \theta(x-l)] + u(-l)\delta'''(x+l) + u(l)\delta'''(x-l) + \\ &u'(-l)\delta''(x+l) + u'(l)\delta''(x-l) + u''(-l)\delta'(x+l) + u''(l)\delta'(x-l) + \\ &+ u'''(-l)\delta(x+l) + u'''(l)\delta(x-l) \end{aligned} \quad (25)$$

Подставляя полученное выражение в уравнение (21), получим дифференциальное уравнение в обобщенных функциях:

$$\begin{aligned} EI \frac{d^4U}{dx^4} + kU &= q(x) + EIu(-l)\delta'''(x+l) - \\ &- EIu(l)\delta'''(x-l) + +EIu'(-l)\delta''(x+l) - EIu'(l)\delta''(x-l) + \\ &+ M(-l)\delta'(x+l) - M\delta'(x-l) + +Q(-l)\delta(x+l) - Q(l)\delta(x-l) \end{aligned} \quad (26)$$

Учитывая известные граничные условия: равенство нулю моментов и поперечных сил на концах балки, получим:

$$\begin{aligned} EI \frac{d^4U}{dx^4} + kU &= q(x) + EIu(-l)\delta'''(x+l) - EIu(l)\delta'''(x-l) + \\ &+ EIu'(-l)\delta''(x+l) - EIu'(l)\delta''(x-l) \end{aligned} \quad (27)$$

Введем обозначение для правой части уравнения, в которую входит нагрузка и граничные условия $\Psi(x)$, для которого напрашивается название «обобщенная нагрузка». Преобразуем полученное уравнение, разделим левую и правую части на жёсткость при изгибе EI и применим преобразование Фурье. В результате получим:

$$\tilde{U}(v)[v^4 + 4\beta^4] = \frac{1}{EI} \tilde{\psi}(v) \quad (28)$$

Из которого следует:

$$\tilde{U}(v) = \frac{1}{EI} \frac{\tilde{\psi}(v)}{v^4 + 4\beta_2^4} \quad (29)$$

где изображение Фурье обобщённой нагрузки определяется выражением:

$$\begin{aligned} \tilde{\psi}(v) &= \tilde{q}(v)/EI + [u'(-l)(-iv)^2 e^{-ivl} + u(-l)(-iv)^3 e^{-ivl} \\ &- u'(l)(-iv)^2 e^{ivl} - u(l)(-iv)^3 e^{ivl}] \end{aligned} \quad (30)$$

Изображение Фурье внешней нагрузки

$$\tilde{q}(v) = P_1 e^{-iva} + M(iv) + P_2 e^{ivb} \quad (31)$$

Для определения функции перемещений необходимо выполнить обратное преобразование Фурье функции, определяемой выражением (29), в котором содержится четыре неизвестных параметра. Для определения этих параметров воспользуемся теоремой Винера-Пэли-Шварца [15,16], утверждающей, что преобразование Фурье финитной функции – целая функция. Для того чтобы функция $\tilde{U}(\nu)$ была целой, необходимо чтобы числитель содержал нули знаменателя, т. е. должны выполняться четыре условия:

$$\tilde{\psi}(\nu_j) = 0, j = 1,2,3,4 \quad (32)$$

где ν_j – корни уравнения: $\nu^4 + 4\beta^4 = 0$;

$$\nu_1 = \beta(1+i); \nu_2 = \beta(-1+i); \nu_3 = -\beta(1+i); \nu_4 = \beta(1-i);$$

Уравнения (32) представляют собой систему четырёх уравнений с четырьмя неизвестными. Решив полученную систему четырёх уравнений с четырьмя неизвестными, подставим найденные значения в выражения $\tilde{U}(\nu)$. Таким образом определяется изображение Фурье функции прогиба конечной балки при заданных граничных условиях. Для выполнения обратного преобразования Фурье воспользуемся алгоритмом дискретного быстрого преобразования Фурье. При дискретизации будем применять теорему Котельникова, широко используемую в теории передачи информации [17]. В соответствии с этой теоремой изображения Фурье финитной на интервале $(-l,l)$ функции однозначно без потери информации определяется в точках, определяемых выражением:

$$\nu_j = \frac{k\pi}{l} \quad (k = 0, \mp 1, \mp 2, \dots) \quad (33)$$

Динамические задачи с начальными условиями

В качестве примера рассмотрим колебания простейшей динамической системы (Рис. 9).

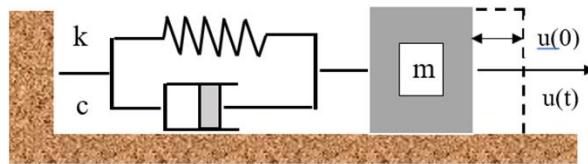


Рисунок 9 - Модель простейшей колебательной системы

Представим уравнение, описывающее свободные колебания простейшей колебательной системы:

$$m \frac{d^2u}{dt^2} + c \frac{du}{dt} + ku = 0 \quad (34)$$

в обобщённых функциях, используя следующее представление искомой функции:

$$U(t) = u(t)\theta(t) \quad (35)$$

где $\theta(t)$ – единичная ступенчатая функция (функция Хэвисайда):

$$\theta(t) = \begin{cases} 0, & t < 0, \\ 1, & t > 0 \end{cases} \quad (36)$$

Первая и вторая производные этой функции имеют вид:

$$\frac{dU}{dt} = \frac{du}{dt}\theta(t) + u(0)\delta(t), \quad (37)$$

$$\frac{d^2U}{dt^2} = \frac{d^2u}{dt^2}\theta(t) + u(0)\dot{\delta}(t) + \dot{u}(0)\delta(t), \quad (38)$$

где $\delta(t)$ и $\dot{\delta}(t)$ – дельта функция и её производная.

При вычислении производных используется следующее фильтрующее свойство дельта функций: $u(t)\delta(t) = u(0)\delta(t)$. Так как функция $U(t)$ и её производные равны нулю при $t < 0$, а при $t > 0$ эта функция и её производные совпадают с функцией $u(t)$ и её производными,

значения $u(0)$ и $\dot{u}(0)$ представляют собой начальное смещение и начальную скорость. Таким образом, уравнение (34) в обобщённых функциях принимает вид:

$$m \frac{d^2 U}{dt^2} + c \frac{dU}{dt} + kU = mu(0)\dot{\delta}(t) + m\dot{u}(0)\delta(t) + cu(0)\delta(t). \quad (39)$$

В правой части этого уравнения содержится информация о начальных условиях и если задано внешнее воздействие выражение силы $p(t)$. Преобразуем уравнение (34), разделив на массу и введя относительный коэффициент демпфирования. Разделив левую и правую части уравнения (10) на массу, получим:

$$\ddot{u} + 2\xi\omega_n\dot{u} + \omega_n^2 u = u(0)\dot{\delta}(t) + \dot{u}(0)\delta(t) + 2\xi\omega_n u(0)\delta(t) \quad (40)$$

где $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$ – частота собственных колебаний системы без учёта демпфирования,

$\xi = \frac{c}{c_{cr}} = \frac{c}{2m\omega_n}$ – относительный коэффициент демпфирования (отношение реального демпфирования к критическому).

Коэффициент критического демпфирования определяется зависимостью:

$$c_{kp} = 2m\omega_n = 2\sqrt{km} = \frac{2k}{\omega_n} \quad (41)$$

В современных нормативных документах и технической литературе, посвящённой вопросам динамики сооружений для описания демптирующих свойств, используется относительный коэффициент демпфирования, который наиболее удобен по сравнению с декрементом и логарифмическим декрементом колебаний [8,14].

Пояснение и физический смысл этого параметра будет представлен ниже после получения решения. В качестве примера приведём рекомендуемые значения относительных коэффициентов демпфирования из документа [8] при напряжениях, не превышающих $\frac{1}{2}$ предела текучести. Для сварных стальных и слабо трещиноватых преднапряжённых железобетонных конструкций $\xi = (0.02–0.03)$. Для стальных болтовых и трещиноватых предварительно напряженных железобетонных $\xi = 0.05 – 0.07$. В общем можно отметить, что относительный коэффициент демпфирования строительных конструкций не превышает 0, 1.

Применив преобразование Фурье к обеим частям уравнения, получим уравнение:

$$(-i\omega)^2 \tilde{u} + 2\xi\omega_n(-i\omega)\tilde{u} + \omega_n^2 \tilde{u} = u(0)(-i\omega) + 2\xi\omega_n u(0) + \dot{u}(0) \quad (42)$$

из которого следует:

$$\tilde{u}(\omega) = -\frac{u(0)[(-i\omega)+2\xi\omega_n]+\dot{u}(0)}{\omega^2+2\xi i\omega_n\omega-\omega_n^2} \quad (43)$$

При определении изображений Фурье используются следующие свойства преобразований Фурье $\dot{u}(t) \Rightarrow (-i\omega)\tilde{u}(\omega)$; $\ddot{u}(t) \Rightarrow (-i\omega)^2 \tilde{u}(\omega)$ и $\delta(t) \Rightarrow (-i\omega)$. Для получения функции перемещений, зависящей от времени, необходимо выполнить обратное преобразование Фурье:

$$u(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{u(0)[(-i\omega)+2\xi\omega_n]+\dot{u}(0)}{\omega^2+2\xi i\omega_n\omega-\omega_n^2} e^{-i\omega t} d\omega \quad (44)$$

При вычислении интеграла воспользуемся теоремой Коши о вычетах. Для этой цели найдём корни знаменателя подынтегрального выражения:

$$\omega^2 + 2\xi i\omega_n\omega - \omega_n^2 = 0 \quad (45)$$

Корни определяются выражением:

$$\omega_{1,2} = -\xi i\omega_n \pm \omega_n \sqrt{1-\xi^2} \text{ или } \omega_{1,2} = -\xi i\omega_n \pm \omega_d \quad (46)$$

где $\omega_d = \omega_n \sqrt{1-\xi^2}$ – собственная частота колебаний системы с демпфированием.

Положим, что значения относительного коэффициента удовлетворяют неравенству $0 < \xi < 1$. В таком случае оба корня знаменателя расположены в нижней комплексной полуплоскости. Выберем контур интегрирования, состоящий из действительной оси и дуги бесконечно большого радиуса R , расположенной в нижней полуплоскости (Рис10).

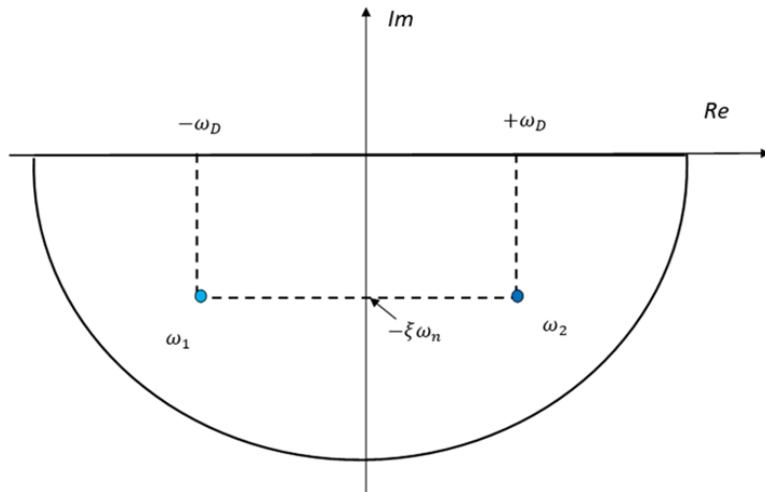


Рисунок 10 - Контур интегрирования для вычисления интеграла (44) при $0 < \xi < 1$

При положительных значениях времени $t \geq 0$ подынтегральная функция на дуге окружности стремиться к нулю, так как мнимая часть комплексной переменной ω принимает большие отрицательные значения на дуге R. В соответствии с теоремой Коши о вычетах интеграл по замкнутому контуру равен произведению сумме вычетов относительно изолированных особых точек, попадающих внутрь контура, на $2\pi i$. Если подынтегральная функция $f(\omega)$ имеет вид $f(\omega) = \frac{\varphi(\omega)}{h(\omega)}$, а функция $h(\omega)$ имеет простой ноль при $\omega = \omega_1$ (т. е. $h(\omega_1) = 0$), вычет определяется по формуле:

$$\text{Res}[f(\omega)]_{\omega_1} = \frac{\varphi(\omega_1)}{h'(\omega_1)} \quad (47)$$

Представим интеграл (44) в виде суммы двух интегралов. Первый интеграл соответствует движению при заданном начальном смещении и при начальной скорости равной нулю:

$$U_1(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{u(0)(-i\omega + \xi\omega_n)}{\omega^2 + 2i\xi\omega_n\omega - \omega_n^2} e^{-i\omega t} d\omega \quad (48)$$

Второй интеграл соответствует движению при заданной начальной скорости:

$$U_2(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\dot{u}(0) + \xi\omega_n u(0)}{\omega^2 + 2i\xi\omega_n\omega - \omega_n^2} e^{-i\omega t} d\omega \quad (49)$$

Интеграл $U_1(t)$ равен сумме двух вычетов, умноженных на $2\pi i$:

$$U_1(t) = \frac{2\pi i}{2\pi} \left\{ \text{Res} \left[\frac{[U(0)](-i\omega + \xi\omega_n)e^{-i\omega t}}{\omega^2 + 2i\xi\omega_n\omega - \omega_n^2} \right]_{\omega=\omega_1} \right\} + \\ + \frac{2\pi i}{2\pi} \left\{ \text{Res} \left[\frac{[U(0)](-i\omega + \xi\omega_n)e^{-i\omega t}}{\omega^2 + 2i\xi\omega_n\omega - \omega_n^2} \right]_{\omega=\omega_2} \right\} \quad (50)$$

Для вычисления вычетов понадобятся значения выражений производных знаменателя подынтегральной функции на корнях знаменателя.

Знаменатель подынтегральной функции: $h(\omega) = \omega^2 + 2i\xi\omega_n\omega - \omega_n^2$.

Производная знаменателя подынтегральной функции: $\frac{dh(\omega)}{d\omega} = 2\omega + 2i\xi\omega_n$

Подставляя значения корней в выражение (48), предварительно найдя производную знаменателя, получим:

$$U_1(t) = u(0) \frac{1}{2} [e^{-i\omega_D t} + e^{+i\omega_D t}] e^{-\xi\omega_n t} \quad \text{или} \\ U_1(t) = e^{-\xi\omega_n t} u(0) \cos \omega_D t \quad (51)$$

Вычисляя подобным образом интеграл (44), опуская промежуточные выкладки, получим:

$$U_2(t) = e^{-\xi\omega_n t} \frac{\dot{u}(0) + \xi\omega_n u(0)}{\omega_D} \sin \omega_D t \quad (52)$$

Уравнение движения массы при задании начальной скорости и начального смещения:

$$U(t) = e^{-\xi \omega_n t} \left[u(0) \cos \omega_D t + \frac{u(0) + \xi \omega_n u(0)}{\omega_D} \sin \omega_D t \right] \quad (53)$$

Вид функций, описывающих движение системы с одной степенью свободы с различными коэффициентами демпфирования

В названии раздела не случайно используется слово движение вместо слова колебание. Это связано с тем, что при некоторых значениях параметра относительного демпфирования движение перестаёт быть колебательным.

Для определения физического смысла критического и относительного демпфирования рассмотрим решения с различными коэффициентами демпфирования.

Для этой цели удобно проанализировать движение системы, выведенной из состояния равновесия и отпущененной без начальной скорости:

$$U_1(t) = e^{-\xi \omega_n t} u(0) \cos \omega_D t \quad (54)$$

При условии $0 < \xi < 1$ система совершает затухающие колебания с малым коэффициентом демпфирования. Расположение корней подынтегрального выражения в таком случае имеет вид, представленный на рисунке 10. При $\xi = 0$ корни знаменателя действительные – расположены на действительной оси (рисунок 11). Решение описывает свободные не затухающие колебания. Колебаний такого типа в природе не существует, так как любые колебания не продолжаются бесконечно долго.

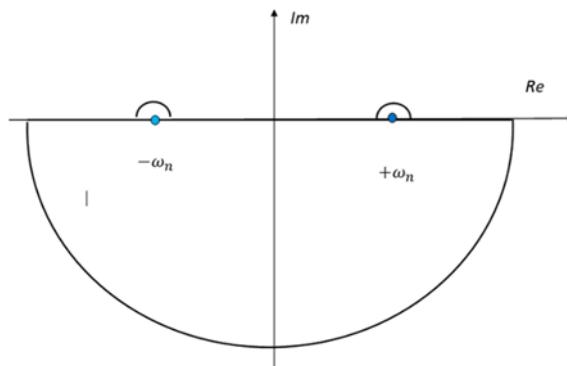


Рисунок 11 - Корни знаменателя подынтегрального выражения при $\xi = 0$

Колебаний такого типа в природе не существует, так как любые колебания не продолжаются бесконечно долго. Расположение корней знаменателя при различных значениях относительного коэффициента демпфирования от 0 до 1 показано на рисунке 12.

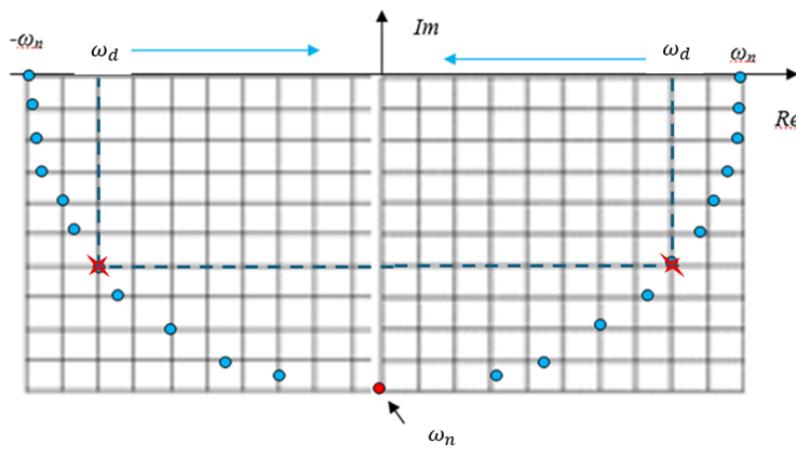


Рисунок 12 - Расположение корней знаменателя при значениях ξ от нуля до единицы

При $\xi = 0$ корни действительные и равны собственным частотам системы без демпфирования. При $\xi = 1$ корни кратные и чисто мнимые, равные $i\omega_n$. В качестве примера на комплексной плоскости звёздочкой обозначены корни системы с относительным коэффициентом демпфирования $\xi = 0,6$, $\omega_d = 0,8\omega_n$. Системы с такими большими относительными коэффициентами демпфирования используются в специальных конструкциях – в динамических абсорберах колебаний высотных зданий. Как уже отмечалось выше для строительных конструкций $\xi < 0,1$.

Примеры функций, описывающих колебания систем с разными относительными коэффициентами демпфирования: $0 < \xi < 1$; $\xi = 0$; $\xi = 1$ и $\xi > 1$, представлены на рисунке 13.

$\zeta < 1$ – при таком значении коэффициента демпфирования система, выведенная из состояния равновесия, совершают затухающие колебания.

$\zeta = 1$ – коэффициент демпфирования равен критическому c_{kp} , которое представляет собой наименьшее значение демпфирования с, при котором система, выведенная из состояния равновесия, без колебаний возвращается в состояние равновесия.

$\zeta > 1$ – при таком значении коэффициента демпфирования выведенная из состояния равновесия, без колебаний возвращается в состояние равновесия, но медленнее, чем при критическом коэффициенте демпфирования.

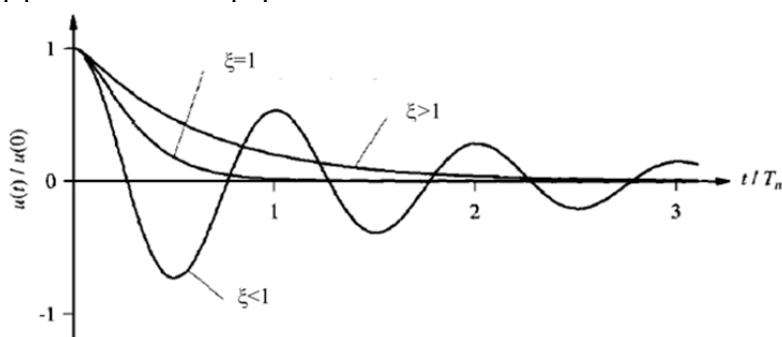


Рисунок 13 - Графики свободных колебаний системы с различными относительными коэффициентами демпфированием

Графики такого рода приведены во многих монографиях и учебных пособиях по теории колебаний, среди которых следует отметить капитальную работу Anil K. Chopra

DYNAMIC OF STRUCTURES Theory and Applications to Earthquake Engineering.

3. Результаты исследования и их анализ

Для приведенных выше моделей получены решения в аналитическом виде, которые согласуются с известными классическими вариантами решения данных задач. Метод хорошо применим для широкого спектра задач теоретической и строительной механики.

Для полубесконечной балки на упругом основании получены уравнения для определения перемещения и угла поворота, а также описана методика расчета при различных вариантах нагрузок.

В случае с балкой конечной длины видна универсальность метода при решении задач с различными начальными и граничными условиями. В данном случае четыре неизвестных параметра были найдены с использованием теоремы Винера-Пэли-Шварца, которая хорошо дополняет методику использования финитных функций.

При решении задачи колебательной системы с одной степенью свободы показана применимость метода для решения динамических задач. Получено уравнение движения массы при задании начальной скорости и начального смещения. Показана эффективность использования метода в динамических задачах с учетом критического и относительного демпфирования.

4. Заключение

1. Для решения задач строительной механики предлагается методика, в которой дифференциальные уравнения с начальными и граничными условиями записываются в обобщённых функциях. Это позволяет включить условия в саму структуру уравнений в виде дельта-функций и их производных.

2. После преобразования Фурье неизвестные параметры определяются с помощью теоремы Коши, а для получения окончательного решения используется обратное преобразование Фурье (аналитически по теореме о вычетах или численно с помощью БПФ). Данный метод является теоретической основой для построения конечных и граничных элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Владимиров В. С. Михайлов В.П. Ващарин А.А. и др. Сборник задач по уравнениям математической физики // Изд-во «Наука», главная редакция физико-математической литературы. Москва. 1981. С. 256.
2. Владимиров В. С. Обобщённые функции в математической физике // Изд-во «Наука» главная редакция физико-математической литературы. Москва. 1979. С. 318.
3. Араманович И.Г., Лунц Г.Л. Функции комплексного переменного. Операционное исчисление. Теория устойчивости // Изд-во «Наука», главная редакция физико-математической литературы. Москва. 1968. С. 416.
4. Маркушевич А.И. Краткий курс теории аналитических функций // Государственное издательство физико-математической литературы. Москва. 1961.
5. Сорокин Е. С. К теории внутреннего трения при колебаниях упругих систем // Академия строительства и архитектуры СССР. ЦНИИС строительных конструкций. Госстройиздат. 1960. С. 131
6. Сид Х. Б и Идрисс И. М. Модули грунта и коэффициенты затухания для анализа динамического отклика // Пред. №. 70-10, Центр исследований сейсмостойкого строительства, Инженерный колледж, Калифорнийский университет, Беркли, Калифорния. 1970.
7. Крамер С. Л. Геотехническое сейсмостойкое строительство. Прентисс Холл, Торонто, Канада. 1996.
8. Стандарт ASCE/SEI 4-16. Стандарт по сейсмическому анализу ядерных сооружений, связанных с безопасностью // Американское общество инженеров-строителей. Рестон, Вирджиния, 2017.
9. Гельфанд И. М., Шилов Г. Е. Обобщённые функции и действия над ними // Физмат, гиз. 1958.
10. Зельдович Я.Б., Мышкис А.Д. Элементы прикладной математики // Изд-во «Наука», главная редакция физико-математической литературы. Москва. 1972. С. 592.
11. Курош А. Г. Курс высшей алгебры // Изд-во «Наука», главная редакция физико-математической литературы. Москва. 1971. С. 431.
12. Хургин Я. И., Яковлев В.П. Финитные функции в физике и технике // Изд-во «Наука», главная редакция физико-математической литературы. Москва. 1971. С. 408.
13. Дафи Г. Высшая инженерная математика // CRC Press. 1998.
14. Чопра А. К. Динамика конструкций: теория и приложения к сейсмостойкому строительству // Прентисс Холл, Аппер Сэдл Ривер, Нью-Джерси. 2001.
15. Винер Н., Пэли Р. Преобразование Фурье в комплексной плоскости // Изд-во «Наука», главная редакция физико-математической литературы. Москва. 1964.
16. Курбацкий Е. Н. Метод решения задач строительной механики и теории упругости, основанный на свойствах изображений Фурье финитных функций // Дис. док. тех. наук. МИИТ, Москва. 1995. С. 205.
17. Котельников В.А. О пропускной способности «эфира» и проволоки в электросвязи // М.:Ред.упр. связи РККА. 1938.

REFERENCES

1. Vladimirov V.S., Mikhailov V.P., Vasharin A.A. et al. *Collection of problems on equations of mathematical physics*. Moscow: Nauka, 1981. 256 p. (In Russian)
2. Vladimirov V.S. *Generalized functions in mathematical physics*. Moscow: Nauka, 1979. 318 p. (In Russian)
3. Aramanovich I.G., Lunts G.L. *Functions of a complex variable. Operational calculus. Stability theory*. Moscow: Nauka, 1968. 416 p. (In Russian)
4. Markushevich A.I. *Brief course in the theory of analytic functions*. Moscow: State Publishing House of Physical and Mathematical Literature, 1961. (In Russian)

Теория инженерных сооружений. Строительные конструкции

5. Sorokin E.S. On the Theory of Internal Friction during Oscillations of Elastic Systems. Moscow: Gosstroyizdat, 1960. 131 p. (In Russian)
6. Seed H.B., Idriss I.M. *Soil moduli and damping factors for dynamic response analysis*. Report No. EERC 70-10. Berkeley: Earthquake Engineering Research Center, University of California, 1970.
7. Kramer S.L. *Geotechnical earthquake engineering*. Toronto: Prentice Hall, 1996.
8. American Society of Civil Engineers. *Seismic analysis of safety-related nuclear structures (ASCE/SEI 4-16)*. Reston: American Society of Civil Engineers, 2017.
9. Gelfand I.M., Shilov G.E. *Generalized functions and actions on them*. Moscow: Fizmatgiz, 1958. (In Russian)
10. Zeldovich Ya.B., Myshkis A.D. *Elements of applied mathematics*. Moscow: Nauka, 1972. 592 p. (In Russian)
11. Kurosh A.G. *Course in higher algebra*. Moscow: Nauka, 1971. 431 p. (In Russian)
12. Khurgin Ya.I., Yakovlev V.P. *Finite functions in physics and engineering*. Moscow: Nauka, 1971. 408 p. (In Russian)
13. Duffy D.G. *Advanced engineering mathematics*. Boca Raton: CRC Press, 1998.
14. Chopra A.K. *Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001.
15. Wiener N., Paley R. *Fourier transform in the complex plane*. Moscow: Nauka, 1964. (In Russian)
16. Kurbatskiy E.N. Method of solving problems of structural mechanics and elasticity theory based on the properties of Fourier images of finite functions. *Dissertation of Doctor of Technical Sciences*. Moscow: MIIT, 1995. 205 p. (In Russian)
17. Kotelnikov V.A. On the capacity of the "ether" and wire in telecommunications. *Materials for the First All-Union Congress on Questions of Technical Reconstruction of Communications and Development of the Low-Current Industry*. Moscow: Communications Department of the Red Army, 1938. (In Russian)

Информация об авторах

Курбатский Евгений Николаевич

академик РАТ, доктор технических наук, профессор кафедры «Мосты и тоннели», Российский университет транспорта (МИИТ), Российская Федерация, 127994, ГСП-4, г. Москва, ул. Образцова, д. 9;
e-mail: dynamic.miit@gmail.com

Зернов Иван Игоревич

АО «Мосгипротранс», Российская Федерация, 129626, г. Москва, ул. Павла Корчагина, 2;
e-mail: zernovivig@gmail.com

Information about authors

Kurbatskiy Evgeny N.,

Doctor of Sciences in Technology, Academician of the Russian Academy of Transport, professor Department of Bridges and Tunnels, Russian University of Transport (MIIT), 15, Obraztsova St, GSP-4, Moscow,
e-mail: dynamic.miit@gmail.com

Zernov Ivan I.,

Mosgiprotrans JSC, 2, Korchagina St, Moscow, 129626, Russian Federation;
e-mail: zernovivig@gmail.com

Статья поступила в редакцию 11.09.2025

Одобрена после рецензирования 09.10.2025

Принята к публикации 11.10.2025

The article was submitted 11.09.2025

Approved after reviewing 09.10.2025

Accepted for publication 11.10.2025

В.И. ТРАВУШ¹, Д.В. КОНИН², А.С. КРЫЛОВ², П.Д. АРЛЕНИНОВ³, Л.С. РОЖКОВА²,
А.А. ЖДАНОВА², Д.Н. ГАВРИЛОВ², М.И. ВЕДЯКОВ²

¹ ЗАО «ГОРПРОЕКТ», г. Москва, Россия

² Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций (ЦНИИСК) имени В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», г. Москва, Россия

³ Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона (НИИЖБ) им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», г. Москва, Россия

ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ ИЗГИБАЕМЫХ СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ЛИСТОВЫМ АРМИРОВАНИЕМ С УЧЕТОМ ТРЕЩИН

Аннотация. Рассмотрены вопросы работы сталежелезобетонных конструкций с листовым армированием на изгиб. Представлено описание исследуемых моделей, приведены особенности использованных при изготовлении моделей материалов и их характеристики. Приведены данные об экспериментальном оборудовании, схеме испытания и нагружения конструкций. Представлены общие виды и характер разрушения, графические результаты испытаний моделей на изгиб. Выполнено сравнение теоретических и экспериментальных данных по первой и второй группе предельных состояний – по прочности, прогибам и ширине раскрытия трещин. Даны оценка существующих нормативных подходов применительно к конструкциям с листовым армированием. На основе выполненных экспериментальных исследований предложены поправочные коэффициенты при расчете сталежелезобетонных конструкций с листовым армированием по второй группе предельных состояний.

Ключевые слова: бетон, сталь, железобетон, сталежелезобетонная конструкция, листовое армирование.

V.I. TRAVUSH¹, D.V. KONIN², A.S. KRYLOV², P.D. ARLENINOV³,
L.S. ROZHKOVA², A.A. ZHDANOVA², D.N. GAVRILOV², M.I. VEDYAKOV²

¹ Gorproject, Moscow, Russia

² JSC Research Center of Construction TSNIISK named after V.A. Koucherenko, Moscow, Russia

³ JSC Research Center of Construction NIIZHB named after A.A. Gvozdev, Moscow, Russia

STRENGTH AND DEFORMABILITY OF ELEMENTS WITH STEEL-PLATE REINFORCEMENT WITH BENDING CRACKS

Abstract. The features of the work composite steel and concrete structure with steel-plate reinforcement during bending are considered. The models are described, the features of the models, materials and their characteristics are given. The description of experimental equipment, schemes of testing and loading of structures is given. Schemes and types of fracture, graphical results of bending tests of models are presented. A comparison of theoretical and experimental data on the first and second groups of limiting states – strength, deflections, and crack opening width, has been performed. An assessment of the existing regulatory approaches in relation to composite steel and concrete structure with steel-plate reinforcement is given. Correction coefficients are proposed for the calculation for the second group of limit states of steel and concrete structure with steel-plate reinforcement.

Keywords: concrete, steel, reinforced concrete, composite steel and concrete structure, steel-plate reinforcement.

1. Введение

В современной строительной отрасли при проектировании наиболее ответственных зданий и сооружений как правило применяют решения на основе стальных, железобетонных или комбинированных (сталежелезобетонных) конструкций. За последние 50 лет внутри группы комбинированных конструкций сформировалось отдельное направление – конструкции с листовым армированием, в которых функцию рабочей арматуры выполняет листовая сталь с внешней стороны. На стадии монтажа листовое армирование выполняет функцию несъемной опалубки. Наибольшее распространение рассматриваемые конструкции получили в атомной отрасли, в высотном строительстве, а также при строительстве тоннелей и резервуаров. Исследованию конструкций с листовым армированием посвящен ряд научных трудов. Лидерами в области проектирования конструкций с листовым армированием являются США, Япония [1-7] и Южная Корея [8-10], где указанные конструкции используются при строительстве атомных станций. Зарубежными научными институтами выпущено большое количество методической и нормативной литературы, а также руководств по проектированию конструкций с листовым армированием. Значительные успехи по разработке руководящих документов достигнуты и в США [11-16].

В нашей стране изучение особенностей работы конструкций с листовым армированием началось с 60-х годов 20-го века [17, 18]. В последние годы отечественными авторами выполнен ряд экспериментальных и теоретических исследований работы конструкций с листовым армированием с применением современных, в том числе высокопрочных, материалов при действии кратковременных [19, 20] и длительных нагрузок [21].

Цель настоящей работы – выявить особенности работы конструкций с листовым армированием при изгибе при кратковременном статическом нагружении путем сравнения экспериментальных и расчетных данных.

2. Модели и методы

Для оценки фактической работы изгибаемых элементов с листовым армированием, а также для оценки точности существующих нормативных методик расчета применительно к конструкциям с листовым армированием было проведено несколько серий экспериментов, включающих 30 моделей (10 групп по 3 модели в каждой). Для исследования различных видов и механизмов разрушения конструкций с листовым армированием, модели можно разделить на две группы по характеру наступления предельного состояния: по нормальному (по сжатому бетону или растянутой арматуре), либо по наклонному сечению.

Модели групп М3.1-М3.7 представляют собой сталежелезобетонные балки с листовым армированием длиной 2000 мм и поперечным сечением размерами 200x700 мм. Класс бетона моделей по прочности на сжатие В30, стержневая арматура класса А500С. В качестве армирования использованы листы толщиной 4 и 8 мм из стали С355. Для обеспечения совместной работы листа с бетоном установлены гибкие упоры (болты М6) длиной 70 мм с шагом 70x70мм класса прочности 5.8. Листовое армирование было дополнительно усилено внутренними ребрами жесткости, установленными в продольном направлении из горячекатанных уголков 30x4 мм из стали С355, либо из листа 40x3 мм из стали С355. Внутренние ребра жесткости установлены для соответствия натурным конструкциям, в которых они выполняют подкрепляющую функцию, обеспечивая жесткость и геометрическую неизменяемость пространственных арматурных блоков при выполнении монтажных работ и бетонировании. Модели группы М3.1 представляют собой балки с двусторонним листовым армированием. Толщина листов 4 мм. Приопорные зоны армированы продольными ($\varnothing 12$ А500С) и поперечными ($\varnothing 10$ с шагом 70 мм) стержнями. Модели группы М3.2, М3.4 представляют собой балки с односторонним листовым армированием в растянутой зоне. Толщина листов 4 мм и 8 мм соответственно. Приопорные зоны армированы продольными и поперечными стержнями $\varnothing 10$ А500С с шагом 70 мм. Модели группы М3.3 представляют собой балки с односторонним листовым армированием в растянутой зоне.

Толщина листа 4 мм. Рабочая продольная арматура установлена на всю длину балок – Ø16 A500C в растянутой зоне, 5Ø12 A500C в сжатой зоне; поперечное армирование представлено хомутами Ø10 с шагом 70 мм. Модели групп М3.5-М3.7 представляют собой балки с односторонним листовым армированием в растянутой зоне. Толщина листов 4 мм и 8 мм. Рабочая продольная арматура Ø16 A500C установлена только в растянутой зоне в центральной части балок и не доведена до опор. При опорные зоны армированы продольными стержнями Ø8 A500C; поперечное армирование представлено хомутами Ø6 A500C с шагом 280 мм.

Модели групп B2.1, B2.2 представляют собой балки длиной 3000 мм с поперечным сечением 300x1100 мм. Класс бетона моделей по прочности на сжатие В30, стержневая арматура класса А500С. В качестве листового армирования использованы листы толщиной 4 мм из стали С345. Для обеспечения совместной работы листа с бетоном установлены гибкие упоры (болты М8) длиной 70 мм с шагом 70x70мм. Для обеспечения жесткости и геометрической неизменяемости пространственных блоков конструкций при выполнении монтажных работ и бетонировании листы противоположных граней соединены шпильками из арматурной стали Ø6 A500C с шагом 210x210 мм. В моделях B2.2 в растянутой и сжатой зоне расположены сетки из арматурных стержней Ø10 A500C с шагом 210x210 мм.

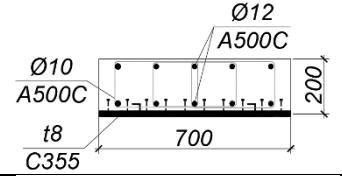
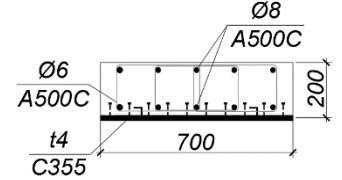
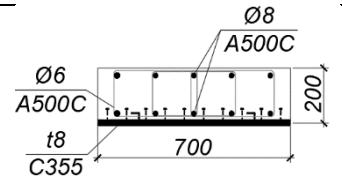
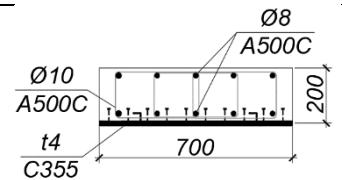
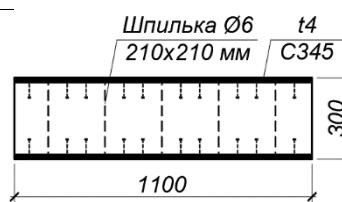
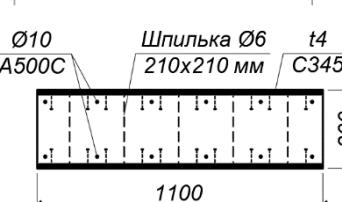
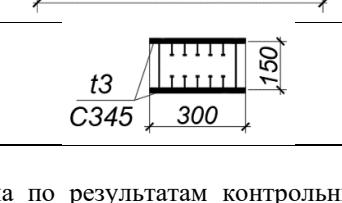
Модели группы М13 представляют собой сталежелезобетонные балки с листовым армированием длиной 2500 мм и поперечным сечением размерами 150x300 мм. Класс бетона моделей по прочности на сжатие В100. В качестве листового армирования использованы листы толщиной 3 мм из стали С345. Для обеспечения совместной работы листа с бетоном установлены гибкие упоры (болты М8) длиной 40 мм с шагом 40x40мм, класс прочности 5.8.

Фактические характеристики примененного стального проката: предел текучести листовой арматуры моделей групп М3.1-М3.7 толщиной 4 мм – 400 МПа, толщиной 8 мм – 429 МПа; для моделей B2.1, B2.2 – 385 МПа для листа толщиной 4 мм; для моделей М13 – 340 МПа для листа толщиной 3 мм. Характеристики исследуемых конструкций и общий вид поперечных сечений приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики исследуемых конструкций

Обозна- чение	Класс бетона	Сталь ЛА	Стержневая арматура	$\mu, \%$	Поперечное сечение в середине пролета
1	2	3	4	5	6
M3.1	B30 (25,6)	C355 (400,0)	A500C (Ø10 / 614,2; Ø12 / 577,5)	2,0%	
M3.2	B30 (25,6)	C355 (429,0)	A500C (Ø10 / 614,2; Ø12 / 577,5)	2,0%	
M3.3	B30 (38,0)	C355 (400,0)	A500C (Ø12 / 577,5; Ø16 / 577,5)	2,7%	

Продолжение таблицы 1

M3.4	B30 (34,2)	C355 (429,0)	A500C (Ø10 / 614,2; Ø12 / 577,5)	4,0%	
M3.5	B30 (25,6)	C355 (400,0)	A500C (Ø6 / 352,5; Ø8 / 612,5)	2,7%	
M3.6	B30 (43,4)	C355 (429,0)	A500C (Ø6 / 352,5; Ø8 / 612,5)	4,7%	
M3.7	B30 (34,2)	C355 (400,0)	A500C (Ø8 / 612,5; Ø10 / 614,2)	2,7%	
B2.1	B30 (43,5)	C345 (385,0)	-	1,3%	
B2.2	B30 (43,5)	C345 (385,0)	A500C (Ø10 / 567,0)	1,5%	
M13	B100 (87,0)	C345 (340,0)	-	2,0%	

Примечания.

1 В столбцах 2-4 в скобках указаны фактическая прочность стали и бетона по результатам контрольных испытаний в МПа.

2 В столбце 5 приведено значение коэффициента армирования μ сталежелезобетонной конструкции, рассчитанное в соответствии с положением 3.8 СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения».

3. Результаты исследования и их анализ

Нагружение моделей выполнялось согласно ГОСТ 8829-2018 «Изделия строительные железобетонные и бетонные заводского изготовления. Методы испытаний нагружением. Правила оценки прочности, жесткости и трещиностойкости». Испытания моделей проводились возрастающей нагрузкой с доведением моделей до разрушения. Нагружение производилось поэтапно ступенями не более 0,1 от контрольной нагрузки по прочности. На каждой ступени осуществлялась выдержка модели под нагрузкой. Показания измерительных приборов фиксировались на каждой ступени нагружения. Следующий этап нагружения выполнялся только после полного затухания деформаций в испытуемом образце. Нагрузка

на образцы прикладывалась плавно с постоянной скоростью избегая динамических эффектов. Испытания выполнялись до момента потери несущей способности элемента, который характеризовался ростом деформаций в моделях с одновременным падением величины прикладываемой нагрузки, либо до момента полного разрушения модели. В процессе эксперимента фиксировались: величины нагрузки на каждой ступени нагружения, относительные деформации, вертикальные перемещения, ширина раскрытия трещин, характер разрушения модели. Процесс испытаний и характер разрушения фиксировался путем выполнения фотосъемки. Все испытания проведены на гидравлическом прессе ПММ-1000 (MAN 1000), развивающим максимальную нагрузку до 10000 кН. Для определения деформаций моделей использованы датчики перемещений – электронные индикаторы типа Lwdt RM-100-T-KA-G111.112. Статическая схема опор и нагружения моделей приведена на рисунке 1, общий вид испытательной установки приведен на рисунке 2.

Разрушение моделей групп М3.1, В2.1, В2.2, М13 с двухсторонним листовым армированием происходило по нормальному сечению, по растянутой зоне в следствии достижения предельных прочностных характеристик в растянутой листовой арматуре. Разрушение сопровождалось обширным трецинообразованием, а также локальной потерей устойчивости листа сжатой зоны в промежутках между точками крепления к бетону.

Разрушение моделей групп М3.2-3.4 с односторонним листовым армированием происходило по нормальному сечению, в результате раздробления бетона сжатой зоны в центральной части пролета.

Разрушение моделей групп М3.5-М3.7 с односторонним листовым армированием происходило по наклонному сечению, разрушение характеризовалось образованием и раскрытием наклонной трещины между точкой опоры и приложения нагрузки.

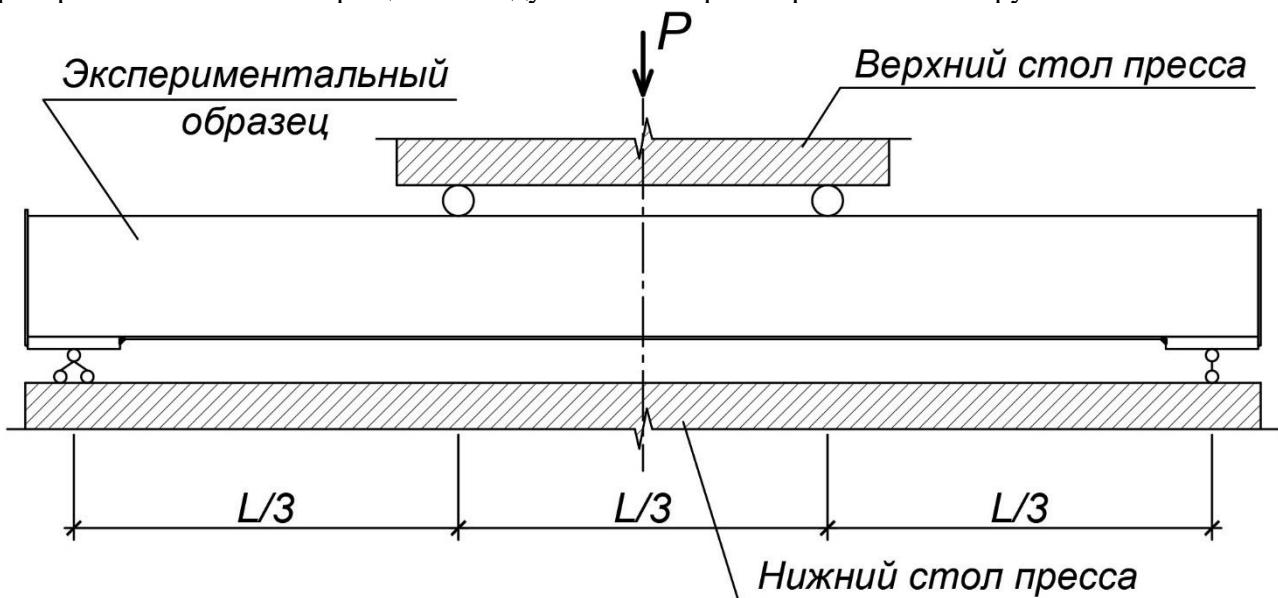


Рисунок 1 – Схема опирания и нагружения моделей

Для всех испытанных на изгиб моделей отмечена совместная работа листа и бетона вплоть до момента их разрушения. Также отмечено, что гибкие упоры, обеспечивающие совместность деформирования стального листа с бетоном, являются концентраторами при образовании и раскрытии трещин, нормальных к продольной оси элемента – все зафиксированные трещины располагаются с разным шагом, но имеют свое начало в местах установки болтов. Характерные виды разрушений испытанных моделей приведены на рисунках 2...5.



Рисунок 2 – Общий вид испытательной установки



Рисунок 3 – Характерное разрушение моделей группы М3.1



Рисунок 4 – Характерное разрушение моделей группы М3.2-3.4

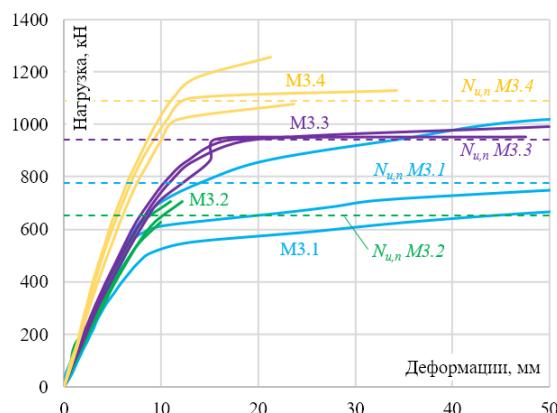


Рисунок 5 – Характерное разрушение моделей группы М3.5-3.7

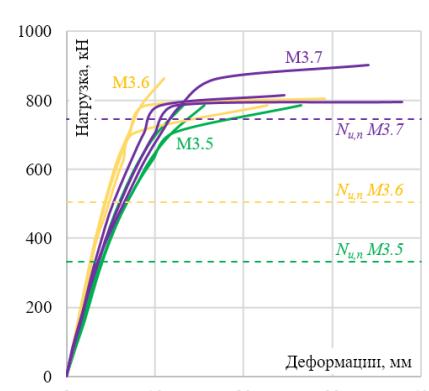
Графические зависимости вертикальных перемещений в середине пролета балок от нагрузки приведены на рисунке 6, где пунктирной линией отмечена теоретическая несущая способность моделей. На рисунке 7 показано раскрытие нормальных трещин в моделях под нагрузкой.

Полученные экспериментальные данные по предельным нагрузкам, вертикальным перемещениям и ширине раскрытия трещин были проанализированы и сопоставлены с результатами теоретических расчетов, выполненных на основе положений СП 63.13330.2018 с введением дополнительных слагаемых, учитывающих наличие листовой арматуры. Величина предельного изгибающего момента M_{ult} , который может быть воспринят сечением элемента, определена для общего случая изгибаемого элемента прямоугольного сечения с двухсторонним листовым и стречневым армированием (рисунок 8) по формуле:

$$M_{ult} = R_{yc}A_{p2}(h_0 - 0,5t_{p2}) + R_{sc}A_{s2}(h_0 - a') + R_b b(x - t_{p2})(h_0 - 0,5x - 0,5t_{p2}), \quad (1)$$



а) модели с разрушением по нормальному сечению



б) модели с разрушением по наклонному сечению

Рисунок 6 – Графическая зависимость вертикальных перемещений в середине пролета балок от нагрузки, где $N_{u,n}$ – нормативная предельная нагрузка

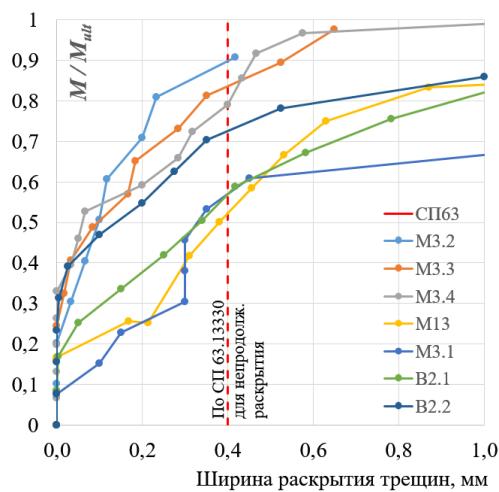


Рисунок 7 – Зависимость ширины раскрытия трещин от нагрузки

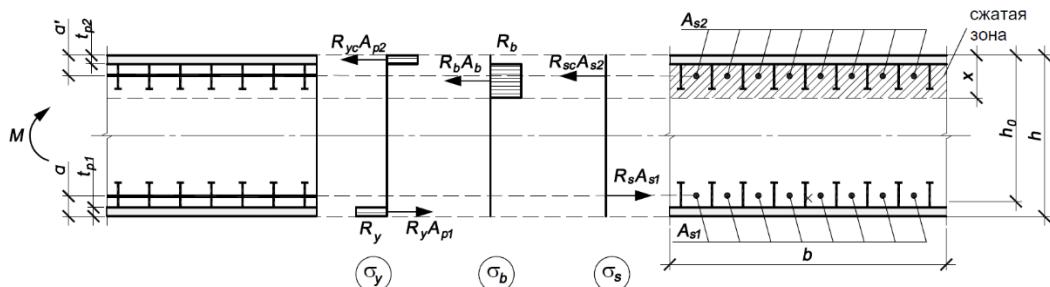


Рисунок 8 – Схема усилий и эпюра напряжений в сечении, нормальному к продольной оси изгибающего элемента с листовым и стержневым армированием, при расчете по прочности

При выполнении расчетов по формуле 1 использованы фактические физико-механические характеристики стали и бетона, полученные в результате испытания стандартных образцов; учтены ребра жесткости в виде уголков и полосовой стали, увеличивающие площадь растянутой арматуры. В таблице 2 представлено сопоставление результатов расчетов по первой группе предельных состояний с экспериментальными данными; в таблице 3 – приведено сравнение результатов по второй группе предельных состояний.

Отличие экспериментальных и теоретических данных при расчете по первой группе предельных состояний для моделей с разрушением по нормальному сечению, не превышает 11,0%, что является хорошим результатом. При расчете по наклонному сечению отличие находится в диапазоне от 11 до 59%, что объясняется наличием внутренних стальных элементов в виде продольных ребер жесткости, приваренных к листовому армированию, которые оказывают существенный вклад в несущую способность конструкции при работе на поперечную силу. В запас прочности указанные эффекты включения в работу вертикальных шпилек, дополнительных ребер можно не учитывать при расчете. Это является справедливым, так как при решении локальной экспериментальной лабораторной задачи распределение наклонных трещин может отличаться от фактического распределения. Для учета в расчетах дополнительных элементов (шпилек, ребер, вертикальных ферм и др.) к ним должны предъявляться требования по шагу расположения и анкеровки как к поперечной арматуре железобетонной конструкции.

Теория инженерных сооружений. Строительные конструкции

Таблица 2 – Сравнение величин несущей способности, полученной экспериментальным и теоретическим путем

№	Обозна- чение	Характер разрушения	Несущая способность, кН			Отклонение СП/эксперимент, %	
			Испытания		По СП 63.13330		
			на модель	среднее			
1	2	3	4	5	6	7	
1	M3.1.1	по нормальному сечению в растянутой зоне	1039,7	839,1	778,0	-7	
2	M3.1.2		775,9				
3	M3.1.3		701,4				
4	M3.2.1	поциальному сечению в сжатой зоне	735,7	732,5	652,4	-11	
5	M3.2.2		765,2				
6	M3.2.3		696,5				
7	M3.3.1	по нормальному сечению в сжатой зоне	990,8	964,6	940,5	-3	
8	M3.3.2		951,6				
9	M3.3.3		951,6				
10	M3.4.1	поциальному сечению в сжатой зоне	1079,1	1154,3	1088,6	-6	
11	M3.4.2		1255,7				
12	M3.4.3		1128,1				
13	M3.5.1	по наклонному сечению	853,5	809,3	332,0	-59	
14	M3.5.2		789,7				
15	M3.5.3		784,8				
16	M3.6.1	по наклонному сечению	804,4	817,5	505,5	-38	
17	M3.6.2		784,8				
18	M3.6.3		863,3				
19	M3.7.1	по наклонному сечению	794,6	837,1	744,5	-11	
20	M3.7.2		814,2				
21	M3.7.3		902,5				
22	B2.1.1	поциальному сечению в растянутой зоне	1157,5	1177,2	1078,3	-8	
23	B2.1.2		1167,4				
24	B2.1.3		1206,6				
25	B2.2.1	поциальному сечению в растянутой зоне	1220,1	1243,5	1216,2	-3	
26	B2.2.2		1255,2				
27	B2.2.3		1255,2				
28	M13.1	поциальному сечению в растянутой зоне	117,0	121,6	117,9	-3	
29	M13.2		130,7				
30	M13.3		117,0				

Таблица 3 – Сопоставление теоретических и экспериментальных данных по второй группе предельных состояний

Обозначе- ние	Перемещения, мм			Ширина раскрытия нормальных трещин, мм		
	Эксперимент	Расчет	Отклон., %	Эксперимент	Расчет	Отклон., %
1	2	3	4	5	6	7
M3.1	5,19	3,51	-32	0,20	0,25	27
M3.2	3,91	3,40	-13	0,20	0,30	49
M3.3	5,53	3,69	-33	0,13	0,19	45
M3.4	5,20	4,14	-20	-	-	-
M3.5	2,64	1,85	-30	-	-	-
M3.6	2,19	1,40	-34	-	-	-
M3.7	3,25	2,27	-30	-	-	-
B2.1	9,66	4,84	-49	0,58	0,31	-47
B2.2	9,61	4,99	-48	0,35	0,17	-50
M13	7,83	4,99	-36	0,38	0,18	-54

Примечание. В столбцах 2 и 5 приведены усредненные значения параметров для каждой группы, которая состоит из трех однотипных моделей.

Расчет ширины раскрытия трещин выполнен для с учетом фактического расстояния между нормальными трещинами.

Для всех экспериментальных моделей теоретическая несущая способность не превышает экспериментальную. Нормативные методики при расчете по первой группе предельных состояний показывают запас прочности применительно к рассматриваемым экспериментальным моделям и могут быть использованы как основа при проверке прочности конструкций с листовым армированием, работающим на изгиб.

При расчете по второй группе предельных состояний зафиксированы значительные отличия экспериментальных и теоретических данных: по ширине раскрытия трещин, нормальных к продольной оси элемента – до 54%, по прогибам – до 49%. Причем данные, полученные путем расчета по нормативной методике, для отдельных моделей меньше экспериментальных. Это свидетельствует о необходимости корректировки существующих нормативных методик расчета применительно к конструкциям с листовым армированием путем введения поправки к коэффициентам при определении ширины раскрытия трещин и прогибов элементов. При этом не отмечается зависимости отклонений результатов расчета и экспериментальных данных от коэффициента армирования поперечного сечения или класса прочности бетона.

Согласно разделу 8 СП 63.13330.2018 формула для расчета ширины раскрытия трещин имеет вид

$$a_{crc,i} = \varphi_1 \cdot \varphi_2 \cdot \varphi_3 \cdot \psi_s \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} \cdot l_s \quad (2)$$

где σ_s - напряжение в продольной растянутой арматуре в нормальном сечении с трещиной; l_s - базовое расстояние между смежными нормальными трещинами; ψ_s - коэффициент, учитывающий неравномерное распределение относительных деформаций растянутой арматуры между трещинами; φ_1 - коэффициент, учитывающий продолжительность действия нагрузки, принимаемый равным: 1,0 - при непродолжительном действии нагрузки; 1,4 - при продолжительном действии нагрузки; φ_2 - коэффициент, учитывающий профиль продольной арматуры, принимаемый равным: 0,5 - для арматуры периодического профиля и канатной; 0,8 - для гладкой арматуры; φ_3 - коэффициент, учитывающий характер нагружения, принимаемый равным: 1,0 - для элементов изгибаемых и внецентренно сжатых; 1,2 - для растянутых элементов.

Выше было отмечено, что шаг образования трещин связан с шагом гибких упоров. В связи с этим для расчета конструкций с листовым армированием предлагается базовое расстояние между смежными нормальными трещинами принять равным четырем шагам анкеров, но не более 400 мм. При этом коэффициент φ_2 , учитывающий профиль продольной арматуры, следует принимать равным 1,7 для конструкций с двухсторонним листовым армированием и 0,8 для конструкций с односторонним листовым армированием.

Согласно разделу 8 СП 63.13330.2018 формула для определения изгибной жесткости имеет вид:

$$D = E_{b,red} I_{red} \quad (3)$$

где D – изгибная жесткость приведенного поперечного сечения элемента, $E_{b,red} = \frac{R_b}{\varepsilon_{b1,red}}$, R_b – расчетное сопротивление бетона сжатию; $\varepsilon_{b1,red}$ – относительные деформации, принимаемые для тяжелого бетона при непродолжительном действии нагрузок $\varepsilon_{b1,red} = 0,0015$ (случай, соответствующий экспериментальным исследованиям).

При оценке прогибов по формуле (3) отмечено существенное превышение опытных величин над теоретическими, что свидетельствует о меньшей жесткости экспериментальных моделей. Для возможности более точной оценки работы конструкции предлагается ввести дополнительный поправочный коэффициент k_{sr} при вычислении жесткости моделей равный 0,65, который отражает особенности взаимодействия листового армирования с бетоном. Таким образом, формула для вычисления жесткости конструкций принимает вид:

$$D = k_{sr} E_{b,red} I_{red} \quad (4)$$

Перед введением дополнительных коэффициентов к жесткости, которая состоит из момента инерции приведённого сечения и интегральной величины модуля упругости стали и бетона рассмотрим возможное изменение указанных характеристик во времени. Это особенно актуально для конструкций, срок возведения которых достаточно большой – высотное строительство или атомная отрасль. При этом если момент инерции остается условно неизменной величиной, то модуль упругости со временем меняется. Методика Еврокода 2 (EN12390) позволяет по формулам (5-7) определить прочность бетона и модуль упругости в любой момент времени.

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) f_{cm} \quad (5)$$

$$\beta_{cc}(t) = \exp \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{0.5} \right] \right\} \quad (6)$$

$$E_{cm}(t) = \left(\frac{f_{cm}(t)}{f_{cm}} \right)^{0.3} \cdot E_{cm} \quad (7)$$

где t – время, сут, $s=0,25$ – постоянный коэффициент, зависящий от класса цемента (приведен для цемента класса N); f_{cm} – среднее значение цилиндрической прочности бетона в возрасте 28 сут; $f_{cm}(t)$ – среднее значение цилиндрической прочности бетона в возрасте t ; E_{cm} – начальный модуль упругости; $E_{cm}(t)$ – модуль упругости в возрасте t .

В таблице 4 приведены результаты расчета модуля упругости по формулам (5-7) Еврокода 2 EN 12390, а также экспериментальные данные по нарастанию прочности бетона и его модуля упругости во времени. Рассмотрены классы бетона по прочности на сжатие B25, B60, B90.

При анализе таблицы 4 видно, что скорость нарастания прочности бетона и его модуля упругости не зависит от класса по прочности на сжатие; основное нарастание характеристик происходит в первые полгода (например, при расчете модуля упругости в возрасте 10 лет прирост не превышает 7%).

Таблица 4 - Расчет прогноза набора изменения прочности бетона во времени и модуля упругости по формулам Еврокода EN 12390

Класс бетона	R_b , МПа				E_b , ГПа			
	28 сут.	180 сут.	360 сут.	Отклонение 180/360 от 28	28 сут.	180 сут.	360 сут.	Отклонение 180/360 от 28
1	2	3	4	5	6	7	8	9
B25	33,0	38,4	39,5	16,3/19,8%	31,0	32,4	32,7	4,6/5,6%
B60	68,0	79,1	81,4	16,3/19,8%	39,0	40,8	41,2	4,6/5,6%
B90	98,0	114,0	117,4	16,3/19,8%	44,0	46,0	46,4	4,6/5,6%

Приведенные в таблице 4 данные в целом согласуются с результатами экспериментов и подтверждается работами [22, 23, 24]. Исследования, выполненные авторами в работах [22, 23, 24], длительной прочности высокопрочных бетонов (B60-B100), твердеющих в условиях повышенной влажности (90%) и испытанных через 180 суток, показали значительные отличия прочностных характеристик относительно Еврокода EN 12390 – средняя призменная прочность по результатам эксперимента увеличилась от 4,5 до 9,5% в зависимости от класса. При этом было получено практически полное совпадение в определённом модуле упругости в возрасте 180 суток – зафиксировано превышение значений, рассчитанных по Еврокоду EN 12390 от 0,1 до 2,2%.

Согласно приведенным выше результатам, допускается повышать принятый на основании экспериментальных данных по результатам кратковременных испытаний коэффициент к жесткости $k_{sr} = 0,65$ до величины 0,7 для конструкций, в которых расчетные напряжения возникнут не ранее чем через год после их бетонирования.

Результаты расчетов конструкций с листовым армированием по второй группе предельных состояний с рекомендуемыми поправочными коэффициентами приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Сопоставление теоретических и экспериментальных данных по второй группе предельных состояний с учетом дополнительных поправочных коэффициентов

Обозначение	Перемещения, мм			Ширина раскрытия трещин, мм		
	Эксперимент	Расчет	Отклонение, %	Эксперимент	Расчет	Отклонение, %
1	2	3	4	5	6	7
M3.1	5,19	5,49	6	0,20	0,34	69
M3.2	3,91	5,32	36	0,20	0,40	98
M3.3	5,53	5,77	4	0,13	0,39	190
M3.4	5,20	6,49	25	-	-	-
M3.5	2,64	2,89	9	-	-	-
M3.6	2,19	2,19	4	-	-	-
M3.7	3,25	4,11	26	-	-	-
B2.1	9,66	7,65	3 (при $k_{sr} = 0,5$)	0,58	0,66	13
B2.2	9,61	7,93	7 (при $k_{sr} = 0,5$)	0,35	0,74	111
M13	7,83	7,84	0	0,38	0,30	-21

По материалам таблицы 5 можно отметить удовлетворительную сходимость расчетных и экспериментальных данных. Предлагаемые дополнительные поправочные коэффициенты при вычислении ширины раскрытия трещин и прогибов получены путем сопоставления теоретических данных, полученных расчетным путем (на основе существующих нормативных подходов), с результатами эксперимента.

4. Заключение

1. Рассмотрены особенности работы конструкций с листовым армированием при изгибе. Выполнен обзор литературы, дана оценка существующих нормативных методик расчета применительно к исследуемым конструкциям.

2. Проведен анализ по предельным нагрузкам, вертикальным перемещениям и ширине раскрытия трещин, полученным при экспериментальных исследованиях для 30 моделей с листовым армированием на изгиб.

3. Для всех испытанных моделей отмечена совместная работа листового армирования и бетона вплоть до момента их разрушения при обеспечении конструктивных требований соединения листа и бетона, а также установки связей между противоположными листами.

4. Сравнение результатов экспериментальных и теоретических данных при проверке прочности нормальных сечений, не превышает 11,0%, что является хорошим результатом. Адаптированный метод расчета из СП 63.13330 при расчете по первой группе предельных состояний показывают запас прочности и может быть использован как основа при проверке прочности конструкций с листовым армированием, работающим на изгиб.

5. При расчете ширины раскрытия трещин, нормальных к продольной оси элемента, зафиксированы значительные отличия теоретических от экспериментальных данных до 47%, при расчетах прогибов – до 49%. Нормативные методики при расчете по второй группе предельных состояний недооценивают контролируемые параметры. Это свидетельствует о необходимости корректировки существующих нормативных методик расчета применительно к конструкциям с листовым армированием путем введения поправочных коэффициентов при определении ширины раскрытия трещин и прогибов.

6. На основе выполненных экспериментальных исследований предложены поправочные коэффициенты при расчете сталежелезобетонных конструкций с листовым армированием по второй группе предельных состояний: при определении ширины раскрытия трещин коэффициент φ_2 , учитывающий профиль продольной арматуры, который

рекомендуется принимать равным 1,7 для конструкций с двухсторонним листовым армированием и 0,8 для конструкций с односторонним листовым армированием; при определении прогибов рекомендуется уменьшать общую интегральную жесткость сталежелезобетонного элемента путем введения коэффициента $k_{sr} = 0,65...0,7$, что объясняется особенностями совместной работы системы листового армирования с бетоном. Предлагаемые коэффициенты позволяют обеспечить хорошую сходимость расчетных и экспериментальных данных при расчетах конструкций с листовым армированием, работающих при непродолжительных нагрузках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белов В.В. Железобетонные резервуары давления с внешним листовым армированием. Неленейное деформирование при силовых и температурных воздействиях : дис. ... канд. тех. наук: 05.23.01. – Ленинград, 1988. – 206 с.
2. Воронков Р.В. Железобетонные конструкции с листовой арматурой. – М.: Стройиздат, 1975. – 144 с.
3. Каприлов С.С., Шейнфельд А.В., Травуш В.И., Карпенко Н.И., Крылов С.Б. Оценка прочностных и деформационных характеристик высокопрочных бетонов в конструкциях и динамики их изменения во времени // Строительные материалы. – 2023. – Ноябрь. – С. 28–38.
4. Мкртчян А.М., Аксенов В.Н., Маилян Д.Р. Особенности конструктивных свойств высокопрочных бетонов // Новые технологии. – 2013. – № 3. – С. 135–143.
5. Ромкин Д.С. Влияние возраста высокопрочного бетона на его физико-механические и реологические свойства : дис. ... канд. тех. наук : 05.23.01. – М., 2007. – 140 с.
6. Травуш В.И., Арленинов П.Д., Десяткин [и др.] Исследование ползучести сталежелезобетонных образцов // Строительство и реконструкция. – 2024. – № 1(111). – С. 49–63. – doi: 10.33979/2073-7416-2024-111-1-49-63
7. ACI 349-06 Code Requirements for Nuclear Safety-Related Concrete Structures and Commentary. – American Concrete Institute (ACI), 2007.
8. AISC Design Guide 38. SpeedCore Systems for Steel Structures. – American Institute of Steel Construction, 2023.
9. AISC Steel Design Guide 32. Design of Modular Steel-Plate Composite Walls for Safety-Related Nuclear Facilities. – American Institute of Steel Construction, 2017.
10. ANSI/AISC 360-16 Specification for Structural Steel Buildings. – American Institute of Steel Construction, 2016.
11. ANSI/AISC N690-12 Specification for Safety-Related Steel Structures for Nuclear Facilities. – American Institute of Steel Construction, 2012.
12. ANSI/AISC N690-18, Supplement No. 1-15 Specification for Safety-Related Steel Structures for Nuclear Facilities. – American Institute of Steel Construction, 2015.
13. Bassam A. Burgan, Simon Bingham. An innovative form of steel-concrete (SC) structures for nuclear power plant // Transactions of the 24th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT-24). – Busan, Korea, 2017. – Div. VI. – URL: <https://repository.lib.ncsu.edu/server/api/core/bitstreams/921ddbea-2e72-4283-a056-74f3ac5619c4/content> (дата обращения: 25.04.2025).
14. Choi B.J., Han H.S, Kim W.K, Lee S.J. Compression Tests for Unstiffened Steel Plate-Concrete Structures with Variation of B/t Ratio // Journal of Korean Society of Steel Construction. – 2008. – Vol. 20. – No. 4. – URL: https://www.researchgate.net/publication/264098441_Compression_Tests_for_Unstiffened_Steel_Plate-Concrete_Structures_with_Variation_of_Bt_Ratio (дата обращения: 25.07.2024).
15. Hong S., Kim W., Lee K., Hong N.K., Lee D. Out-of-plane Shear Strength of Steel Plate Concrete Walls Dependent on Bond Behavior // Transactions of the 20th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT-20). – Espoo, Finland, 2009. – Div. 6: Paper 1855. – P. 1–10. – URL: <https://repository.lib.ncsu.edu/server/api/core/bitstreams/f2e7ed8c-49dd-4557-aa6c-e1cf4b0eb62d/content> (дата обращения: 20.09.2024).
16. Kai Zhang et al. Effect of shear connectors on local buckling and composite action in steel concrete composite walls // Nuclear Engineering and Design. – 2014. – Vol. 269. – P. 231–239.
17. NEDO-33988, Revision 0, BWRX-300. Steel-Plate Composite (SC) Containment Vessel (SCCV) and Reactor Building Structural Design. – 2022. – URL: <https://www.nrc.gov/docs/ML2228/ML22287A177.pdf> (дата обращения: 30.03.2025).
18. Ozaki M., Akita S., Oosuga H., Nakayama T., Adachi N. Study on Steel Plate Reinforced Concrete Panels Subjected to Cyclic In-Plane Shear // Nuclear Engineering and Design. – 2004. – Vol. 228. – P. 225–244. – URL: <https://www.sci-hub.ru/10.1016/j.nucengdes.2003.06.010> (дата обращения: 25.07.2024).
19. Takeuchi M. et al. Study on a concrete fillet structure for nuclear power plants // Nuclear Engineering and Design. – 1998. – Vol. 179. – P. 209–223. – URL: [https://www.sci-hub.ru/10.1016/S0029-5493\(97\)00282-3](https://www.sci-hub.ru/10.1016/S0029-5493(97)00282-3) (дата обращения: 25.07.2024).

20. Travush V.I. et al. Static bearing capacity of steel-plate composite walls // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2023. – Vol. 19. – No. 4. – P. 166–181. – doi: 10.22337/2587-9618-2023-19-4-166-181
21. Travush V.I. et al. The stiffness of steel-plate composite structures for short-term loads // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2024. – Vol. 20. – No. 4. – P. 105–118. – doi: 10.22337/2587-9618-2024-20-4-105-118
22. Varma A.H., Malushte S.R., Sener K.C., Booth P.N., Coogler K. Steel-Plate Composite (SC) Walls: Analysis and Design including Thermal Effects // Transactions of the 21st International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT-21). – New Delhi, India, 2011. – Div. X, Paper 761.
23. Varma A.H., Malushte S.R., Sener K.C., Booth P.N. Analysis and Design of Modular Composite Walls for Combined Thermal and Mechanical Loadings // Transactions of the 20th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT-20). – Espoo, Finland, 2009. – Div. TS 6, Paper 1820.
24. Varma A.H., Malushte S.R., Sener K.C., Lai Z. Steel-Plate Composite (SC) Walls for Safety Related Nuclear Facilities: Design for In-Plane Force and Out-of-Plane Moments // Nuclear Engineering and Design. – 2014. – Vol. 269. – P. 240–249. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0029549313005220> (дата обращения: 25.07.2024).

REFERENCES

1. Varma A.H., Malushte S.R., Sener K.C., Lai Z. Steel-Plate Composite (SC) Walls for Safety Related Nuclear Facilities: Design for In-Plane Force and Out-of-Plane Moments. Nuclear Engineering and Design. Special Issue on SMiRT-21 Conference. 2014. Vol. 269. Pp. 240-249. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0029549313005220?via%3Dihub> (date of application: 25.07.2024).
2. NEDO-33988, Revision 0, BWRX-300. Steel-Plate Composite (SC) Containment Vessel (SCCV) and Reactor Building Structural Design. 2022. URL: <https://www.nrc.gov/docs/ML2228/ML22287A177.pdf> (date of application: 30.03.2025).
3. Varma A.H., Malushte S.R., Sener K.C., Booth P.N., Coogler K. Steel-Plate Composite (SC) Walls: Analysis and Design including Thermal Effects. *Transactions of the Internal Association for Structural Mechanics in Reactor Technology Conference, SMiRT-21, Div. X, Paper 761, New Delhi, India, IASMIRT, North Carolina*. 2011.
4. Varma A.H., Malushte S.R., Sener K.C., Booth P.N. Analysis and Design of Modular Composite Walls for Combined Thermal and Mechanical Loadings. *Transactions of the Internal Association for Structural Mechanics in Reactor Technology Conference, SMiRT-20, Div. TS 6 Paper 1820, Espoo, Finland, IASMIRT, North Carolina State University, Raleigh, NC*. 2009.
5. Ozaki M., Akita S., Oosuga H., Nakayama T., Adachi N. Study on Steel Plate Reinforced Concrete Panels Subjected to Cyclic In-Plane Shear. Nuclear Engineering and Design. 2004. Vol. 228. Pp. 225-244. URL: <https://www.sci-hub.ru/10.1016/j.nucengdes.2003.06.010> (date of application: 25.07.2024).
6. Takeuchi M. et al. Study on a concrete fillet structure for nuclear power plants. Nuclear Engineering and Design. 1998. Vol. 179. Pp. 209-223. URL: [https://www.sci-hub.ru/10.1016/S0029-5493\(97\)00282-3](https://www.sci-hub.ru/10.1016/S0029-5493(97)00282-3) (date of application: 25.07.2024).
7. Zhang K. et al. Effect of shear connectors on local buckling and composite action in steel concrete composite walls. Nuclear Engineering and Design. 2014. Vol. 269. Pp. 231-239.
8. Burgan B.A., Bingham S. An innovative form of steel-concrete (SC) structures for nuclear power plant. *24th Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, BEXCO, Busan, Korea - August 20-25, 2017. Division VI*. URL: <https://repository.lib.ncsu.edu/server/api/core/bitstreams/921ddbea-2e72-4283-a056-74f3ac5619c4/content> (date of application: 25.04.2025).
9. Hong S., Kim W., Lee K., Hong N.K., Lee D. Out-of-plane Shear Strength of Steel Plate Concrete Walls Dependent on Bond Behavior. *Transactions of the 20th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, SMiRT-20, Div-6: Paper 1,855, Espoo, Finland, IASMIRT, North Carolina State University, Raleigh, NC*. Pp. 1–10. URL: <https://repository.lib.ncsu.edu/server/api/core/bitstreams/f2e7ed8c-49dd-4557-aa6c-e1cf4b0eb62d/content> (date of application: 20.09.2024).
10. Choi B.J., Han H.S, Kim W.K, Lee S.J. Compression Tests for Unstiffened Steel Plate-Concrete Structures with Variation of B/t Ratio. Journal of Korean Society of Steel Construction. 2008. Vol. 20. No. 4. URL: https://www.researchgate.net/publication/264098441_Compression_Tests_for_Unstiffened_Steel_Plate-Concrete_Structures_with_Variation_of_Bt_Ratio (date of application: 25.07.2024).
11. ANSI/AISC N690-12 Specification for Safety-Related Steel Structures for Nuclear Facilities. An American National Standard. American institute of steel construction. USA. 2012. URL: <https://www.aisc.org/>.
12. ANSI/AISC360-16 Specification for Structural Steel Buildings. An American National Standard. American institute of steel construction. USA. 2016. URL: <https://www.aisc.org/>.
13. ACI 349-06 Code Requirements for Nuclear Safety-Related Concrete Structures and Commentary. An American Concrete Institute® (ACI) Standard. Reported by ACI Committee 349. USA. 2007.

Теория инженерных сооружений. Строительные конструкции

14. ANSI/AISC N690-18, ANSI/AISC N690s1-15 *Specification for Safety-Related Steel Structures for Nuclear Including Supplement No. 1*. An American National Standard. American institute of steel construction. USA. 2015. URL: <https://www.aisc.org/>.
15. AISC Steel Design Guide 32. Design of Modular Steel-Plate Composite Walls for Safety-Related Nuclear Facilities. American institute of steel construction. USA. 2017. URL: <https://www.aisc.org/>.
16. AISC Design Guide 38. SpeedCore Systems for Steel Structures. American institute of steel construction. USA. 2023.
17. Voronkov R.V. Zhelezobetonnyye konstruktsii s listovoy armaturoy [Reinforced concrete structures with steel-plate reinforcement]. Moscow: Stroyizdat, 1975. 144 p. (rus)
18. Belov V.V. Zhelezobetonnyye rezervuary davleniya s vnenim listovym armirovaniyem. Neleneynoye deformirovaniye pri silovykh i temperaturnykh vozdeystviyakh [Reinforced concrete pressure tanks with external steel-plate reinforcement. Nonlinear deformation under force and temperature effects]: PhD thesis. Leningrad, 1988. 206 p. (rus)
19. Travush V.I. et al. Static bearing capacity of steel-plate composite walls. International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2023. Vol. 19. No. 4. Pp. 166–181. DOI: 10.22337/2587-9618-2023-19-4-166-181.
20. Travush V.I. et al. The stiffness of steel-plate composite structures for short-term loads. International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2024. Vol. 20. No. 4. Pp. 105-118. DOI: 10.22337/2587-9618-2024-20-4-105-118.
21. Travush V.I., Arleninov P.D., Desyatkin [et al.] Issledovaniye polzuchesti stalezhelezobetonnykh obraztsov [Creep behaviour of steel-reinforced concrete specimens]. Construction and reconstruction. 2024. No. 1(111). Pp. 49-63. DOI: 10.33979/2073-7416-2024-111-1-49-63. (rus)
22. Mkrtchyan A.M., Aksenov V.N., Mailyan D.R. Osobennosti konstruktivnykh svoystv vysokoprochnykh betonov [Features of the structural properties of high-strength concrete]. New technologies. 2013. No. 3. Pp. 135-143. (rus)
23. Romkin D.S. Vliyaniye vozrasta vysokoprochnogo betona na yego fiziko-mekhanicheskiye i reologicheskiye svoystva [The influence of age of high-strength concrete on its physical, mechanical and rheological properties]: PhD thesis: 05.23.01. Moscow, 2007. 140 p. (rus)
24. Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V., Travush V.I., Karpenko N.I., Krylov S.B. Otsenka prochnostnykh i deformatsionnykh kharakteristik vysokoprochnykh betonov v konstruktsiyakh i dinamiki ikh izmeneniya vo vremeni [Assesment of Strength and Deformation Characteristics of High-Strength Concrete in Structures and the Dynamics of Their Change Over Time]. *Building materials*. 2023. November. Pp. 28-38. (rus)

Информация об авторах

Травуш Владимир Ильич

ЗАО «ГОРПРОЕКТ», г. Москва, Россия, доктор технических наук, профессор. Главный конструктор, заместитель генерального директора по научной работе. Вице-президент РААЧ
E-mail: travush@mail.ru

Конин Денис Владимирович

ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО "НИЦ "Строительство", г. Москва, Россия, кандидат технических наук, заместитель Директора по научной работе, заведующий лабораторией Высотных зданий и сооружений,
E-mail: konden@inbox.ru

Крылов Алексей Сергеевич

ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО "НИЦ "Строительство", г. Москва, Россия, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории Высотных зданий и сооружений,
E-mail: kryl07@mail.ru

Арленинов Петр Дмитриевич

НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», г. Москва, Россия, кандидат технических наук, заместитель заведующего лаборатории Механики железобетона,
E-mail: arleninoff@gmail.com

Рожкова Лидия Сергеевна

ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО "НИЦ "Строительство", г. Москва, Россия, старший научный сотрудник лаборатории Высотных зданий и сооружений,
E-mail: soshnikova_lidia@mail.ru

Жданова Анастасия Андреевна

ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО "НИЦ "Строительство", г. Москва, Россия, инженер лаборатории Комбинированных конструкций,
E-mail: zhdanovaaa8002@gmail.com

Гаврилов Дмитрий Николаевич

ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО "НИЦ "Строительство", г. Москва, Россия, инженер лаборатории Комбинированных конструкций,
E-mail: gavrilovd_10@mail.ru

Ведяков Михаил Иванович

ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО "НИЦ "Строительство", г. Москва, Россия, инженер лаборатории Больщепролетных металлических конструкций и сертификации,
E-mail: vedyakov.misha@yandex.ru

Information about authors

Travush Vladimir I.

CJSC GORPROEKT, Moscow, Russia, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Designer, Deputy General Director for Scientific Work. Vice-President of RAASN,
E-mail: travush@mail.ru

Konin Denis V.

JSC Research Center of Construction TSNIISK named after V.A. Koucherenko, Moscow, Russia, Candidate of Technical Sciences, Deputy Director of Scientific Work, Head of Laboratory of High-Rise Buildings and Structures,
E-mail: konden@inbox.ru

Krylov Alexey S.

JSC Research Center of Construction TSNIISK named after V.A. Koucherenko, Moscow, Russia, Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher of Laboratory of High-Rise Buildings and Structures
E-mail: kryl07@mail.ru

Arleninov Petr D.

JSC Research Center of Construction NIIZHB named after A.A. Gvozdev, Moscow, Russia, Candidate of Technical Sciences, Deputy Head of Reinforced Concrete Mechanics Laboratory
E-mail: arleninoff@gmail.com

Rozhkova Lidia S.

JSC Research Center of Construction TSNIISK named after V.A. Koucherenko, Moscow, Russia, Senior researcher of Laboratory of High-Rise Buildings and Structures
E-mail: soshnikova_lidia@mail.ru

Zhdanova Anastasia A.

JSC Research Center of Construction TSNIISK named after V.A. Koucherenko, Moscow, Russia, Engineer of Laboratory of Composite Steel and Concrete Structures,
E-mail: zhdanovaaa8002@gmail.com

Gavrilov Dmitry N.

JSC Research Center of Construction TSNIISK named after V.A. Koucherenko, Moscow, Russia, Moscow, Russia, Engineer of Laboratory of Composite Steel and Concrete Structures,
E-mail: gavrilovd_10@mail.ru

Vedyakov Mikhail I.

JSC Research Center of Construction TSNIISK named after V.A. Koucherenko, Moscow, Russia, Engineer of Laboratory of Large-span metal structures and certification,
E-mail: vedyakov.misha@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 19.08.2025

Одобрена после рецензирования 09.09.2025

Принята к публикации 01.10.2025

The article was submitted 19.08.2025

Approved after reviewing 09.09.2025

Accepted for publication 01.10.2025

А.В. АЛЕКСЕЙЦЕВ¹, К.В. ЮРУСОВ¹

¹Национальный исследовательский московский государственный строительный университет,
Москва, Россия

ПРАКТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ПО НОРМАЛЬНОМУ СЕЧЕНИЮ КОРРОЗИОННО ПОВРЕЖДЕННЫХ КОЛОНН ПРИ ГОРИЗОНТАЛЬНОМ УДАРЕ

Аннотация. Вопросы живучести несущих конструкций при техногенных аварийных воздействиях в настоящее время приобретают все большую актуальность как в отечественной, так и в мировой строительной науке. В особенности это касается сжатых и сжато изгибаемых элементов, в том числе колонн зданий. Здания со значительным периодом эксплуатации накапливают коррозионные повреждения, которые приводят к местной деградации механических характеристик материалов, что может существенно сказаться на предельной несущей способности и живучести конструктивных систем в целом при динамических воздействиях. Разрабатывается подход к определению прочности нормальных сечений для внецентренно сжатых колонн в случае малого начального эксцентриситета при поперечном ударе. Коррозия рассматривается в виде «точечного» очага, в пределах которого могут быть деградированы механические характеристики как бетона, так и арматуры. Степень деградации механических характеристик материалов определяется по экспериментальным данным, получаемым на основе схем ускоренной коррозии. В зависимости от ее степени учитывается влияние стеснения деформаций бетона в направлении, перпендикулярном сжатию. Приводится верификационное сравнение разработанной методики с экспериментальными данными динамических испытаний колонн при поперечном ударе. Рассмотрен пример расчета коррозионно-поврежденной колонны.

Ключевые слова: поперечный удар, коррозионные повреждения, железобетонные конструкции, колонна, динамические воздействия, механическая безопасность.

A.V. ALEKSEYTSEV¹, K.V. YURUSOV¹

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

A PRACTICAL CALCULATION METHOD FOR THE NORMAL SECTION OF CORROSION-DAMAGED COLUMNS UNDER TRANSVERSE IMPACT

Abstract. The issues of the robustness of load-bearing structures under technogenic emergency impacts are currently becoming increasingly relevant in both domestic and global structural engineering. This is particularly true for compressed and compression-bent elements, including building columns. Buildings with a significant service life accumulate corrosion damage, which leads to local degradation of the mechanical properties of materials. This can substantially affect the ultimate load-bearing capacity and overall robustness of structural systems under dynamic loads. An approach is being developed to determine the strength of normal sections for eccentrically compressed columns with a small initial eccentricity under transverse impact. Corrosion is considered as a localized "spot" defect, within which the mechanical properties of both concrete and reinforcement may be degraded. The degree of degradation of the materials' mechanical properties is determined from experimental data obtained using accelerated corrosion schemes. Depending on the degree of corrosion, the effect of confinement on concrete deformations in the direction perpendicular to compression is taken into account. A verification comparison of the developed methodology with experimental data from dynamic tests of columns under transverse impact is provided. A calculation example for a corrosion-damaged column is considered.

Key words: transverse impact, corrosion damage, reinforced concrete structures, column, dynamic loads, structural safety

1. Введение

Задача обеспечения безопасности зданий и сооружений, подверженных коррозии, является актуальной в современных социально-экономических условиях. Значительная часть основных фондов капитального строительства имеет технический износ, часто включающий коррозионные повреждения балок и колонн. В связи с этим разрабатываются концепции и совершенствуются методики расчета таких железобетонных элементов [1-5]. При этом наиболее сложным и востребованным является описание комбинированных воздействий, например, сочетаний коррозии и пожара или коррозии и ударного воздействия [6, 7].

Одним из наиболее неизученных вопросов является комбинированное воздействие, включающее в себя механический поперечный удар по колонне в случае ее коррозионного повреждения. Процесс деформирования нагруженных колонн при поперечном ударе достаточно давно изучается как зарубежными, так и отечественными учеными [8-10]. Модели коррозионных повреждений как бетона, так и арматуры разрабатываются и совершенствуются во многих работах при этом используются различные схемы учета коррозии и удара, как правило на основе численного моделирования и экспериментально [11-17]. При этом уделяется внимание таким аспектам как начальные повреждения, трещиностойкость, потеря сцепления арматуры и бетона, возникающие динамические эффекты [18-25]. При описании этих процессов деформирования используются модели теории надежности, методы учета нелинейного поведения конструкций, случайный характер появления и распространения коррозии на основе вероятностных методов, а также неоднородные модели сцепления арматуры и бетона [26-30]. В большинстве исследований модели деформаций представляют собой объемные конечно-элементные схемы, нуждающиеся в очень тонкой настройке и исследовании параметров при уже известном результате. Поэтому возникает необходимость в упрощенном инженерном методе, позволяющем проводить вычислительно быструю оценку напряженно деформированного состояния конструкций как проектируемых с учетом прогноза по развитию коррозии, так и уже получивших коррозионные повреждения по результатам технического обследования. В такой модели упрощенно должна учитываться динамика конструкции и различные варианты коррозионных повреждений как бетона, так и арматуры.

2. Модели и методы

1. *Постановка задачи.* Рассматривается в общем случае внецентренно сжатая с малым эксцентризитетом колонна, имеющая коррозионные повреждения бетона и арматуры. Считается, что расположение и состояние очага коррозионных повреждений при действии поперечной аварийной ударной нагрузки не приводит к инициации разрушения колонны по наклонному сечению. Требуется определить максимальную интенсивность ударной нагрузки при действующем напряженно-деформированном состоянии колонны под эксплуатационными нагрузками. Границное неравенство предельных состояний первой группы для рассматриваемого нами случая можно записать в виде:

$$\Phi(F_v(t), F_h(t)) \leq \Phi(N(t), M(t))_{ult}, \quad (1)$$

где $\Phi()$, $\Phi()_{ult}$ – функции нагрузочного эффекта и предельной несущей способности колонны, $F_v(t), F_h(t)$ – функции изменения во времени вертикальных и горизонтальных нагрузок, действующих на колонну; $N(t), M(t)$ – функции изменения во времени внутренних усилий, которые может воспринять сечение.

В рамках инженерной методики расчета мы будем оперировать пиковыми значениями динамических нагрузок, которые могут быть определены на основе квазистатического подхода, когда статическое значение фактора, умножается на коэффициент динамики,

полученный ранее на основе развернутого динамического расчета. В этом случае уравнение (1) принимает вид:

$$\begin{cases} k_{d1}N_{\max} \leq N_{cd,ult}, \\ k_{d2}M_{\max} \leq M_{cd,ult}, \end{cases} \quad (2)$$

где k_{d1} , k_{d2} – коэффициенты, определяемые произведением величин коэффициентов динамичности и динамического догружения; в случае, если при ударе в системе не разрушаются опорные связи, полагаем коэффициент динамического догружения равным единице, тогда $(k_{d1} \wedge k_{d2}) \leq 2$; N_{\max} , M_{\max} – максимальные внутренние усилия от статических эквивалентов нагрузки в колонне при действии эксплуатационной и пиковой ударной нагрузок, $N_{cd,ult}$, $M_{cd,ult}$ – предельные усилия, определяемые с учетом расчетных сопротивлений бетона и арматуры при их динамическом упрочнении, а также коррозионных повреждениях в случае расположения опасного сечения в очаге коррозии.

2. Упрощенный учет деградации материалов. Для определения жесткостей сечений коррозионно-поврежденных элементов запишем следующие зависимости:

$$\begin{aligned} I_{red}^{cor} &= I_b + I_s^{lb}, \quad I_s^{cor} = \sum_{i=1}^n \alpha_i A_{s,i}^{cor} y_i^2, \quad \alpha_i = E_{si}^{cor} / E_b^{cor}, \\ E_b^{cor} &= \frac{\left(\sum_{j=1}^m E_{bj}^{cor} A_{bj} + E_{bd} A_b \right)}{bh_0} \rightarrow \\ I_{red}^{cor} &= I_b^{cor} + \sum_{i=1}^n \left(\frac{E_{si}^{cor}}{\sum_{j=1}^m E_{bj}^{cor} A_{bj} + E_{bd} A_b} bh_0 A_{s,i}^{cor} y_i^2 \right), \end{aligned} \quad (3)$$

где I_{red}^{cor} приведенный к бетону главный момент инерции с учетом возможности коррозии m слоев бетона и n арматурных стержней, I_b – момент инерции неповрежденного бетона, E_{si}^{cor} – модуль упругости корродированной арматурной стали для стержня i , определяемый по методике [16], в частности по графику рис. 1, а; если коррозии стержня нет, то $E_{si}^{cor} = E_s$; E_{bj}^{cor} – модуль упругости слоя j корродированного бетона, определяемый в соответствии с моделью коррозии, в частности можно использовать модели, изложенные в [4, 13, 25]; b, h_0, y – соответственно ширина сечения, рабочая высота сечения, расстояние от оси, проходящей через центр тяжести стержня до оси центральной оси сечения, $A_{s,i}^{cor}$ – площадь арматурного стержня с учетом коррозионного износа, определяемая, например, по [14] или упрощенно: при износе в 10% – $A_{s,i}^{cor} = 0,9A_{s,i}$, в случае отсутствия коррозии $A_{s,i}^{cor} = A_s$; A_{bj}, A_b – площади частей сечения, поврежденные и неповрежденные коррозией, E_{bd} – модуль упругости неповрежденного бетона с учетом его деформаций от эксплуатационных нагрузок, $E_{bd} \approx 0,85E_b$.

Снижение под воздействием коррозии расчетных сопротивлений бетона R_b и стали R_s определяется на основе зависимостей

$$R_s^{cor} = k_{red}^s R_s, \quad R_b^{cor} = k_{red}^b R_b \quad (4)$$

где коэффициент редукции k_{red}^b зависит от степени стеснения поперечных деформаций или «ограниченности» бетона и может быть определен по графику (рис. 2, а-в); коэффициент редукции k_{red}^s определяется процентом износа арматурного сечения и может быть определен по графику (рис. 2, г). Графики коэффициентов редукции в формулах (4) получены на основе данных экспериментальных испытаний [17]. Под степенью C_b стеснения поперечных деформаций будем понимать отношение диаметра поперечной d_{sw} арматуры колонны к ее шагу S_w .

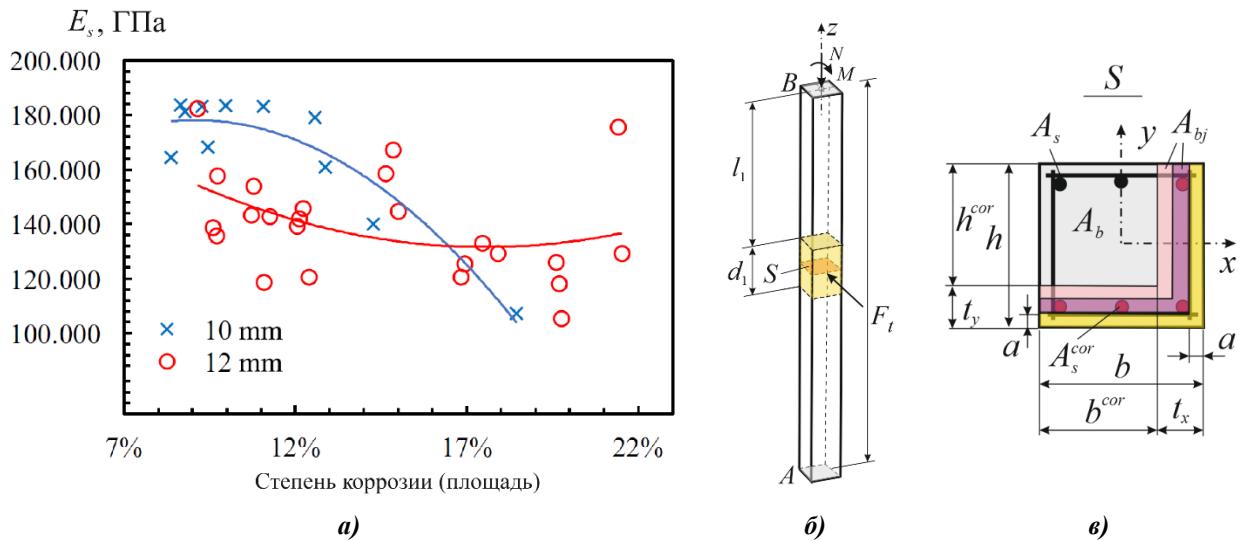
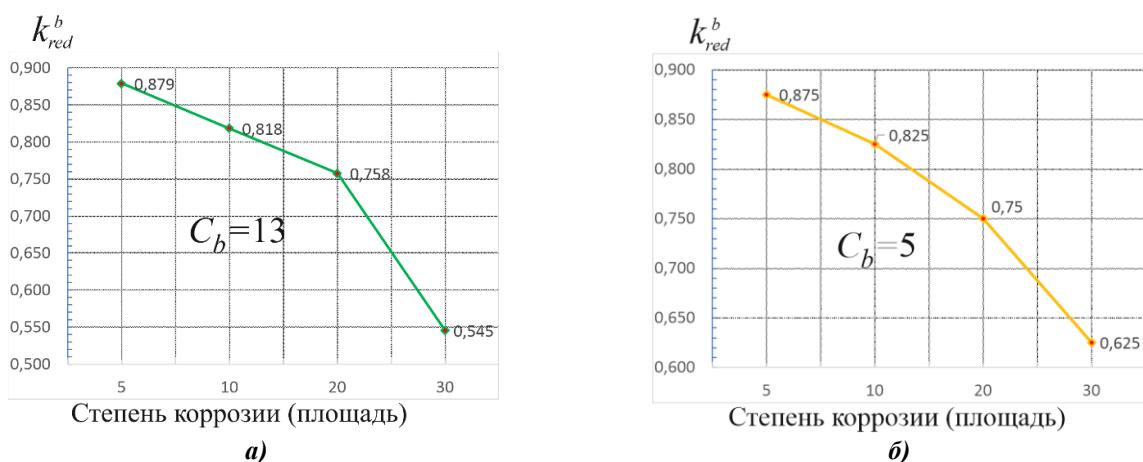


Рисунок 1 – К учету деградации материалов: общая расчетная схема с расположением очага коррозии: S – опасное сечение, A , B – сечения с кинематическими ограничениями, F_t – статический эквивалент механической ударной нагрузки (а); параметрическая схема коррозии бетона и арматуры (б); функция снижения модуля упругости арматуры в зависимости от степени коррозии (в)

2. Методика расчета. Суть методики расчета состоит в построении области прочности колонны в координатах «горизонтальная сила»–«продольное усилие» как показано на рис. 3. Эта область находится под кривой несущей способности, пересекающей оси координат.



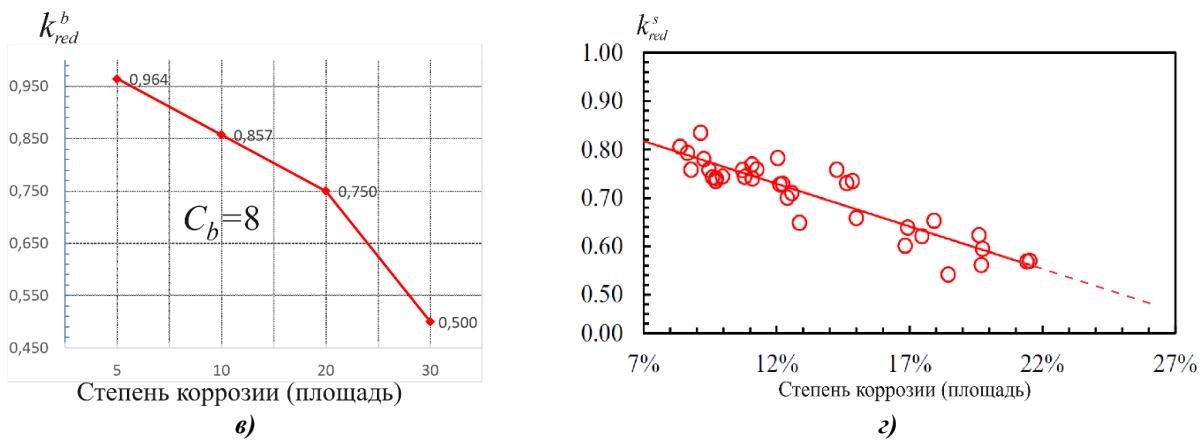


Рисунок 2 – Коэффициенты редукции при коррозии бетона и арматуры

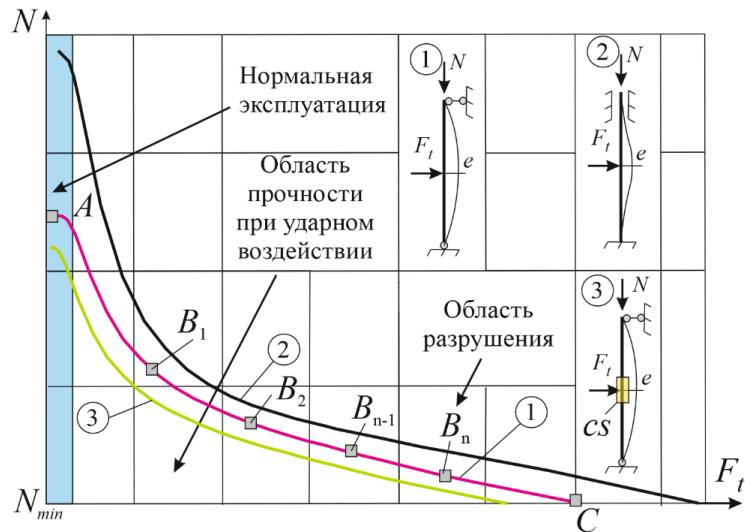


Рисунок 3 – Кривые несущей способности (общий вид) при различных условиях опирания и коррозионном повреждении

Построение кривой несущей способности сводится к нахождению точек A , B_i , C (см. рис. 3). Далее, для заданной эксплуатационной нагрузки следует лишь только проверить попадает ли значение горизонтальной силы в область прочности. Следует отметить, что построение области прочности следует выполнять всякий раз при изменении кинематических ограничений, эксплуатационных нагрузок и расположения горизонтальной аварийной нагрузки. Величина N_{min} на рис. 3 соответствует минимальной продольной силе в колонне, которая может наблюдаться, например, в период монтажа каркаса здания. Рассмотрим процесс построения кривой несущей способности.

Точка A . Здесь определяется максимальная продольная сила в зависимости от гибкости λ колонн. Предельное состояние характеризуется устойчивостью и прочностью по материалу с учетом продольного изгиба:

$$N_A(\lambda) = \begin{cases} \pi^2 E_b^{cor} I_{red}^{cor} / l_0^2, \lambda > 50; \\ \varphi \left[R_b^{cor} \sum_{j=1}^m A_{bj} + R_b A_b + R_s^{cor} \sum_{nc} A_s^{cor} + R_s A_s + R_{sc} A_{sc} \right], \lambda \leq 50, F_t = 0, \end{cases} \quad (5)$$

где l_0 – расчетная длина колонны, R_{sc}, A_{sc}, R_s, A_s – расчётные сопротивления и площади арматуры при сжатии и растяжении соответственно, φ -коэффициент продольного изгиба (СП 63.13330), nc – число стержней, подверженных коррозии.

Точка С. Допускаем, что влияние минимальной продольной силы на изгиб незначительно. Возможно 2 случая: первый – сечение, в котором возникают максимальные усилия при действии горизонтальной нагрузки попадает в очаг коррозии, второй – не попадает. В соответствии с этим и с учетом (2) можно записать систему условий прочности:

$$\begin{cases} (k_{d2}M_{\max} \leq M_{d,ult}) \wedge (k_{d2}M_{sp} \leq M_{cd,ult}); \\ k_{d2}M_{\max} \leq M_{cd,ult} \end{cases}, \quad (6)$$

где M_{\max} – максимальный изгибающий момент в сечении, находящемся вне коррозионных повреждений, $M_{d,ult}$ – предельный момент, воспринимаемый сечением без коррозионных повреждений с учетом динамического упрочнения материалов, $M_{cd,ult}$ – то же, но с коррозионными повреждениями, M_{sp} – момент в сечении, где есть коррозионные повреждения.

Предельный момент $M_{cd,ult}$ можно рассчитать из условия равновесия усилий в сечении относительно центра тяжести растягиваемой ударом арматуры в зависимости от расположения горизонтальной силы. Если воздействие приложено к неповрежденному бетону (рис. 4, а), то уравнение для момента принимает вид:

$$M_{cd,ult} = k_1 R_b \cdot b_{cor} \cdot h_0^2 \cdot \alpha_R^{cor} + k_2 R_{sc} \cdot A'_s \cdot (h_0 - a), \quad (7)$$

в противном случае (рис. 4, б)

$$M_{cd,ult} = R_b^{cor} \cdot b_{cor} \cdot h_{0,cor}^2 \cdot \alpha_R^{cor} + R_{sc}^{cor} \cdot A_{sc}^{cor} \cdot (h_{0,cor} - a), \quad (8)$$

где k_1, k_2 коэффициенты динамического упрочнения материалов, $h_{0,cor} = 0,9h_0$ а величина

$$\alpha_R^{cor} = \xi_R^{cor} \cdot \left(1 - \frac{\xi_R^{cor}}{2}\right), \quad \xi_R^{cor} = \frac{0.9}{1 + R_s^{cor} / (E_s^{cor} \varepsilon_{b2})}. \quad (9)$$

Формула для ξ_R^{cor} приводится в [1], остальные величины показаны на рис. 4, б. Величина M_{\max} должна, кроме вклада горизонтальной силы, учитывать моменты в составе рамной системы и моменты от случайных эксцентрикитетов. В качестве примера для сечений 1, 2, 3 на рис. 4, в можно записать

$$M_{\max} = \max \{|M_1|, |M_2|, |M_3|\}; M_1 = M_f + M(F_t) + Me; M_2 = M_f - M(F_t) + Me; M_3 = -M_f + M(F_t) + Me. \quad (10)$$

Формулы для изгибающих моментов от горизонтальной нагрузки можно найти по таблицам эпюр или непосредственным расчетом в зависимости от конкретных закреплений колонны. Далее, подставляя (7)-(9) в (6), определяется значение F_t .

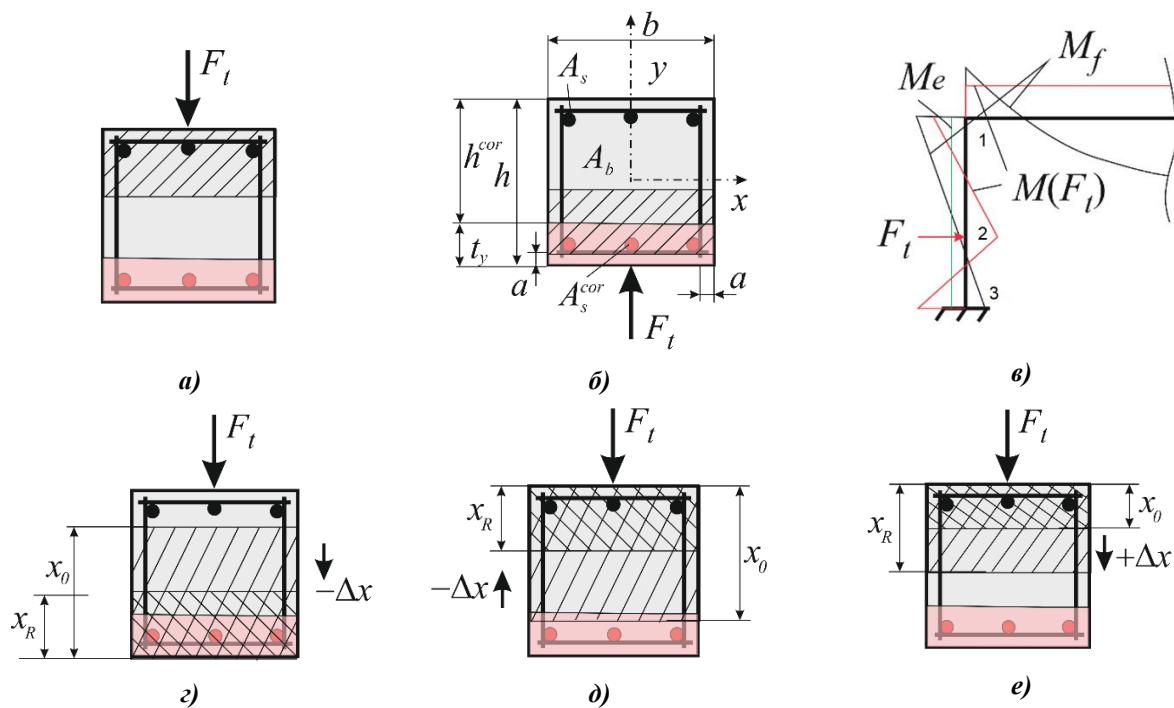


Рисунок 4 – К вычислению максимальной горизонтальной силы: расположение ударного воздействия (а), (б); схема рамы для примера определения величины M_{\max} (в), случаи перераспределения напряжений сжатия с ростом или уменьшением сжатой зоны бетона (г)-(е)

Точки $B_1 - B_n$. Очевидно, что данная область будет содержать значения горизонтальной силы, которые инициируют переход от пластического разрушения к хрупкому. При этом первоначально при наличии коррозии арматуры по формуле (9) вычисляется граничное значение относительной высоты сжатой зоны бетона. Для каждой точки B_i задается значение продольной силы N_i из интервала $(N_A; N_{\min})$ на рис. 3. Число n здесь определяет точность последующего прогноза по величине горизонтальной силы. Далее в цикле по числу точек B_i решается уравнение равновесия с учетом наличия продольной силы из которого находится значение горизонтальной силы. Для его решения выполняем ряд этапов:

1. Вычисляется высота сжатой зоны бетона и ее относительная величина.

$$x^{cor} = x_m + \frac{I_{red}^{cor} N}{A_{red}^{cor} M}, \quad x_m = \sqrt{\alpha_s^2 (\mu_s + \mu'_s)^2 + 2\alpha_s (\mu_s + \mu'_s a' / h_0^{cor})} - \alpha_s (\mu_s + \mu'_s). \quad (11)$$

$$\alpha_s = \frac{0,0015 E_s^{cor}}{R_{b,ser}}, \quad \mu_s = \frac{A_s}{bh_0}, \quad \mu'_s = \frac{A'_s}{bh_0}, \quad M = M_f + M_e. \quad A_{red}^{cor} = bh - A_{b1} + \sum_{i=1}^n \frac{E_{si}}{E_{bd}} A_{s,i};$$

В формулах (11) в случае дальнейших вычислений по формуле (13) принимается $h_0 = h_0^{cor}$, $A'_s = A_s^{cor}$, для условия (14) – $A_s = A_s^{cor}$.

Проверяется условие $\xi_R^{cor} \leq \xi_0^{cor} = x^{cor} / h_0^{cor}$, если оно удовлетворено, то в расчетах для следующих значений N_i продолжает использоваться формула (11), если $\xi_R^{cor} > \xi_0^{cor}$, то для x_m используется выражение

$$x_m^{cor} = \frac{N}{\varphi R_b^{cor} b_{cor}} , \quad x_m^{cor} \leq h_0^{cor} . \quad (12)$$

Уравнение равновесия внешних и внутренних сил в случае сжатия поврежденной части имеет вид:

$$M_{max} + Ne_f \leq [R_b^{cor} b_{cor} x_1^{cor} (h_0^{cor} - 0,5x_1^{cor}) + R_{sc}^{cor} A_{sc}^{cor} (h_0^{cor} - a)] , \quad x_1^{cor} = x_R^{cor} - x^{cor} , \quad (13)$$

в противном случае

$$M_{max} + Ne_f = k_1 R_b \cdot b_{cor} \cdot h_0^2 \cdot \alpha_R^{cor} + k_2 R_{sc} \cdot A_s' \cdot (h_0 - a) . \quad (14)$$

Здесь значение эксцентрикитета продольной силы определяем так:

$$e_f = \frac{1}{1 - N/N_A |_{\lambda > 50}} \left(f + \frac{h_{0,cor} - a}{2} \right) . \quad (15)$$

Учет величины x^{cor} осуществляется по рис 4. В случае отрицательного приращения (разгрузки сечения) в запас прочности можно принимать $x^{cor} = 0$, тогда $x_1^{cor} = x_R^{cor}$, в случае дагружения сечения (рис. 4, е) $x^{cor} \neq 0$, это случай больших эксцентрикитетов, не рассматриваемый в данной статье.

Прогиб f от действия горизонтальной силы можно определить через кривизну, зная жесткость в сечении элемента. Эту жесткость с учетом коррозии можно определить как

$$D_{corr} = E_{red} I_{red}^{cor}, \quad E_{red} = \frac{R_{b,ser} / \varepsilon_{b1,red} x^{cor} b_{cor} + E_s^{cor} A_s^{cor} + E_s A_s}{x^{cor} b_{cor} + A_s^{cor} + A_s} . \quad (16)$$

Тогда прогиб колонны при разбиении ее на n участков одинаковой длины Δl :

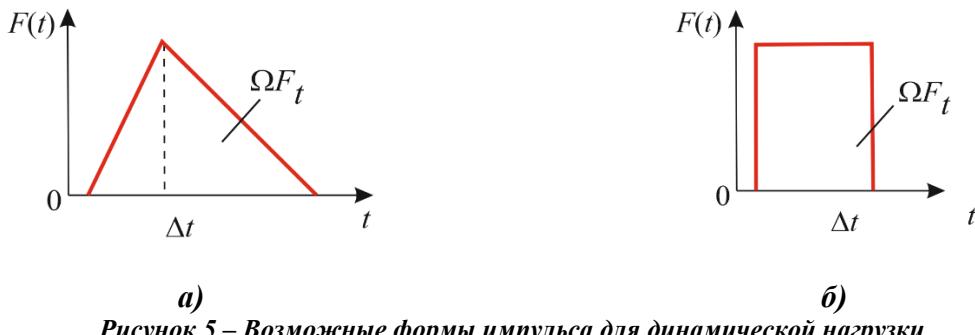
$$f = \sum_{i=1}^n \int_0^{\Delta l} \bar{M}_i \left(\frac{1}{r} \right)_i dz = \sum_{i1=1}^{n1} \int_0^{\Delta l_{i1}} \bar{M}_{i1} \left(\frac{M}{D} \right)_{i1} dz + \sum_{i2=1}^{n2} \int_0^{\Delta l_{i2}} \bar{M}_{i2} \left(\frac{M}{D_{corr}} \right)_{i2} dz . \quad (17)$$

где D – жесткость элемента без коррозионных повреждений, $n1$ число участков без коррозионных повреждений, $n2$ – число участков, определяющих длину очага коррозии d_1 (рис. 1, б).

Для перехода от динамической нагрузки с заданной формой импульса, например, показанной на рис. 5., к значению механической силы можно использовать формулу

$$P = \Omega F_t / \Delta t , \quad (18)$$

где ΩF_t – площадь фигуры импульса, Δt – время динамического воздействия.



3. Результаты исследования и их анализ

Для верификации предложенного метода используем экспериментальные данные динамических испытаний из работы [10], где сжатый железобетонный образец подвергался динамической нагрузке. Коррозионных воздействий не было поэтому в проверочном расчете деградацию механических характеристик бетона и арматуры не учитываем. Расчетная схема образца приведена на рис. 6, а. Имеются данные о геометрии и сопротивлениях по двум испытаниям одинаковых образцов, приведенные в таблице 1. Армирование рабочей арматурой выполнено из 4 стержней диаметра 18 мм, периодического профиля расположенных симметрично в углах прямоугольного сечения.

Запишем уравнение равновесия (14) применительно к данной экспериментальной задаче $M_{\max} + Ne_f = k_1 R_b \cdot b \cdot h_0^2 \cdot \alpha_R + k_2 R_{sc} \cdot A'_s \cdot (h_0 - a')$. По результатам экспериментальных испытаний, приводимых различными авторами, в т.ч. принимая во внимание работу [2] можно назначить $k_1 = 1,15$, $k_2 = 1,2$, вычислим с учетом отсутствия коррозии по (9) величины $\xi_R = 0,8 / (1 + (442 / 2 \cdot 10^5) / 0,0035) = 0,49$, $\alpha_R = 0,49(1 - 0,49 / 2) = 0,37$.

Таблица 1 – Экспериментальные данные динамических испытаний [10]

Марка	$h \times b$	h_0	$h_0 - a'$	R_b	$A_s = A_{sc}$	R_s	$N_{\text{эксп}}$	$P_{\text{эксп}}$
см							МПа	
К-18-Д3	23,7x15,5	22	19	29,8	5,09	442	480	420
18-Д3	23,5x15,5	20,5	18				480	394



Рисунок 6 – К верификации методики расчета: расчетная схема в эксперименте (а), результат испытания (б)

Изгибающий момент составит $F_t l / 6 = 0,23 F_t$ (Н). Полный эксцентризитет определяем по (15). Для этого определим приведенные к бетону характеристики сечения $I_{red} = 23,6^3 \cdot 15,5 / 12 + 6,66 \cdot 2 \cdot 5,09 \cdot (18,5 / 2)^2 = 22779$ см⁴. $N_A = \pi^2 \cdot 3 \cdot 10^7 \cdot 22779 \cdot 10^{-8} / 1,38^2 = 35379$ кН. Прогиб от действия динамической силы $f = F_t l^3 / 48 E_{red} I_{red} = F_t \cdot 1,38^3 / 48 \cdot 26333 \times 22779 \cdot 10^{-2} = F_t \cdot 9,1624 \cdot 10^{-7}$ см. $e_f = 1 / (1 - 480 / 35379) \left(F_t \cdot 9,1624 \cdot 10^{-7} + 18,5 / 2 \right) = 9,376 + 0,9288 F_t \cdot 10^{-6}$ см. Подставляя все значения в уравнение (14), имеем $23,445 F_t$ (кН) = $10946 + 7468$, $F_t = 670,24$, $P = F_t / 1,5 = 670,24 / 1,5 = 446,6$ кН.

Здесь, для перехода к статическому эквиваленту и сравнения с экспериментальным значением в таблице 1 был использован коэффициент $k_{d2} = 1,5$ (см. (2)). Результат удовлетворительно (с отклонением около 10%) соответствует среднему экспериментальному значению 407 кН. Снижение нагрузки связано с неопределенностью коэффициента динамики в данном примере. При уточнении условий, связанных с начальной скоростью удара и фактическими для данного бетона и арматуры коэффициентами динамического упрочнения, соответствие может быть еще лучше.

Пример расчета колонны с коррозионными повреждениями. Рассмотрим

железобетонную колонну высотой 4,5 м, сечением 400x400 мм, расстояние $a=5$ см (рис. 7 а, б). Колонна симметрично армируется стержнями продольной арматуры 4d28 A500C, $A_{sc}^{\phi 28} = 6,158 \text{ см}^2$, $R_{sc} = 435 \text{ МПа}$. Поперечная арматура d12 A240 расположена в приопорных участках с шагом 100 мм, далее с шагом 300 мм. Колонна изготовлена из бетона В20, $R_b = 11,5 \text{ МПа}$, $E_b = 27500 \text{ МПа}$.

В результате оценки технического состояния установлено, что степень коррозии арматуры 20%, коррозии подвержены три стержня $A_{sc}^{cor,\phi 28} = 4,9264 \text{ см}^2$. По графику рис. 2, а $R_s^{cor} = 0,6 \cdot 435 = 261 \text{ МПа}$. Бетон подвергся коррозии с двух сторон колонны, $t_x = 5 \text{ см}$, $t_y = 10 \text{ см}$. Среднее снижение модуля упругости на этом участке составило 40%, то есть $E_b^{cor} = 11000 \text{ МПа}$. С учетом графика рис. 1, в принимаем $E_s^{cor} = 1,4 \cdot 10^5 \text{ МПа}$. Значения усилий из статического расчета следующие $N = 900 \text{ кН}$, $M_{f1} = 27 \text{ кНм}$, $M_{f2} = 12 \text{ кНм}$, момент от случайного эксцентричеситета в 1 см равен $M_e = 9 \text{ кНм}$. Размер очага коррозии $d_1 = 0,5 \text{ м}$.

Требуется определить значение горизонтальной внезапно приложенной ударной нагрузки, действующей на конструкцию в течение 1 с. Форма импульса прямоугольная.

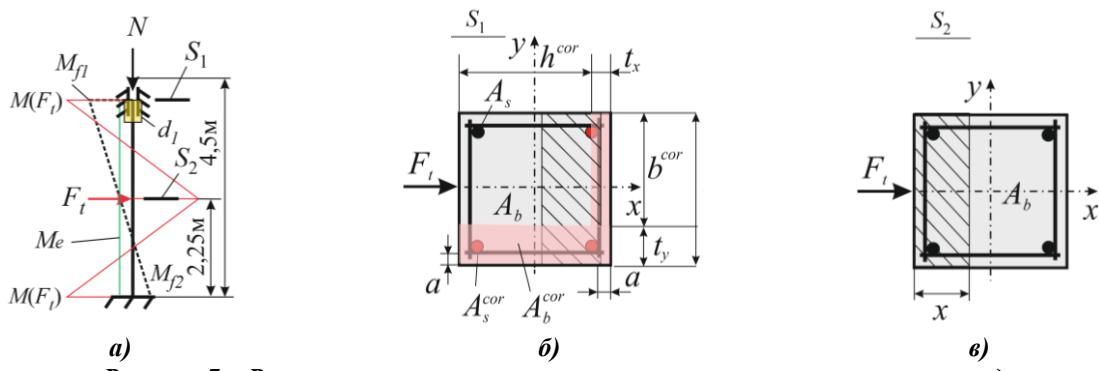


Рисунок 7 – Расчетная схема и сечения колонны с коррозионными повреждениями

Определяем расчетные значения моментов для сечений S_1 , S_2 : $M_1 = 27+9=36 \text{ кНм}$, $M_2 = (27-12)/2+9=14,5 \text{ кНм}$. Вычисляем уровень стеснения поперечных деформаций на приопорных участках $C_b = 100/12 = 8,3$, используем рисунок 2, в, вычисляя $R_b^{cor} = 0,75 R_b = 8,625 \text{ МПа}$. Находим приведенный момент инерции с учетом коррозии трех стержней арматуры ($n=3$) и поврежденной площади бетона, для упрощения расчетов в данном примере в пределах этой площади разбивку на слои не выполняем, тогда $m=1$. При этом $E_{bd} = 0,85 \cdot 27500 = 23375 \text{ МПа}$, $A_{b1} = t_y h + t_x b = 40(10+5) = 600 \text{ см}^2$,

$$A_b = 1600 - 600 = 1000 \text{ см}^2.$$

$$I_{red}^{cor} = \frac{35^3 \cdot 30}{12} + \frac{2 \cdot 10^5}{27500} 6,158(40/2-5)^2 + 3 \left(\frac{1,4 \cdot 10^5}{11000 \cdot 600 + 23375 \cdot 1000} 40 \cdot 35 \cdot 4,9264 \cdot (40/2-5)^2 \right) = \\ = 136263 \text{ см}^4.$$

$$\alpha_s = \frac{0,0015 \cdot 1,4 \cdot 10^5}{15} = 14, \mu_s = \frac{6,158 \cdot 2}{40 \cdot 35} = 0,00879, \mu'_s = \frac{6,158 + 4,9264}{40 \cdot 35} = 0,00791$$

$$x_m = \sqrt{14^2(0,00879+0,00791)^2 + 2 \cdot 14(0,00879+0,00791 \cdot 5/35) - 14(0,00879+0,00791)} = 1,651 \text{ см.}$$

$$A_{red}^{cor} = 1600 - 600 + \frac{(2 \cdot 6,158 + 1,4 \cdot 3 \cdot 4,9264) \cdot 10^5}{23375} = 1141,2 \text{ см}^2; \text{ До ударного воздействия}$$

$$x^{cor} = 1,651 + \frac{136263 \cdot 900}{1141,2 \cdot 4600} = 23,36 \text{ см. } \xi_0^{cor} = 0,6674 > \xi_R^{cor} = \frac{0,9}{1+261/(1,4 \cdot 10^5 \cdot 0,0035)} = 0,587.$$

Большая часть сечения сжата, при ударе происходит уменьшение сжатой зоны (разгрузка части сечения) вплоть до величины $x_R^{cor} = 0,587 \cdot h^{cor} = 20,545$, тогда в уравнении (13) учитываем только величину $x^{cor} = 20,545$ см. Для использования уравнения (13) необходимо определить статический прогиб коррозионно-поврежденной колонны. Для этого можно использовать формулы (16), (17) или методику статьи [31]. Вычисляем предварительно жесткость неповрежденного и поврежденного сжатого сечения:

$$\begin{aligned} D &= \frac{0,15E_b I}{\varphi_l(0,3+\delta_e)} + 0,7E_s I_s = \frac{0,15 \cdot 27500000 \cdot 213,3 \cdot 10^{-5}}{1 \cdot (0,3+0,15)} + 0,7 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 4 \cdot 0,15^2 \cdot 6,158 \cdot 10^{-4} = \\ &= 1,381 \cdot 10^5 \text{ кН} \cdot \text{м}^2, D_{corr} = E_{red} I_{red}^{cor}, E_{red} = \frac{R_{b,ser} / \varepsilon_{bl,red} \Delta x^{cor} b_{cor} + E_s^{cor} A_s^{cor} + E_s A_s}{\Delta x^{cor} b_{cor} + A_s^{cor} + A_s} = \\ &= \frac{15 / 0,0015 \cdot 14,355 \cdot 30 + 1,4 \cdot 10^5 \cdot 3 \cdot 4,9264 + 2,0 \cdot 10^5 \cdot 6,158}{14,355 \cdot 30 + 3 \cdot 4,9264 + 6,158} = 0,168 \cdot 10^8 \text{ кН} / \text{м}^2, \end{aligned}$$

$$D_{corr} = 0,168 \cdot 10^8 \cdot 136263 \cdot 10^{-8} = 0,2289 \cdot 10^5 \text{ кН} \cdot \text{м}^2.$$

Пользуясь формулой Симпсона и формой эпюры $M(F_t)$ (рис. 7, а), формулу (17) можно привести к виду (см):

$$\begin{aligned} f &= \frac{1}{D} \left[\frac{225}{6} (2 \cdot F_t \cdot 56,25^2) + \frac{200}{6} \left(2 \cdot F_t \cdot 56,25^2 + 2 \cdot F_t \cdot \left(\frac{2}{2,5} \cdot 56,25 \right)^2 - 2 \cdot F_t \cdot \frac{2}{2,5} \cdot 56,25^2 \right) \right] + \\ &+ \frac{1}{D_{corr}} \left[\frac{50}{6} \left(2 \cdot F_t \cdot 56,25^2 + 2 \cdot F_t \cdot \left(\frac{2}{2,5} \cdot 56,25 \right)^2 + 2 \cdot F_t \cdot \frac{2}{2,5} \cdot 56,25^2 \right) \right] = (0,0235 + 0,0812) \cdot F_t = \\ &= 0,01047 \cdot F_t \end{aligned}$$

Вычисляем критическую силу $N_A = \pi^2 0,2289 \cdot 10^5 / (0,5 \cdot 4,5)^2 = 44579$ кН, эксцентризитет

$$e_{fs2} = 1 / (1 - 900 / 44579) (0,01047 F_t + (35 - 5) / 2) = 0,01086 F_t + 15,3 \text{ см,}$$

$e_{fs1} = ((35 - 5) / 2) = 15$ см. Находим значение F_t из условия прочности сечения S_1 . Подставляем значения в уравнение (13), выражая значения в кН и см, при этом поскольку удар передается по неповрежденной части учитываем динамическое упрочнение материалов в правой части коэффициенты упрочнения принимаем такими же как в верификационной задаче:

$$3600 + F_t \cdot 450 / 8 + 900 \cdot 15 \leq \left[\begin{array}{l} 1,15 \cdot 0,8625 \cdot 25 \cdot 20,545 (35 - 0,5 \cdot 20,545) + \\ 1,2 \cdot 26,1 \cdot (4,9264 + 6,158) (35 - 5) \end{array} \right].$$

Отсюда $56,25 F_t \leq 12597 + 10414 - 3600 - 13500 \rightarrow F_t = 105,1$ кН. Для прямоугольной формы импульса значение статического эквивалента нагрузки с учетом произведения коэффициентов динамичности и динамического додружения, которое равно 1,5, составит $F_{td} = 105,1 / (1,5 \cdot 1) = 70$ кН.

При такой нагрузке напряженное состояние сечения S_2 , будет вызвано моментом: $M = 1450 + 105,1 \cdot 450 / 8 + 900 \cdot (105,1 \cdot 0,01047 + 15,3) = 22522$ кН · см, предельный момент в этом сечении при отсутствии коррозии по формуле (8), определим обычным способом:

$$\alpha_R = \xi_R \left(1 - \frac{\xi_R}{2}\right) = 0,493 \left(1 - \frac{0,493}{2}\right) = 0,3714:$$

$M_{S2,ult} = R_b \cdot b \cdot h_0^2 \cdot \alpha_R + R_{sc} \cdot A_{sc} \cdot (h_0 - a'_s) = 1,15 \cdot 1,15 \cdot 40 \cdot 35^2 \cdot 0,3714 + 1,2 \cdot 43,5 \cdot 6,128 \cdot 2(35 - 5) = 24067 + 19928 = 43995 \text{ кН} \cdot \text{см} > M$, прочность сечения обеспечена. Для сечения S₁ $M_{S1,ult} = 12597 + 10414 = 23011 \text{ кН} \cdot \text{см} = M + Ne_{fs1} = 5911 + 13500 + 3600 = 23011 \text{ кН} \cdot \text{см}$.

Прочность обеспечена. Результаты расчета показаны на рисунке 8. Значение продольных сил округлялось до целого.

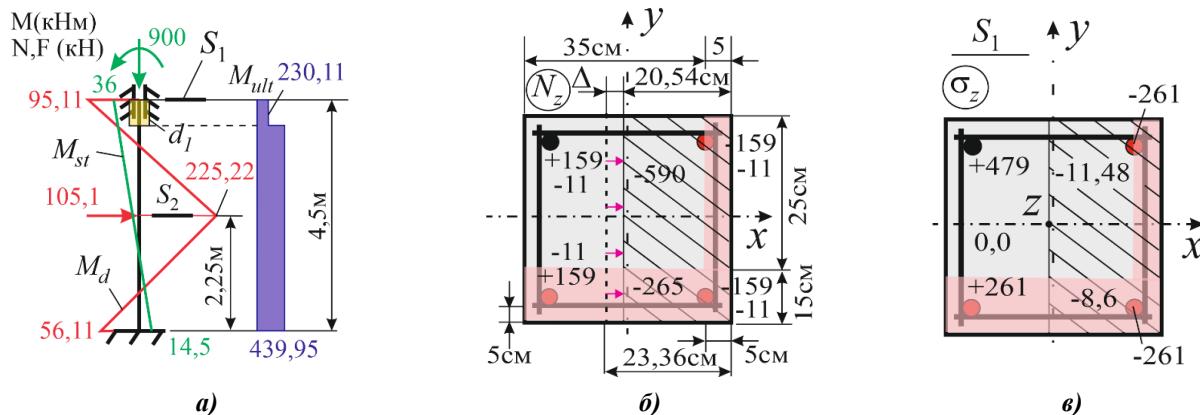


Рисунок 8 – Напряженное состояние сечений колонны в момент предразрушения: расчетная схема (а); M_{st}, M_d, M_{ult} – эпюры изгибающих моментов от статической, динамической нагрузок и предельного момента воспринимаемого сечением; продольные силы (кН), воспринимаемые элементами сечения (б); нормальные напряжения (МПа) после перераспределения усилий в предельном состоянии

Как видно из рисунка 8, а предельное состояние возникает именно в заделке с коррозионным повреждением, на схеме рис. 8, б значение усилий, приходящихся на стержни от действия воспринимаемой продольной силы (11 кН), и изгибающего момента (95,11/0,3)/2 ≈ 159 кН. С учетом нелинейной работы стали и ее размягчения при действии коррозии происходит перераспределение усилий и напряжений в стержнях. Каждый коррозионно-поврежденный стержень может воспринять 26,1*4,9264 ≈ 128 кН, тогда неповрежденный стержень воспримет оставшуюся продольную силу. Как видно из рис. 8, в, этот стержень деформируется в зоне упрочнения, т.к. напряжения 479 МПа незначительно превышают предел текучести 432 МПа. Уровень пластических деформаций в корродированных стержнях составит при билинейной диаграмме деформирования $10((159+11)-128)/(4,9264)20000=0,0042$, что в совокупности с упругими деформациями не превышает предельных деформаций разрыва стали.

Следует отметить, что в настоящей статье в качестве примера рассмотрен один из частных случаев. В общем случае методика расчета по нормальному сечению распадается на четыре варианта. Первые два, когда сила располагается в очаге коррозии, при этом возможен удар как по деградированной, так и по неповрежденной части, третий и четвертый варианты, когда сила вне очага коррозии, а момент, ею вызванный, вызывает сжатие пораженной зоны либо неповрежденной зоны. Кроме того, в результате исходного статического нагружения может оказаться так, что ударная сила вызывает переходный процесс от сжатия к растяжению бетона и наоборот, как показано на рис. 4.

Все это требует правильного учета констант и корректировки уравнений. Первый опыт расчета показал, что методика дает несколько заниженные по сравнению с численным моделированием значения. Но следует также иметь в виду, что численные модели по сравнению с предложенной методикой в зависимости от модели бетона, учета сцепления, упрочнения, образования трещин и прочих факторов дают очень большой разброс в

результатах, что заставляет усомниться в корректности такого инструмента для верификации этой задачи. Конечно, методика нуждается для дополнительной верификации и возможного уточнения в обширных экспериментальных исследованиях по получению коэффициентов динамичности, динамического догружения и закономерностях в деградации механических характеристик материалов. Требует также разработки и метод расчета по наклонным сечениям. Экспериментальные исследования с тестированием корродированных конструкций еще впереди.

4. Заключение

1. Разработан метод аналитического расчета по нормальным сечениям коррозионно-поврежденных сжато-изогнутых железобетонных элементов на поперечный удар. Он позволяет учитывать различные конфигурации и объемы коррозионных повреждений, дислокацию и размер очага коррозии, дискретность расположения рабочей арматуры и ее коррозионные повреждения для каждого из стержней, а также стеснение поперечных деформаций бетона, ограниченного связными контурами поперечной арматуры.

2. Предложенные зависимости можно взять за основу при нормировании проверочных расчетов обследуемых конструкций, а также для учета повреждений в жизненном цикле зданий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tamrazyan, A. The Bearing Capacity of Compressed Corrosion-Damaged Reinforced Concrete Elements under Lateral Pulse Loading. *Buildings* 2023, 13, 2133. <https://doi.org/10.3390/buildings13092133>
2. Колчунов В.И., Федорова Н.В., Савин С.Ю. Динамические эффекты в статически неопределеных физически и конструктивно нелинейных системах // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 9. С. 42-51. doi: 10.33622/0869-7019.
3. Тамразян А.Г. Усталостное поведение изгибаемых железобетонных балок при коррозии. Железобетонные конструкции. 2024. Т. 6. № 2. С. 22-34
4. Бондаренко В.М. Коррозионные повреждения как причина лавинного разрушения железобетонных конструкций Строительная механика и расчет сооружений. 2009. № 5 (226). С. 13-17.
5. Кудрявцев М.В., Тамразян А.Г. Методика определения несущей способности коррозионно-поврежденных колонн при сейсмических воздействиях. Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2024. Т. 24. № 1. С. 20-27.
6. Тамразян А.Г. Несущая способность коррозионно-поврежденных изгибаемых железобетонных элементов, подвергнутых огневому воздействию Academia. Архитектура и строительство. 2022. № 4. С. 130-137.
7. Sun, J.-M., Yi, W.-J., Chen, H., Peng, F., Zhou, Y., Zhang, W.-X. Dynamic Responses of RC Columns under Axial Load and Lateral Impact. *Journal of Structural Engineering*. 2023. 149(1). DOI:10.1061/j.sendh/steng-11612.
8. Zhang, W.-P., Chen, J.-P., Yu, Q.-Q., Gu, X.-L. Corrosion evolution of steel bars in RC structures based on Markov chain modeling. *STRUCTURAL SAFETY*. 2021. 88. DOI:10.1016/j.strusafe.2020.102037.
9. Zhao, W., Qian, J. Resistance mechanism and reliability analysis of reinforced concrete columns subjected to lateral impact. *International Journal of Impact Engineering*. 2020. 136. DOI:10.1016/j.ijimpeng.2019.103413.
10. Пузанков Ю.И. Прочность и деформативность сжатых железобетонных элементов при поперечной динамической нагрузке диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Московский ордена труда красного знамени инженерно-строительный институт им. В.В. Куйбышева. Москва, 1979
11. Daneshvar, K., Moradi, M.J., Ahmadi, K., Hajiloo, H. Strengthening of corroded reinforced concrete slabs under multi-impact loading: Experimental results and numerical analysis. *CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS*. 2021. 284. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2021.122650.
12. He, S., Cao, Z., Ma, J., Zeng, S., Li, P., Wang, H. Influence of Corrosion and Fatigue on the Bending Performances of Damaged Concrete Beams. *ADVANCES IN CIVIL ENGINEERING*. 2021. 2021. DOI:10.1155/2021/6693224.
13. Бондаренко В.М. Особенности силового сопротивления поврежденных коррозией железобетонных элементов знакопеременному нагружению. Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2011. № 1. С. A30-38.
14. Смоляго Г.А., Дронов А.В., Фролов Н.В. Моделирование величины коррозионных повреждений арматуры железобетонных конструкций в условиях хлоридной агрессивной среды Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. № 1 (70). С. 43-49.

15. Yu, X.-H., Dai, K.-Y., Li, Y.-S. Variability in corrosion damage models and its effect on seismic collapse fragility of aging reinforced concrete frames. CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS. 2021. 295. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2021.123654.
16. Fernandez, I., Bairán, J.M., Marí, A.R. Corrosion effects on the mechanical properties of reinforcing steel bars. Fatigue and σ - ϵ behavior. Construction and Building Materials. 2015. 101. Pp. 772–783. DOI:10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.10.139.
17. Aminulai, H.O., Robinson, A.F., Ferguson, N.S., Kashani, M.M. Nonlinear behaviour of corrosion damaged low-strength short reinforced concrete columns under compressive axial cyclic loading. Engineering Structures. 2023. 289. Pp. 116245. DOI:10.1016/J.ENGSTRUCT.2023.116245.
18. Алексейцев А.В., Антонов М.Д. Динамика безбалочных железобетонных каркасов сооружений при повреждениях плит продавливанием. Строительство и реконструкция. 2021. № 4 (96). С. 23-34.
19. Klueva, N., Emelyanov, S., Kolchunov, V., Gubanova, M. Criterion of Crack Resistance of Corrosion Damaged Concrete in Plane Stress State. Procedia Engineering. 2015. 117(1). Pp. 179–185. DOI:10.1016/J.PROENG.2015.08.144.
20. Nasser, H., Van Steen, C., Vandewalle, L., Verstrynge, E. An experimental assessment of corrosion damage and bending capacity reduction of singly reinforced concrete beams subjected to accelerated corrosion. CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS. 2021. 286. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2021.122773.
21. Алексейцев А.В., Юрусов К.В. Исследование несущей способности коррозионно-повреждаемых сжатых железобетонных элементов при поперечном действии импульсной нагрузки. Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. № 5. С. 667-682.
22. Yu, X., Robuschi, S., Fernandez, I., Lundgren, K. Numerical assessment of bond-slip relationships for naturally corroded plain reinforcement bars in concrete beams. ENGINEERING STRUCTURES. 2021. 239. DOI:10.1016/j.engstruct.2021.112309.
23. Chen, S., Duffield, C., Miramini, S., Raja, B.N.K., Zhang, L. Life-cycle modelling of concrete cracking and reinforcement corrosion in concrete bridges: A case study. ENGINEERING STRUCTURES. 2021. 237. DOI:10.1016/j.engstruct.2021.112143.
24. Luo, Y., Zheng, H., Zhang, H., Liu, Y. Fatigue reliability evaluation of aging prestressed concrete bridge accounting for stochastic traffic loading and resistance degradation. ADVANCES IN STRUCTURAL ENGINEERING. DOI:10.1177/13694332211017995.
25. Савин С.Ю., Колчунов В.И., Федорова Н.В. Несущая способность железобетонных внецентренно сжатых элементов каркасов зданий при коррозионных повреждениях в условиях особых воздействий. Железобетонные конструкции. 2023;1(1):46-54.
26. Bojorquez, J., Ponce, S., Ruiz, S.E., Bojorquez, E., Reyes-Salazar, A., Barraza, M., Chavez, R., Valenzuela, F., Leyva, H., Baca, V. Structural reliability of reinforced concrete buildings under earthquakes and corrosion effects. ENGINEERING STRUCTURES. 2021. 237. DOI:10.1016/j.engstruct.2021.112161.
27. Серпик И.Н., Курченко Н.С., Алексейцев А.В., Лагутина А.А. Анализ в геометрически, физически и конструктивно нелинейной постановке динамического поведения плоских рам при запроектных воздействиях Промышленное и гражданское строительство. 2012. № 10. С. 49-51.
28. Zhao, W., Ye, J. Dynamic behavior and damage assessment of RC columns subjected to lateral soft impact. Engineering Structures. 2022. 251. DOI:10.1016/j.engstruct.2021.113476.
29. Daneshvar, K., Moradi, M.J., Ahmadi, K., Mahdavi, G., Hariri-Ardebili, M.A. Dynamic behavior of corroded RC slabs with macro-level stochastic finite element simulations. ENGINEERING STRUCTURES. 2021. 239. DOI:10.1016/j.engstruct.2021.112056.
30. Fu, C., Fang, D., Ye, H., Huang, L., Wang, J. Bond degradation of non-uniformly corroded steel rebars in concrete. ENGINEERING STRUCTURES. 2021. 226. DOI:10.1016/j.engstruct.2020.111392.
31. Курченко Н.С., Гришков В.А. К оценке жесткости коррозионно-повреждаемых железобетонных балок. Инженерный вестник Дона. 2022. № 9 (93). С. 112-123.

REFERENCES

1. Tamrazyan A. The Bearing Capacity of Compressed Corrosion-Damaged Reinforced Concrete Elements under Lateral Pulse Loading. *Buildings*. 2023;13:2133. <https://doi.org/10.3390/buildings13092133>
2. Kolchunov V.I., Fedorova N.V., Savin S.Yu. Dinamicheskiye effekty v staticheski neopredelimykh fizicheskikh i konstruktivno nelineynykh tekhnologiyakh [Dynamic effects in statically indeterminate physically and structurally nonlinear systems]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2022;(9):42-51. doi: 10.33622/0869-7019. (rus)
3. Tamrazyan A.G. Ustalostnoye povedeniye gibkikh zhelezobetonnykh balok pri montazhe [Fatigue behavior of bending reinforced concrete beams under corrosion]. *Zhelezobetonnyye konstruktsii*. 2024;6(2):22-34. (rus)
4. Bondarenko V.M. Korrozionnyye povrezhdeniya kak prichina lavinnogo razrusheniya zhelezobetonnykh konstruktsiy [Corrosion damage as a cause of avalanche failure of reinforced concrete structures]. *Stroitel'naya mehanika i raschet sooruzheniy*. 2009;5(226):13-17. (rus)
5. Kudryavtsev M.V., Tamrazyan A.G. Metodika opredeleniya nesushchey sposobnosti korrozionno-povrezhdonnykh kolonn pri seysmicheskikh vozdeystviyah [Methodology for Determining the Bearing Capacity of

Corrosion-Damaged Columns under Seismic Impacts]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura.* 2024;24(1):20-27. (rus)

6. Tamrazyan A.G. Nesushchestvennaya zheleznyaya sposobnost' korrozionno-povrezhdennykh izgibayemykh elementov, sootvetstvuyushchikh trebovaniyam ognevogo vozdeystviya [Bearing Capacity of Corrosion-Damaged Bendable Reinforced Concrete Elements Subjected to Fire Exposure]. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo.* 2022;(4):130-137. (rus)

7. Sun J.-M., Yi W.-J., Chen H., Peng F., Zhou Y., Zhang W.-X. Dynamic Responses of RC Columns under Axial Load and Lateral Impact. *Journal of Structural Engineering.* 2023;149(1). DOI:10.1061/j.sendh/steng-11612.

8. Zhang W.-P., Chen J.-P., Yu Q.-Q., Gu X.-L. Corrosion evolution of steel bars in RC structures based on Markov chain modeling. *Structural Safety.* 2021;88. DOI:10.1016/j.strusafe.2020.102037.

9. Zhao W., Qian J. Resistance mechanism and reliability analysis of reinforced concrete columns subjected to lateral impact. *International Journal of Impact Engineering.* 2020;136. DOI:10.1016/j.ijimpeng.2019.103413.

10. Puzankov Yu.I. *Prochnost' i deformativnost' szhatykh zhelezobetonnykh elementov pri poperechnoy dinamicheskoy nagruzke* [Strength and deformability of compressed reinforced concrete elements under transverse dynamic loading]: PhD thesis. Moscow: Moscow Order of the Red Banner of Labor Civil Engineering Institute named after V.V. Kuybyshev, 1979. (rus)

11. Daneshvar K., Moradi M.J., Ahmadi K., Hajiloo H. Strengthening of corroded reinforced concrete slabs under multi-impact loading: Experimental results and numerical analysis. *Construction and Building Materials.* 2021;284. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2021.122650.

12. He S., Cao Z., Ma J., Zeng S., Li P., Wang H. Influence of Corrosion and Fatigue on the Bending Performances of Damaged Concrete Beams. *Advances in Civil Engineering.* 2021;2021. DOI:10.1155/2021/6693224.

13. Bondarenko V.M. Osobennosti silovogo soprotivleniya povrezhdennykh korroziyey zhelezobetonnykh elementov znakoperemennomu nagruzeniyu [Features of the force resistance of corrosion-damaged reinforced concrete elements to alternating loading]. *Stroitel'naya mehanika inzhenernykh konstruktsiy i sooruzheniy.* 2011;(1):30-38. (rus)

14. Smolyago G.A., Dronov A.V., Frolov N.V. Modelirovaniye velichiny korrozionnykh povrezhdeleniy armatury zhelezobetonnykh konstruktsiy v usloviyah khloridnoy agressivnoy sredy [Modeling the magnitude of corrosion damage to the reinforcement of reinforced concrete structures in an aggressive chloride environment]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta.* 2017;1(70):43-49. (rus)

15. Yu X.-H., Dai K.-Y., Li Y.-S. Variability in corrosion damage models and its effect on seismic collapse fragility of aging reinforced concrete frames. *Construction and Building Materials.* 2021;295. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2021.123654.

16. Fernandez I., Bairán J.M., Marí A.R. Corrosion effects on the mechanical properties of reinforcing steel bars. Fatigue and $\sigma-\epsilon$ behavior. *Construction and Building Materials.* 2015;101:772–783. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2015.10.139.

17. Aminulai H.O., Robinson A.F., Ferguson N.S., Kashani M.M. Nonlinear behaviour of corrosion damaged low-strength short reinforced concrete columns under compressive axial cyclic loading. *Engineering Structures.* 2023;289:116245. DOI:10.1016/j.engstruct.2023.116245.

18. Alekseytsev A.V., Antonov M.D. Dinamika bezbalochnykh zhelezobetonnykh karkasov sooruzheniy pri povrezhdeniyakh plit prodavlivaniyem [Dynamics of beam-free reinforced concrete frames of structures with slab damage due to punching]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya.* 2021;4(96):23-34. (rus)

19. Klueva N., Emelyanov S., Kolchunov V., Gubanova M. Criterion of Crack Resistance of Corrosion Damaged Concrete in Plane Stress State. *Procedia Engineering.* 2015;117(1):179–185. DOI:10.1016/j.proeng.2015.08.144.

20. Nasser H., Van Steen C., Vandewalle L., Verstrynghe E. An experimental assessment of corrosion damage and bending capacity reduction of singly reinforced concrete beams subjected to accelerated corrosion. *Construction and Building Materials.* 2021;286. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2021.122773.

21. Alekseytsev A.V., Yurusov K.V. Issledovaniye nesushchey sposobnosti korrozionno-povrezhdayemykh szhatykh zhelezobetonnykh elementov pri poperechnom deystvii impulsnoy nagruzki [Study of the bearing capacity of corrosion-damaged compressed reinforced concrete elements under transverse impulse load]. *Vestnik MGSU.* 2025;20(5):667-682. (rus)

22. Yu X., Robuschi S., Fernandez I., Lundgren K. Numerical assessment of bond-slip relationships for naturally corroded plain reinforcement bars in concrete beams. *Engineering Structures.* 2021;239. DOI:10.1016/j.engstruct.2021.112309.

23. Chen S., Duffield C., Miramini S., Raja B.N.K., Zhang L. Life-cycle modelling of concrete cracking and reinforcement corrosion in concrete bridges: A case study. *Engineering Structures.* 2021;237. DOI:10.1016/j.engstruct.2021.112143.

24. Luo Y., Zheng H., Zhang H., Liu Y. Fatigue reliability evaluation of aging prestressed concrete bridge accounting for stochastic traffic loading and resistance degradation. *Advances in Structural Engineering.* DOI:10.1177/13694332211017995.

25. Savin S.Yu., Kolchunov V.I., Fedorova N.V. Nesushchaya sposobnost' zhelezobetonnykh vnetsentrenno szhatykh elementov karkasov zdaniy pri korrozionnykh povrezhdeniyakh v usloviyah osobykh

vozdeystviy [Bearing capacity of reinforced concrete eccentrically compressed elements of building frames under corrosion damage under special influences]. *Zhelezobetonnyye konstruktsii*. 2023;1(1):46-54. (rus)

26. Bojorquez J., Ponce S., Ruiz S.E., Bojorquez E., Reyes-Salazar A., Barraza M., Chavez R., Valenzuela F., Leyva H., Baca V. Structural reliability of reinforced concrete buildings under earthquakes and corrosion effects. *Engineering Structures*. 2021;237. DOI:10.1016/j.engstruct.2021.112161.

27. Serpik I.N., Kurchenko N.S., Alekseytsev A.V., Lagutina A.A. Analiz v geometricheski, fizicheski i konstruktivno nelineynoy postanovke dinamicheskogo povedeniya ploskikh ram pri zaproyektivakh vozdeystviyakh [Analysis of the dynamic behavior of flat frames under beyond-design-basis loads in a geometrically, physically, and structurally nonlinear formulation]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2012;(10):49-51. (rus)

28. Zhao W., Ye J. Dynamic behavior and damage assessment of RC columns subjected to lateral soft impact. *Engineering Structures*. 2022;251. DOI:10.1016/j.engstruct.2021.113476.

29. Daneshvar K., Moradi M.J., Ahmadi K., Mahdavi G., Hariri-Ardebili M.A. Dynamic behavior of corroded RC slabs with macro-level stochastic finite element simulations. *Engineering Structures*. 2021;239. DOI:10.1016/j.engstruct.2021.112056.

30. Fu C., Fang D., Ye H., Huang L., Wang J. Bond degradation of non-uniformly corroded steel rebars in concrete. *Engineering Structures*. 2021;226. DOI:10.1016/j.engstruct.2020.111392.

31. Kurchenko N.S., Grishkov V.A. K otsenke zhestkosti korrozionno-povrezhdayemykh zhelezobetonnykh balok [On the assessment of the rigidity of corrosion-damaged reinforced concrete beams]. *Inzhenernyy vestnik Dona*. 2022;9(93):112-123. (rus)

Информация об авторах

Алексейцев Анатолий Викторович

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

Доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Железобетонные и каменные конструкции».

Тел. 8(495)287-49-14 доб. 3059

E-mail: aalexw@mail.ru

Юрусов Константин Валерьевич

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

аспирант кафедры «Железобетонные и каменные конструкции».

E-mail: walrk@mail.ru

Information about authors

Alekseytsev Anatoliy V.

Moscow State University of Civil Engineering

Doctor of Engineering, Prof. of Department "Reinforced concrete and stone structures"

Ph.: 8(495)287-49-14 доб. 3059

E-mail: aalexw@mail.ru

Yurusov Konstantin V.

Moscow State University of Civil Engineering

post-graduate student of department "Reinforced concrete and stone structures"

E-mail: walrk@mail.ru

Статья поступила в редакцию 26.09.2025

Одобрена после рецензирования 01.10.2025

Принята к публикации 11.10.2025

The article was submitted 26.09.2025

Approved after reviewing 01.10.2025

Accepted for publication 11.10.2025

В.С. МОСКОВЦЕВА^{1,2}

¹ НИУ «Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия

² Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, г. Москва, Россия

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРА ЖИВУЧЕСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ РАМНОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ОСОБОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Аннотация. Приведена практическая методика для определения параметра живучести железобетонного рамного каркаса многоэтажного здания со сложноНапряженными элементами при статико-динамическом деформировании, вызванном особым воздействием и алгоритм численно-аналитической реализации этой методики. Значения параметрической нагрузки, при которой в наиболее напряженном пространственном сечении при рассматриваемом режиме нагружения наступает один из критериев особого предельного состояния, получены из решения системы канонических уравнений варианта смешанного метода. В соответствии с этим методом, решение задачи нелинейного деформирования рамной системы построено с использованием модели подконструкции рамной системы, описываемой шарниро-стержневой моделью, в которой места возможного выключения связей заменяют сложными шарнирами, неизвестными угловыми и линейными связями. Предложенная методика расчета живучести железобетонных рам со сложноНапряженными элементами удовлетворительно описывает процесс их деформирования и исчерпания несущей способности конструктивно нелинейной рамной системы при рассматриваемых особых воздействиях.

Ключевые слова: железобетонная рама, сложное напряженное состояние, особое воздействие, расчетная модель, параметр живучести

V.S. MOSKOVTCSEVA^{1,2}

¹ Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation

² Scientific Research Institute of Construction Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow, Russian Federation

CALCULATION OF ROBUSTNESS PARAMETER OF REINFORCED CONCRETE FRAME SYSTEM UNDER SPECIAL IMPACT

Abstract. A practical technique for determining the survivability parameter of reinforced concrete frame frame of a multi-storey building with complex-stressed elements under static-dynamic deformation caused by a special impact and an algorithm for numerical and analytical realization of this technique are presented. The values of parametric load, at which one of the criteria of special limit state occurs in the most stressed spatial section under the considered loading mode, are obtained from the solution of the system of canonical equations of the mixed method variant. In accordance with this method, the solution of the problem of nonlinear deformation of the frame system is constructed using the model of the substructure of the frame system described by the hinge-bar model, in which the places of possible disconnection of links are replaced by complex hinges, unknown angular and linear links. The proposed method of calculation of survivability of reinforced concrete frames with complex stressed elements satisfactorily describes the process of their deformation and exhaustion of bearing capacity of a structurally nonlinear frame system under the considered special impacts.

Keywords: reinforced concrete frame, complex stress state, special impact, calculation model, survivability parameter

1. Введение

На современном этапе развития научной деятельности в области безопасности строительных конструкций особое внимание уделяется исследованию методов защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Такая актуальная и стремительно развивающаяся область научного знания выходит на передний план строительной науки ввиду все увеличивающегося числа техногенных аварий, природных катастроф и актов терроризма. Определение «живучести» в известных отечественных [1, 2] и зарубежных [3, 4] публикациях рассматривается как способность конструктивной системы сохранять определенный уровень работоспособности при наличии повреждений, то есть перераспределять усилия между остальными элементами в случае выхода из строя или ослабления одного из них, продолжая выполнять свои основные функции, пусть и с некоторыми ограничениями. Внедрение в область строительной науки понятия живучесть, подразумевающего сопротивление конструктивной системы повреждениям при особых воздействиях за счет пластических деформаций или специально спроектированных механизмов перераспределения в конструктивной системе силовых потоков, вызвано потребностью в комплексном подходе к исследованию конструкций жилых и промышленных объектов в запредельных состояниях. Обеспечение живучести сооружений представляет собой многогранную задачу, которая не поддается решению традиционными методами, комплексный анализ живучести требует использования не только численного моделирования, но и экспериментальных исследований. К настоящему времени в стране [5-7] и за рубежом [8-11] накоплены определенные результаты теоретических исследований по изучению сопротивления железобетонных конструкций в запредельных состояниях, вызванных особыми и аварийными воздействиями, в их числе и воздействиями, вызванными удалением несущего элемента или связи. Анализ выполненных экспериментальных исследований [12-17] отечественных и зарубежных ученых показал, что использование традиционных физических моделей, критериев предельных состояний железобетона и простейших видов напряженного состояния, без учета режимов нагружения конструкций не отражает особенности их статико-динамического деформирования и как правило приводит к снижению уровня механической безопасности, а в отдельных случаях и к значительно завышенному расходу материалов. Подобные исследования параметров живучести строительных конструкций, направленные на обеспечение защиты конструкций от прогрессирующего обрушения и их нормирование, сталкиваются с рядом новых научных проблем. Одна из сложностей заключается в учете поведения железобетонных рамных каркасов при сложнонапряженном состоянии в их несущих элементах. Существующие российские и зарубежные публикации, посвященные живучести и проблеме защиты от прогрессирующего обрушения конструктивных систем, практически не затрагивают вопросы расчета именно таких конструкций. В работе [18] предлагается вариант полуаналитического подхода к определению приращений динамических усилий в сложнонапряженных железобетонных элементах многоэтажных рам в запредельных состояниях, вызванных структурной перестройкой конструкции при особом воздействии. В связи с этим в настоящей статье предложена методика численно-аналитического расчета параметра живучести конструктивных систем каркасов многоэтажных зданий с ригелями, испытывающими сложное сопротивление изгиб с кручением и алгоритм реализации этой методики. В современных условиях, когда требования к безопасности и устойчивости к прогрессирующему обрушению становятся всё более строгими, разработка и реализация таких методик становится неотъемлемой частью проектирования и анализа строительных объектов.

2. Модели и методы

В соответствии с принятым определением термина «живучесть», которое связывается с изменением степени статической неопределенности рамной системы, а также с ее геометрической изменяемостью, количественно оценить такие структурные изменения предлагается с применением параметра живучести λ . Количественно этот параметр равен значению параметрической нагрузки при которой в конструктивной статически неопределенной рамной системе начинаются структурные преобразования в виде возникновения пластического шарнира и по мере увеличения этой нагрузки и появления новых пластических шарниров конструктивная система превращается в изменяемую.

Для расчета параметра живучести применяется двухуровневая первичная и вторичная расчетная схема, позволяющая оценивать сопротивляемость конструкции прогрессирующему обрушению. Расчет по первичной расчетной схеме осуществляется численным методом с использованием современных программных комплексов для всей рамной конструктивной системы (рисунок 1а). На втором уровне, с использованием вторичной расчетной схемы, рассматривается подконструкция, определяющаяся зоной возможного локального разрушения, которая, в соответствии с нормами [19], ограничивается пролетом ригелей, примыкающих к колонне, подверженной особому воздействию (рисунок 1б). Для рассматриваемого рамного каркаса здания эта подконструкция представляется моделью в виде стержневого полигона (рисунок 1б). Зоны возможного образования пластических шарниров в стержневом полигоне обозначены номерами ($k=1,2,3\dots$). Расположение этих зон определяется сечениями, где в бетоне и арматуре при увеличении на конструкцию параметрической нагрузки (λP) и соответственно внутренних усилий - крутящего и изгибающего моментов, в подконструкции могут достигаться предельные усилия и образовываться пластические шарниры. Предварительно выбор этих зон не представляет сложности. Они назначаются в узлах пересечения элементов, в точках приложения сосредоточенных сил, в местах резкого изменения сечений и жесткостей элементов. Для определения неизвестных усилий исследуемой подконструкции используется вариант смешанного метода строительной механики [20].

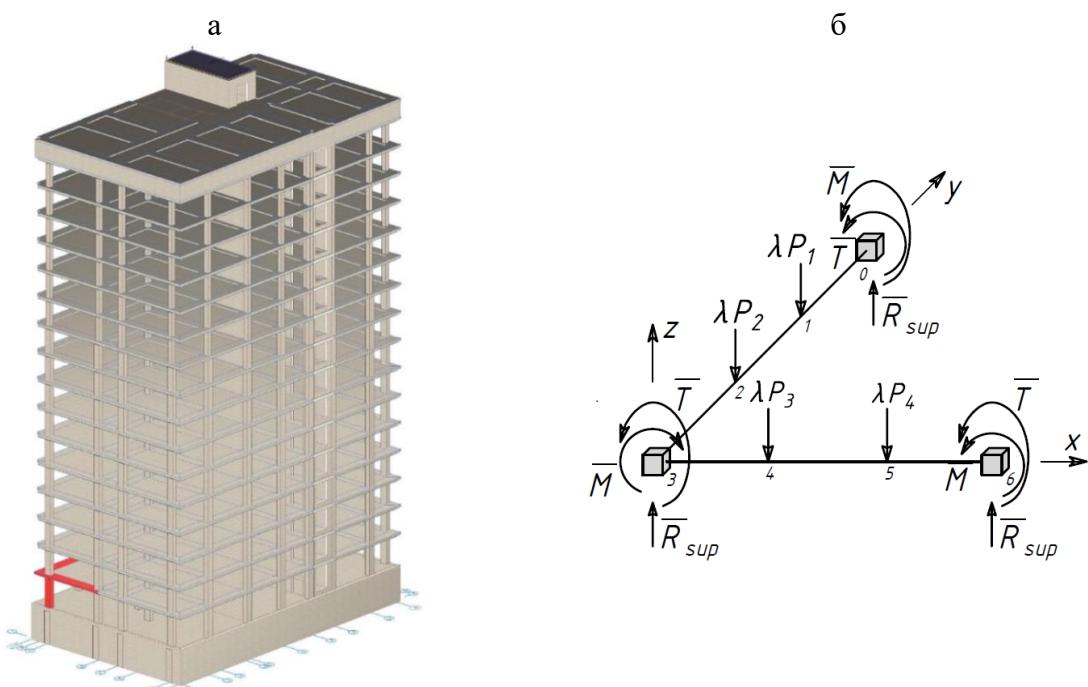


Рисунок 1 – Расчетная схема каркаса здания (а) и расчетная схема подконструкции в зоне локального разрушения пространственной рамной системы (б)

Согласно [20], начальная система канонических уравнений в матричной форме формируется в виде:

$$\begin{cases} A \cdot M + B \cdot Z + \Delta_q + \delta_p \cdot \lambda = 0 \\ C \cdot M + 0 + R_q + r_p \cdot \lambda = 0 \end{cases}. \quad (1)$$

Коэффициенты канонических уравнений δ_{ij} и δ'_{ij} вычисляются после построения единичных эпюор моментов путем их перемножения в соответствии с правилами строительной механики:

$$\delta_{ij} = \sum \int \frac{\bar{M}_i \cdot \bar{M}_j}{EI} dx = \sum \frac{\bar{M}_i \cdot \bar{M}_j}{EI} \quad (2)$$

Коэффициенты Δ_{ip} определяются подобным образом, перемножая соответствующие грузовые эпюры, построенные от внешних сил:

$$\Delta_{ip} = \sum \int \frac{\bar{M}_i \cdot M_p}{EI} dx = \sum \frac{\bar{M}_i \cdot M_p}{EI} \quad (3)$$

Построение эпюры моментов от внешней параметрической нагрузки λ используется в нахождении грузовых коэффициентов δ_{ip} , ее перемножением с единичной эпюрой моментов. Далее с использованием выражения (4) и эпюры единичных моментов получаем эпюру поперечных сил Q .

$$Q_{k-k+1} = \frac{M_{np} - M_l}{l}. \quad (4)$$

Затем необходимые реакции r'_{ij} (из эпюр единичных моментов), R_{jp} (из эпюр моментов от внешних сил), r_{ip} (из эпюр моментов от внешней параметрической нагрузки λ) определяются методом сечений.

Принимая в расчет свойства канонических уравнений и опираясь на исходную систему в матричной форме (1), производится ее преобразование:

$$\begin{vmatrix} A & B \\ -B^T & 0 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \bar{M} \\ \bar{Z} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \bar{\Delta}_q \\ \bar{R}_q \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 \\ \bar{r}_p \end{vmatrix} \cdot \lambda = 0. \quad (5)$$

Ее решение, выполняемое с применением Mathcad имеет следующий вид:

$$\begin{vmatrix} \bar{M} \\ \bar{Z} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \bar{M}_q \\ \bar{Z}_q \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \bar{m}_p \\ \bar{z}_p \end{vmatrix} \cdot \lambda, \quad (6)$$

где

$$\begin{vmatrix} \bar{M}_q \\ \bar{Z}_q \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A & B \\ -B^T & 0 \end{vmatrix}^{-1} \cdot \begin{vmatrix} \bar{\Delta}_q \\ \bar{R}_q \end{vmatrix}; \quad \begin{vmatrix} \bar{m}_p \\ \bar{z}_p \end{vmatrix} = -\begin{vmatrix} A & B \\ -B^T & 0 \end{vmatrix}^{-1} \cdot \begin{vmatrix} 0 \\ \bar{r}_p \end{vmatrix}. \quad (7)$$

Учитывая суммарное действие заданной нагрузки и параметрической по формуле (8), определяются моменты в выключающихся связях подконструкции рамы:

$$M_j = M_{jq} + m_{jp} \cdot \lambda, \quad (j=1,2,\dots,k), \quad (8)$$

где M_{jq} и m_{jp} - элементы матрицы столбцов \bar{M}_q и \bar{m}_p

Образование пластического шарнира в сечении C_j наиболее напряженного элемента подконструкции определяется приложенным уровнем параметрической нагрузки $\lambda_m, (m=1,2,3)$. Значение этой нагрузки определяется следующим критерием:

$$\lambda_m = \min \left(\frac{M_{j,ult}^d \pm |M_{jq}^d|}{m_{jp}^d} \right), \quad (j=1,2,\dots,k) \quad (9)$$

Если в каком-либо сечении подконструкции динамический момент достигает предельного значения, в этом сечении образуется пластический шарнир, статическая неопределенность подконструкции уменьшается на единицу и тогда в исходную систему

уравнений (1) вносятся изменения: в матрице \mathbf{A} вычеркивают j -ю строку и j -ый столбец, в матрице \mathbf{B} - удаляется j -ая строка. При этом, соответственно, должны быть скорректированы и грузовые коэффициенты $\vec{\Delta}_q$ и \vec{R}_q следующим образом:

$$\begin{aligned}\Delta_{iq}^{(l)} &= \Delta_{iq} + \delta_{ip} \cdot \lambda_m + \delta_{il} \cdot (\pm M_{l,ult}^d) \\ R_{iq}^{(l)} &= R_{iq} + r_{ip} \cdot \lambda_m + r_{il} \cdot (\pm M_{l,ult}^d)\end{aligned}\quad (10)$$

Находим приращение параметрической нагрузки по завершении преобразования системы определяющих уравнений, где полученная на предыдущем этапе станет исходной системой.

$$\lambda_{mi} = \lambda_{m,i-1} + \Delta_{m,i-1} \quad (11)$$

Исходя из представленной методики осуществляется численный процесс формирования шарниров в пластической стадии деформирования. Блок-схема рисунка 2 отражает описанный алгоритм для определения параметрической нагрузки, позволяющий пошагово оценивать состояние конструкции, включая формирование исходных данных, процесс корректировки жесткостей конструктивной системы и структурных изменений в конструкции. На каждом этапе нагружения вычисляются минимальные значения параметрической нагрузки, позволяющие выявить наиболее напряженные сечения, подверженные образованию пространственных пластических шарниров. Это позволяет на каждом этапе нагружения оценить запас живучести железобетонной рамной системы, а также вычислять относительные значения параметра живучести, т.е. отношение параметрической нагрузки на заданном уровне статического нагружения к максимальному ее значению.

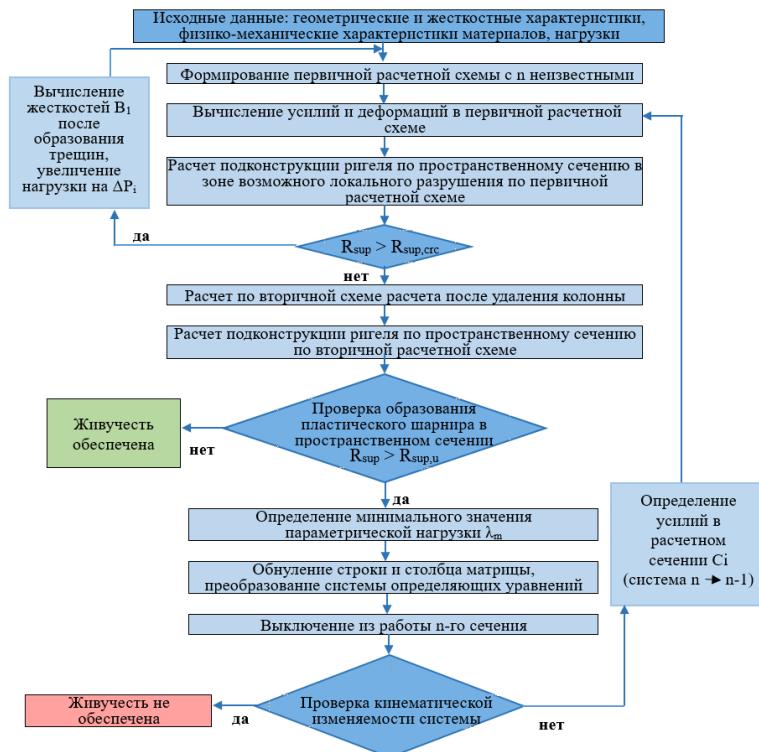


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма итерационного расчета живучести железобетонной рамы со сложноподвижными элементами

В качестве примера реализации представленного алгоритма приведен численный расчет по определению параметра живучести для отдельного элемента плоского каркаса – подконструкции ригеля, нагруженного двумя сосредоточенными силами в третьих пролетах

(рисунок 3). Исходные характеристики, принятые в расчете: бетон В15, $l = 0,9\text{м}$, $0,1 \times 0,1\text{м}$, $I = 8,33 \cdot 10^{-6}\text{м}^4$, $E_b = 2,3 \cdot 10^7\text{кН/м}^2$, $M_{np} = 1,8\text{кНм}$.

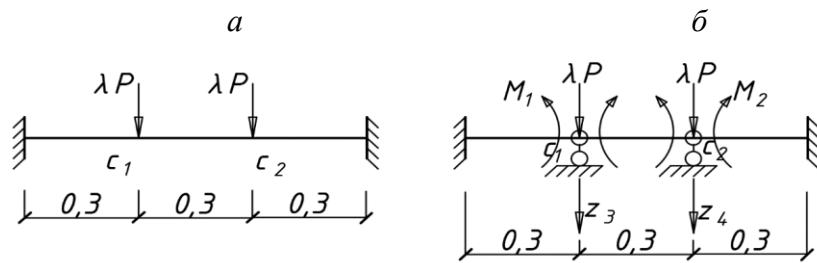


Рисунок 3 – Заданная (а) и основная (б) системы смешанного метода при определении параметра жестичести λ

Развёрнутый вид системы канонических уравнений с грузовыми коэффициентами:

$$\left. \begin{aligned} \delta_{11}M_1 + \delta_{12}M_2 + \delta_{13}z_3 + \delta_{14}z_4 + \Delta_{1p} + \delta_{1p}\lambda_p &= 0 \\ \delta_{21}M_1 + \delta_{22}M_2 + \delta_{23}z_3 + \delta_{24}z_4 + \Delta_{2p} + \delta_{2p}\lambda_p &= 0 \\ r_{31}M_1 + r_{32}M_2 + r_{33}z_3 + r_{34}z_4 + R_{3p} + r_{3p}\lambda_p &= 0 \\ r_{41}M_1 + r_{42}M_2 + r_{43}z_3 + r_{44}z_4 + R_{4p} + r_{4p}\lambda_p &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (12)$$

Коэффициенты δ_{ji} канонических уравнений (12) можно найти путем перемножения соответствующих единичных эпюр (рисунок 4).

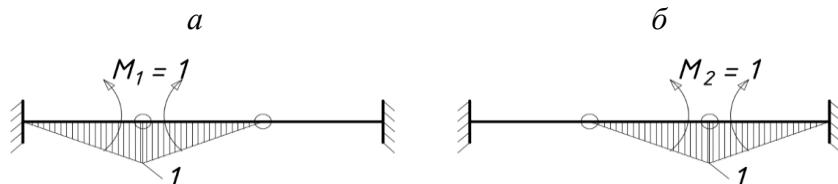


Рисунок 4 – Единичные эпюры, построенные в основной системе смешанного метода от момента M_1 (а) и M_2 (б)

$$\delta_{11} = \sum \int \frac{\bar{M}_1 \cdot \bar{M}_1}{EI} dx = \frac{0,3}{6EI} \cdot 2(0 \cdot 0 + 4 \cdot 0,5 \cdot 0,5 + 1 \cdot 1) = \frac{0,6}{3EI};$$

$$\delta_{12} = \delta_{21} = \sum \int \frac{\bar{M}_1 \cdot \bar{M}_2}{EI} dx = \frac{0,3}{6EI} (1 \cdot 0 + 4 \cdot 0,5 \cdot 0,5 + 0 \cdot 1) = \frac{0,3}{6EI};$$

$$\delta_{22} = \sum \int \frac{\bar{M}_2 \cdot \bar{M}_2}{EI} dx = \frac{0,3}{6EI} \cdot 2(0 \cdot 0 + 4 \cdot 0,5 \cdot 0,5 + 1 \cdot 1) = \frac{0,6}{3EI}.$$

С применением способа вырезания узлов для c_1 и c_2 , вычисляются коэффициенты r_{ji} используя значения поперечных сил, вызванных единичными моментами M_1 и M_2 (рисунок 5).

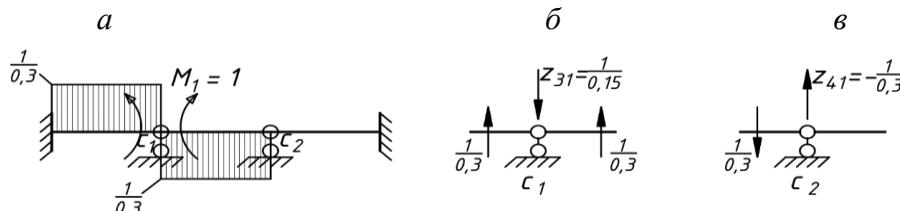


Рисунок 5 – Эпюра Q в основной системе от единичного момента M_1 (а) и схемы усилий в узлах c_1 (б) и c_2 (в)

$$Q_{0-1} = \frac{M_{np} - M_{\lambda}}{l} = \frac{1}{0,3}; \quad Q_{1-2} = \frac{M_{np} - M_{\lambda}}{l} = -\frac{1}{0,3}$$

$$r_{31} = \frac{1}{0,15}; \quad r_{41} = -\frac{1}{0,3}$$

Подобным способом найдены значения коэффициентов: $r_{32} = -\frac{1}{0,3}$; $r_{42} = \frac{1}{0,15}$

Построив эпюры моментов от параметрической нагрузки λP и внешних сил $P=2,6\text{kN}$ (рисунок 6), можно определить значения грузовых коэффициентов Δ_{ip} и R_{ip}

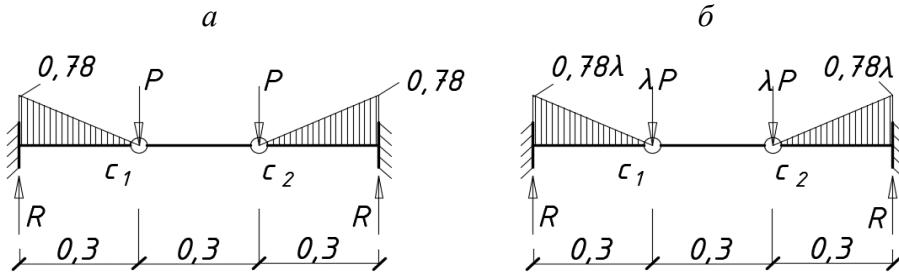


Рисунок 6 – Эпюры моментов M_P в основной системе смешанного метода от заданной нагрузки (а) и внешней параметрической нагрузки (б)

$$\Delta_{1P} = \sum \int \frac{\bar{M}_1 \cdot M_P}{EI} dx = \frac{0,3}{6EI} (0 \cdot 0,78 + 4 \cdot 0,5 \cdot 0,39 + 1 \cdot 0) = \frac{0,234}{6EI};$$

$$\Delta_{2P} = \sum \int \frac{\bar{M}_2 \cdot M_P}{EI} dx = \frac{0,3}{6EI} (0 \cdot 0,78 + 4 \cdot 0,5 \cdot 0,39 + 1 \cdot 0) = \frac{0,234}{6EI};$$

$$R_{3P}=2,6; \quad R_{4P}=2,6.$$

$$\delta_{1P} = \sum \int \frac{\bar{M}_1 \cdot M_P}{EI} dx = \frac{0,3}{6EI} (0 \cdot 0,78\lambda + 4 \cdot 0,5 \cdot 0,39\lambda + 1 \cdot 0) = \frac{0,234\lambda}{6EI};$$

$$\delta_{2P} = \sum \int \frac{\bar{M}_2 \cdot M_P}{EI} dx = \frac{0,3}{6EI} (0 \cdot 0,78\lambda + 4 \cdot 0,5 \cdot 0,39\lambda + 1 \cdot 0) = \frac{0,234\lambda}{6EI};$$

$$r_{3P} = \lambda; \quad r_{4P} = \lambda.$$

Система канонических уравнений в матричной форме представлена следующим образом:

$$\begin{cases} A \cdot M + B \cdot Z + \Delta_q + \delta_p \cdot \lambda = 0 \\ C \cdot M + 0 + R_q + r_p \cdot \lambda = 0 \end{cases}. \quad (13)$$

Подставляя числовые значения в матрицы коэффициентов системы уравнений (13) для рассматриваемой подконструкции ригеля рамы получены:

- коэффициенты при неизвестных A, B, C :

$$A = \begin{vmatrix} 0,6 & 0,3 \\ 3EI & 6EI \end{vmatrix}; \quad B = \begin{vmatrix} 1 & -1 \\ 0,15 & -0,3 \end{vmatrix}; \quad C = -B^T \quad (14)$$

$$A = \begin{vmatrix} 0,6 & 0,3 \\ 3EI & 6EI \end{vmatrix}; \quad B = \begin{vmatrix} 1 & -1 \\ 0,15 & -0,3 \end{vmatrix}; \quad C = -B^T$$

- грузовые коэффициенты $\Delta_p, R_p, \delta_p, r_p$

$$\Delta_p = \begin{vmatrix} 0,234 \\ 6EI \\ 0,234 \\ 6EI \end{vmatrix}; \quad R_p = \begin{vmatrix} 2,6 \\ 2,6 \end{vmatrix}; \quad \delta_p = \begin{vmatrix} 0,234\lambda \\ 6EI \\ 0,234\lambda \\ 6EI \end{vmatrix}; \quad r_p = \begin{vmatrix} \lambda \\ \lambda \end{vmatrix}. \quad (15)$$

Решая матричное уравнение (15)

$$\begin{vmatrix} A & B \\ -B^T & 0 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} M \\ Z \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \Delta_P \\ R_P \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \delta_P \\ r_P \end{vmatrix} \cdot \lambda = 0, \quad (16)$$

получим:

$$\begin{vmatrix} \vec{M}_P \\ \vec{Z}_P \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \vec{M}_P \\ \vec{Z}_P \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \vec{m}_P \\ \vec{z}_P \end{vmatrix} \cdot \lambda, \quad (17)$$

где $\begin{vmatrix} \vec{M}_P \\ \vec{Z}_P \end{vmatrix} = -\begin{vmatrix} A & B \\ -B^T & 0 \end{vmatrix}^{-1} \cdot \begin{vmatrix} \vec{\Delta}_P \\ \vec{R}_P \end{vmatrix}; \quad \begin{vmatrix} \vec{m}_P \\ \vec{z}_P \end{vmatrix} = -\begin{vmatrix} A & B \\ -B^T & 0 \end{vmatrix}^{-1} \cdot \begin{vmatrix} \vec{\delta}_P \\ \vec{r}_P \end{vmatrix}. \quad (18)$

Численное решение уравнений (18) в программе Mathcad:

$$\begin{vmatrix} \vec{M}_P \\ \vec{Z}_P \end{vmatrix} = -\begin{bmatrix} \frac{0,6}{3EI} & \frac{0,3}{6EI} & \frac{1}{0,15} & -\frac{1}{0,3} \\ \frac{0,3}{6EI} & \frac{0,6}{3EI} & -\frac{1}{0,3} & \frac{1}{0,15} \\ -\frac{1}{0,15} & \frac{1}{0,3} & 0 & 0 \\ \frac{1}{0,3} & -\frac{1}{0,15} & 0 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 0,234 \\ \frac{0,234}{6EI} \\ 0,234 \\ \frac{0,234}{6EI} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,779999999900 \\ 0,779999999900 \\ -280,912364799 \\ -280,912364799 \end{bmatrix}$$

$$\begin{vmatrix} \vec{m}_P \\ \vec{z}_P \end{vmatrix} = -\begin{bmatrix} \frac{0,6}{3EI} & \frac{0,3}{6EI} & \frac{1}{0,15} & -\frac{1}{0,3} \\ \frac{0,3}{6EI} & \frac{0,6}{3EI} & -\frac{1}{0,3} & \frac{1}{0,15} \\ -\frac{1}{0,15} & \frac{1}{0,3} & 0 & 0 \\ \frac{1}{0,3} & -\frac{1}{0,15} & 0 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 0,234\lambda \\ \frac{0,234\lambda}{6EI} \\ 0,234\lambda \\ \frac{0,234\lambda}{6EI} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,3000000000\lambda \\ 0,3000000000\lambda \\ -136,8547419\lambda \\ -136,8547419\lambda \end{bmatrix}$$

Получаем решение уравнения (17) в программе Mathcad в численном виде, подставив сформированные матрицы:

$$\begin{vmatrix} \vec{M} \\ \vec{Z} \end{vmatrix} = \begin{bmatrix} 0,779999999900 \\ 0,779999999900 \\ -280,912364799 \\ -280,912364799 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,3000000000\lambda \\ 0,3000000000\lambda \\ -136,8547419\lambda \\ -136,8547419\lambda \end{bmatrix} \cdot \lambda \rightarrow$$

$$M_{np} = \begin{vmatrix} 0,7799 + 0,3\lambda^2 \\ 0,7799 + 0,3\lambda^2 \\ -280,9 - 136,85\lambda^2 \\ -280,9 - 136,85\lambda^2 \end{vmatrix} = 1,8 \text{ кНм}$$

Для сечения с1: $\lambda_1 = \begin{pmatrix} 1,44 \\ -1,44 \end{pmatrix}$

Параметр λ_2 определяется аналогично при увеличении значения статической нагрузки на первом этапе статико-динамического нагружения и повторения описанных процедур. Критерием живучести рассматриваемой конструкции служит постепенное изменение параметра нагрузки λ_m , ($m=1,2,3$) от образования пластических шарниров и уменьшения статической неопределенности конструкции. Этап расчета, когда определитель матрицы системы уравнений становится равным нулю, свидетельствует о том, что исследуемая конструктивная система не может воспринимать нагрузки и становится изменяющейся. Такое состояние конструктивной системы указывает на исчерпание ее живучести.

3. Результаты исследования и их анализ

Из результатов расчета (рисунок 7) получено первоначальное появление пространственных пластических шарниров в сечениях C_0 и C_1 при параметрической нагрузке $\lambda_1 = 1,44$. При дальнейшем ее увеличении ($\lambda_2 = 1,84$) возникают последующие шарниры в пластической стадии деформирования в сечениях C_2 и C_3 , что приводит к геометрической изменяемости рассматриваемой конструкции и ее разрушению.

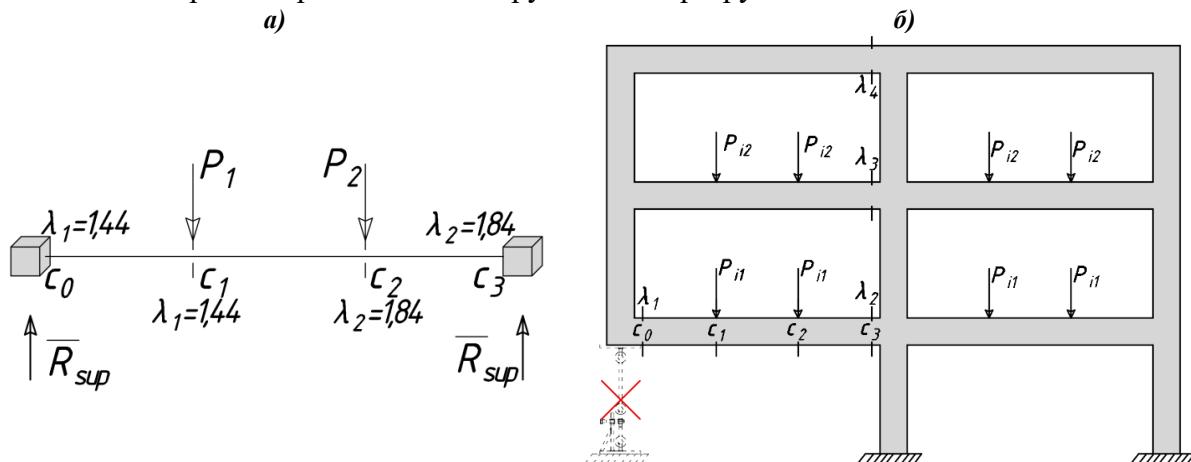


Рисунок 7 – Расчетное значение параметра живучести для подконструкции рамы (а) и последовательность выключения сечений ригеля при увеличении параметрической нагрузки (б), где λ_m ($m=1, 2, 3$) – последовательность образования пространственных пластических шарниров

На рисунке 8 показан дискретно изменяющийся график параметрической нагрузки (λ), который позволяет видеть процесс изменения статической неопределенности подконструкции рамной системы в процессе увеличения уровня прикладываемой статической нагрузки на первом этапе ее статико-динамического нагружения.

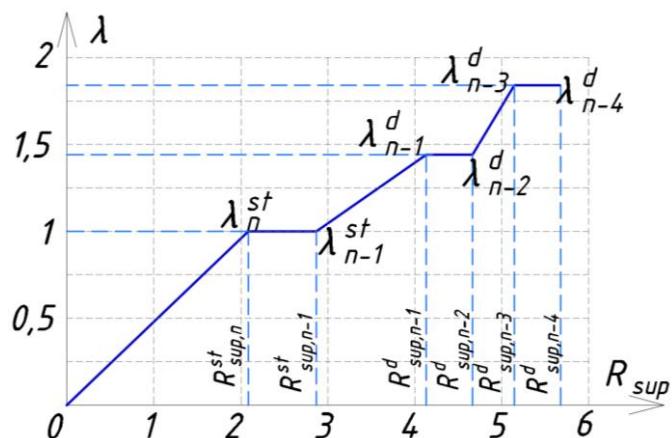


Рисунок 8 – Изменение параметрической нагрузки λ при образовании пластических шарниров в зависимости от уровня статической нагрузки на первом этапе нагружения подконструкции

Остаточный ресурс работоспособности конструктивной системы удобно анализировать, используя относительное значение рассматриваемого параметра живучести λ/λ_{max} . График в координатах « $\lambda/\lambda_{max} - G/G_u$ » (рисунок 9) демонстрирует изменение этого параметра по мере образования в конструкции шарниров в пластической стадии деформирования.

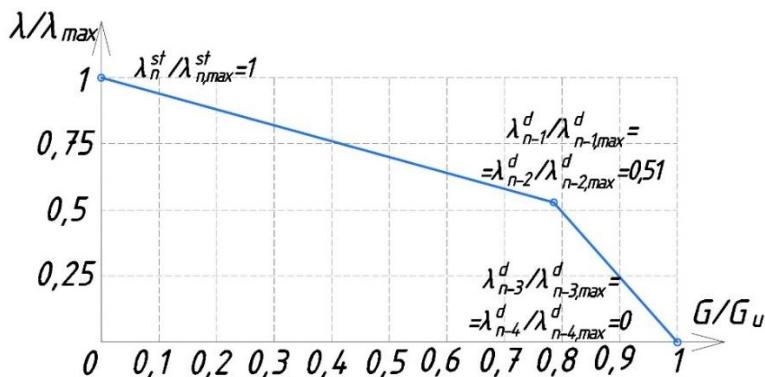


Рисунок 9 – График изменения относительного значения параметра живучести λ/λ_{\max} .

Значение $\lambda/\lambda_{\max}=1$, соответствует исходной статической неопределенности рамы, а относительный параметр живучести $\lambda/\lambda_{\max}=0$ соответствует изменяемой конструкции рамы. Промежуточные значения рассматриваемого параметра λ/λ_{\max} определяются в зависимости от количества образовавшихся пластических шарниров.

4. Заключение

1. На основе смешанного метода строительной механики для железобетонных статически неопределенных рам построены расчетная модель, методика и алгоритм расчета параметра живучести железобетонных каркасов многоэтажных зданий с ригелями, испытывающими сложное сопротивление, при режимном статико-динамическом нагружении.

2. Показано, что параметр живучести рамной системы зависит от значения статической нагрузки, прикладываемой на первом этапе нагружения, степени статической неопределенности конструкции, жесткостных параметров на разных этапах нагружения и вида напряженного состояния в ее элементах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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
- Колчунов В.И., Клюева Н.В., Андросова Н.Б., Бухтиярова А.С. Живучесть зданий и сооружений при запроектных воздействиях. М.: ACB, 2014. 208 с
- Lorengo M., Ma J. Development of complementary structural robustness metrics based on failure-induced stress redistribution // Engineering Structures, 2022. Vol. 266. P. 114555
- Gan Y., Chen J., Xiang M. PDEM-based reliability assessment of RC frames against progressive collapse considering initial local failure // Journal of Building Engineering, 2023. Vol. 76. P. 107198.
- Ильющенко Т.А., Колчунов В.И., Федоров С.С. Трещиностойкость преднапряженных железобетонных рамно-стержневых конструкций при особых воздействиях // Строительство и реконструкция. 2021. № 1 (93). С. 74-84.
- Savin S.Y., Fedorova N. V., Kolchunov V.I. Dinamic forces in the eccentrically compressed members of reinforced concrete frames under accidental impacts // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. ASV Publishing House, 2022. Vol. 18, № 4. P. 111–123.
- Тамразян А.Г., Живучесть как степень работоспособности конструкций при повреждении // Промышленное и гражданское строительство. 2023. №. 7. С. 22-28
- Zhao R., Chen G., Zhang Z., Luo W. Progressive Collapse Resistance Assessment of a Multi-Column Frame Tube Structure with an Assembled Truss Beam Composite Floor under Different Column Removal Conditions // Buildings, 2024. Vol. 14. P. 111. <https://doi.org/10.3390/buildings14010111>
- Fu Q.-L., Tan L., Long B., Kang S.-B. Numerical Investigations of Progressive Collapse Behaviour of Multi-Storey Reinforced Concrete Frames // Buildings, 2023. Vol. 13. P. 533. <https://doi.org/10.3390/buildings13020533>
- Alshaikh I.M.H., Abadel A.A., Sennah K., Nehdi M.L., Tuladhar R., Alamri M. Progressive Collapse Resistance of RC Beam-Slab Substructures Made with Rubberized Concrete // Buildings, 2022. Vol. 12. P. 1724. <https://doi.org/10.3390/buildings12101724>

11. Fialko S.Y., Kabantsev O. V, Perelmutter A. V. Elasto-plastic progressive collapse analysis based on the integration of the equations of motion. *Magazine of Civil Engineering*. 2021. Vol. 102, № 10214. DOI: 10.34910/MCE.102.14
12. Methaq S. Matrood, Ali Al-Rifaie, Othman Hameed Zinkaah, Ali A. Shubbar. Behaviour of moment resisting reinforced concrete frames subjected to column removal scenario // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 1090 (2021) P.012135
13. Kolcunov V.I., Tuyen V.N., Korenkov P.A. Deformation and failure of a monolithic reinforced concrete frame under accidental actions // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 753. Pp.032037.
14. Федорова Н.В., Гуок Ф.Д., Чанг Н.Т. Экспериментальные исследования живучести железобетонных рам с ригелями, усиленными косвенным армированием // Строительство и реконструкция. 2020. №1 (87). С.92–100.
15. Weihui Zhong, Di Gao, Zheng Tan. Experimental study on anti-collapse performance of beamcolumn assembly considering surrounding constraints // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 643 (2021) P. 012163
16. Prakash M., Satyanarayanan K.S. Experimental study on progressive collapse of reinforced concrete frames under a corner column removal scenario // 4th International Conference on Recent Advances in Material Chemistry, 2021. Vol. 40. P.S69-S74
17. Yang T., Chen W., Han Z. Experimental Investigation of Progressive Collapse of Prestressed Concrete Frames after the Loss of Middle Column //Advances in Civil Engineering. – 2020. – Т. 2020.
18. Федорова Н.В., Московцева В.С., Амелина М.А., Демьянин А.И. Определение динамических усилий в сложнонапряженных элементах железобетонных рам при особом воздействии // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2023. № 2 (770). С. 5-15.
19. СП 385.1325800.2018 "Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения"
20. Милейковский И.Е., Колчунов В.И. Неординарный смешанный метод расчета рамных систем с элементами сплошного и составного сечений // Известия ВУЗов. Строительство. 1995. № 7–8. С.32–37.

REFERENCES

1. Bondarenko V.M., Kolchunov V.I. Koncepciya i napravleniya razvitiya teorii konstruktivnoj bezopasnosti zdanij i sooruzhenij pri silovyh i sredovyh vozdejstviyah [The concept and directions of development of the theory of structural safety of buildings and structures under force and environmental influences]. *Industrial and Civil engineering*. 2013. No.2. Pp. 28-31. (rus).
2. Kolchunov V.I., Klyueva N.V., Androsova N.B., Buhtiyarova A.S. ZHivuchest' zdanij i sooruzhenij pri zaproektnyh vozdejstviyah. [Survivability of buildings and structures under non-design impacts]. Moscow: ACB, 2014. 208 p. (rus).
3. Lorengo M., Ma J. Development of complementary structural robustness metrics based on failure-induced stress redistribution // *Engineering Structures*, 2022. Vol. 266. P. 114555
4. Gan Y., Chen J., Xiang M. PDEM-based reliability assessment of RC frames against progressive collapse considering initial local failure // *Journal of Building Engineering*, 2023. Vol. 76. P. 107198
5. Il'yushchenko T.A., Kolchunov V.I., Fedorov S.S. Treshchinostojkost' prednapryazhennyh zhelezobetonnyh ramno-sterzhnevyyh konstrukcij pri osobyyh vozdejstviyah [Crack resistance of prestressed reinforced concrete frame-core structures under special influences]. *Building and Reconstruction*. 2021. No.1(93). Pp. 74-84. (rus).
6. Savin S.Y., Fedorova N. V., Kolchunov V.I. Dinamic forces in the eccentrically compressed members of reinforced concrete frames under accidental impacts. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. ASV Publishing House, 2022. Vol. 18, No.4. Pp. 111–123.
7. Tamrazyan A.G., ZHivuchest' kak stepen' rabotosposobnosti konstrukcij pri povrezhdenii [Survivability as a degree of operability of structures in case of damage]. *Industrial and Civil engineering*. 2023. No.7. Pp. 22-28. (rus).
8. Zhao R., Chen G., Zhang Z., Luo W. Progressive Collapse Resistance Assessment of a Multi-Column Frame Tube Structure with an Assembled Truss Beam Composite Floor under Different Column Removal Conditions // *Buildings*, 2024. Vol. 14. P. 111. <https://doi.org/10.3390/buildings14010111>
9. Fu Q.-L., Tan L., Long B., Kang S.-B. Numerical Investigations of Progressive Collapse Behaviour of Multi-Storey Reinforced Concrete Frames // *Buildings*, 2023. Vol. 13. P. 533. <https://doi.org/10.3390/buildings13020533>
10. Alshaikh I.M.H., Abadel A.A., Sennah K., Nehdi M.L., Tuladhar R., Alamri M. Progressive Collapse Resistance of RC Beam-Slab Substructures Made with Rubberized Concrete // *Buildings*, 2022. Vol. 12. P. 1724. <https://doi.org/10.3390/buildings12101724>
11. Fialko S.Y., Kabantsev O. V, Perelmutter A. V. Elasto-plastic progressive collapse analysis based on the integration of the equations of motion. *Magazine of Civil Engineering*. 2021. Vol. 102, № 10214. DOI: 10.34910/MCE.102.14
12. Methaq S. Matrood, Ali Al-Rifaie, Othman Hameed Zinkaah, Ali A. Shubbar. Behaviour of moment resisting reinforced concrete frames subjected to column removal scenario. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 1090 (2021) P.012135

13. Kolcunov V.I., Tuyen V.N., Korenkov P.A. Deformation and failure of a monolithic reinforced concrete frame under accidental actions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 753. Pp.032037.
14. Fedorova N.V., Guok F.D., CHang N.T. Eksperimental'nye issledovaniya zhivuchesti zhelezobetonnyh ram s rigelyami, usilennymi kosvennym armirovaniem [Experimental studies of the survivability of reinforced concrete frames with crossbars reinforced with indirect reinforcement]. *Building and Reconstruction*. 2020. No.1 (87). Pp. 92–100. (rus).
15. Weihui Zhong, Di Gao, Zheng Tan. Experimental study on anti-collapse performance of beamcolumn assembly considering surrounding constraints. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 643 (2021) P. 012163
16. Prakash M., Satyanarayanan K.S. Experimental study on progressive collapse of reinforced concrete frames under a corner column removal scenario // *4th International Conference on Recent Advances in Material Chemistry*, 2021. Vol. 40. P.S69-S74
17. Yang T., Chen W., Han Z. Experimental Investigation of Progressive Collapse of Prestressed Concrete Frames after the Loss of Middle Column. *Advances in Civil Engineering*. 2020. Vol. 2020.
18. Fedorova N.V., Moskovtseva V.S., Amelina M.A., Demyanov A.I. Opredelenie dinamicheskikh usilij v slozhnonapryazhennyh elementah zhelezobetonnyh ram pri osobom vozdejstvii [Determination of dynamic forces in complexly stressed elements of reinforced concrete frames under special impact]. *News of higher educational institutions. Construction*. 2023. No. 2. Pp. 5-15. (rus).
19. SP 385.1325800. 2018. Zashchita zdanij i sooruzhenij ot progressiruyushchego obrusheniya. Pravilaproektirovaniya. Osnovnye polozheniya [Protection of buildings and structures from progressive collapse. Design rules.The main provisions]. M.: Standartinform, 2018. P. 19 (rus)
20. Milejkovskij I.E., Kolchunov V.I. Neordinarnyj smeshannyj metod rascheta ramnyh sistem s elementami sploshnogo i sostavnogo sechenij [An extraordinary mixed method for calculating frame systems with elements of continuous and composite sections]. *News of higher educational institutions. Construction*. 1995. No.7–8. Pp. 32–37. (rus).

Информация об авторах:

Московцева Виолетта Сергеевна

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,
доцент кафедры инженерной графики и компьютерного моделирования, к.т.н.
ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и
строительных наук», г. Москва, Россия,
инженер.
E-mail: lyavetka1@mail.ru

Information about authors:

Moskovtseva Violetta S.

National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MSUCE), Moscow, Russia,
lecturer of the Department of Engineering Graphics and Computer Modeling.
Research Institute of Building Physics of RAACS, Moscow, Russia, Candidate of Technical Sciences
engineer.
E-mail: lyavetka1@mail.ru

Статья поступила в редакцию 17.07.2025
Одобрена после рецензирования 09.08.2025
Принята к публикации 12.09.2025

The article was submitted 17.07.2025
Approved after reviewing 09.08.2025
Accepted for publication 12.09.2025

О.В. ВОЛИЧЕНКО^{1,2,3}, И.П. ЧЕЧЕЛЬ³

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

²ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов им. П. Лумумбы (РУДН); г. Москва, Россия

³ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова)», г. Белгород, Россия

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ПОЛНОГО ДНЯ

Аннотация. Отсутствие разработанной научно-обоснованной теоретической основы для формирования архитектуры современного образовательного комплекса, затрудняет процесс перехода школ в образовательные комплексы, который сегодня является объективным историческим процессом, что подтверждается проведенным анализом мирового опыта проектирования и строительства объектов общего образования с услугой полнодневного обучения. Цель исследования состоит в разработке теоретической модели образовательного комплекса полного дня для последующего ее внедрения в архитектурную проектную практику создания новых или реновируемых объектов — комплексов для воспитания и обучения российских школьников, их социализации, формирования гражданской патриотической позиции и развития творческой инициативы. В работе представлены результаты теоретического моделирования полнодневного образовательного комплекса — архитектурного объекта общего образования нового поколения. Теоретическая модель комплекса представлена в виде трехчастной структуры, как совокупность социального, функционального и типологического уровней. На социальном уровне определены группы людей, которые будут использовать данный объект для реализации своей деятельности в составе территориальных образовательных групп. На функциональном уровне предложены функциональные программы, сформированы функциональные зоны и группы помещений для реализации программ. На типологическом уровне разработаны архитектурно-планировочные и объемно-пространственные модели структурных элементов и комплексов в целом. В работе определены базовые понятия исследования «внекурсная деятельность», «образовательный комплекс полного дня», «центр внеурочной деятельности и дополнительного образования»; разработаны обобщенные территориально-типологические модели полнодневных образовательных комплексов. Предложенная теоретическая модель образовательного комплекса полного дня может быть применена как при новом строительстве, так и при реконструкции существующих школьных зданий. Условия нового строительства и реконструкции существенно изменяют требования и приемы проектирования, но результаты данной работы, нашедшие отражение в сформированной теоретической модели, позволяют реализовать ее при различных ситуациях. Теоретическая модель, которая предлагается к обсуждению в данной работе, отражает идеалистическое представление авторов о том, каким должен быть общеобразовательный комплекс нового поколения в современной России.

Ключевые слова: образовательный комплекс полного дня, архитектурный объект образования нового поколения, теоретическая модель, элементы трехчастной структуры.

O.V. VOLICHENKO^{1,2,3}, I.P. CHECHEL³

¹National Research Moscow State University of Civil Engineering" (NRU MGSU); Moscow, Russia

² P. Lumumba Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University); Moscow, Russia

³ Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)", Belgorod, Russia

THEORETICAL MODEL OF AN ALL-DAY EDUCATIONAL COMPLEX

Abstract. The absence of a scientifically-grounded theoretical framework for shaping the architecture of modern educational complexes impedes the transition of schools into such complexes. This transition represents an objective historical trend, as confirmed by our analysis of global experience in the design and construction of general education facilities offering all-day schooling services. The research aims to develop a theoretical model of an all-day educational complex for its subsequent implementation in the architectural design practice for both new and renovated facilities. These complexes are intended for the upbringing and education of Russian schoolchildren, their socialization, the development of a civic and patriotic stance, and the nurturing of creative initiative. This paper presents the results of theoretical modeling of an all-day educational complex—a new-generation architectural entity for general education. The theoretical model of the complex is structured as a tripartite framework, comprising social, functional, and typological levels. At the social level, user groups are identified, defined as territorial educational communities that will utilize the facility to carry out their activities. At the functional level, functional programs are proposed, leading to the formation of functional zones and clusters of spaces for program implementation. At the typological level, architectural-planning and volumetric-spatial models are developed for both the structural elements and the complexes as a whole. The study defines the core concepts of the research: "extracurricular activities," "all-day educational complex," and "center for extracurricular and supplementary education." Furthermore, generalized territorial-typological models of all-day educational complexes have been developed. The proposed theoretical model of an all-day educational complex can be applied in both new construction and the renovation of existing school buildings. While new construction and renovation impose significantly different requirements and design approaches, the findings of this work, encapsulated in the formulated theoretical model, allow for its implementation under varying conditions. The theoretical model presented for discussion in this work reflects the authors' idealistic vision for what a new-generation general education complex in modern Russia should be.

Keywords: a full-time educational complex, an architectural object of a new generation of education, a theoretical model, elements of a three-part structure.

1. Введение

Школа в современном мире, играют ключевую роль при формировании любого социального общества, в воспитании и образовании современного человека и гражданина. Образовательная среда, в которой происходит процесс становления личности — образованной, всесторонне развитой, воспитанной на традициях и социальных ориентирах общества, частью которого он является, на каждом историческом этапе имеет свои особенности и характерные черты. Сегодня, по мнению многих исследователей архитекторов-практиков, школе тесно в «старых» стенах и привычная типология школьного здания уже не удовлетворяет потребности педагогов и потребителей образовательных услуг к организации образовательной деятельности [1–4].

Изучение практической деятельности образовательных организаций Белгородской области показало, что существует тенденция к укрупнению объекта общего среднего образования, происходит переформатирование действующих организаций дошкольного и школьного образования в единый образовательный комплекс. Кроме того, начиная с 2020 г., в образовательных организациях активно внедряется инновационная модель школьного образования «школа полного дня» (далее ШПД) и в качестве приоритетного вида региональной общеобразовательной организации в законодательных документах определен именно **образовательный комплекс полного дня** — как новый тип современного объекта образования. С точки зрения организационно-педагогической структуры — это комплекс, в который входят разноуровневые организации дошкольного, школьного и дополнительного образования для освоения основных образовательных программ ФГОС и общеразвивающих дополнительных программ в области искусств, спорта и других направлений по выбору [5–8].

Создание новых комплексов, на основе существующих объектов образования и их материально-технической базы, в настоящее время получает свое развитие на всей территории области [9].

Этот процесс, имеющий тенденцию к постоянному совершенствованию, основан на административных и организационно-педагогических мерах, но с точки зрения теории и практики архитектуры еще не начат. Отсутствие разработанной научно-обоснованной теоретической основы для формирования архитектуры современного образовательного

комплекса нового поколения, затрудняет процесс перехода школ в образовательные комплексы.

Необходимо определиться с понятийной сущностью ключевых определений, широко применяемых в современной педагогике, с точки зрения архитектурного аспекта, которые будут в дальнейшем использоваться в работе, — это *внеклассическая деятельность* и *образовательный комплекс полного дня*.

В данной работе авторы предлагают трактовать понятие *внеклассическая деятельность* как *функциональный процесс, направленный на организацию свободного от учебно-урочной деятельности, внеурочного времени школьников для достижения ими результатов в личностном и всестороннем развитии, для реализации которых в архитектурно-планировочной структуре здания предусмотрены функциональные зоны и группы помещений, в которых она (деятельность) может проходить в различных ее видах и формах*¹.

В свою очередь, *образовательный комплекс полного дня* определяется как *многофункциональный комплекс, предназначенный для получения дошкольного, всех ступеней школьного (начальное, основное, среднее) и дополнительного образования, работающий в режиме полного дня*. В его функционально-планировочную и объемно-пространственную структуру входят дошкольный, общеобразовательный и внеурочный (далее ЦВДиДО) функциональные блоки, объединение которых в единую организационно-педагогическую структуру позволяет реализовать непрерывность воспитательно-образовательного процесса и будет способствовать всестороннему и гармоничному развитию личности ребенка, в соответствии с актуальными требованиями в комфортной пространственной, развивающей, образовательной среде на территории комплекса².

ЦВДиДО — это многофункциональный блок в составе функциональной структуры полнодневного образовательного комплекса для занятий обучающихся во внеурочное время³.

Для эффективного взаимодействия двух составляющих образовательной деятельности (классно-урочной и внеурочной деятельности), необходимо решить основную проблему: устаревшая функциональная среда не может обеспечить качественное ведение внеурочной деятельности с занятостью обучающихся в комфортных условиях в течении полного дня, а сложившаяся архитектурно-планировочная структура не позволяет расширить типологические границы зданий школы и детского сада для их актуализации к современным требованиям.

Теоретической базой стали *исследования в области социологии архитектуры*, интерес к изучению которой сформирован, как со стороны социологов, так и архитекторов. Проблемы данного направления рассматриваются и в индивидуальных исследованиях специалистов, и в процессе сотрудничества представителей данных профилей. В России инициатива интегрирования социологических принципов в проектирование в большей степени идет со стороны архитекторов. В отечественной науке наиболее фундаментальные исследования проводились М. Б. Вильковским [10], К. В. Кияненко [11,12], Различные аспекты социального знания рассматривались многими архитекторами, наибольшей популярностью пользуются труды А.Ф.Филиппова [13]. Е. В. Барчуговой [14], Ю. П. Бочарова, В. Л. Глазычева [15], Ю. С. Высоковского, А. Э. Гутнова, А. В. Иконникова, К. К. Карташовой, Л. Ю. Когана, Г. Д. Платонова, И. М. Смоляра, К. К. Хачатрянца, З. Г. Яргиной.

За рубежом вопросы восприятия города и пространства в основном исследуют социологи. Анализ в рамках социологии архитектуры проводили следующие деятели науки: В. Беньямин, Н. Элиас, М. Фуко и др. Проблему социологии пространства исследовали: Г. Зиммель, П. Бурдье и др. Теория о социологии архитектуры изучалась такими специалистами, как: Ж. Бодрийяр, Э. Умберто, П. Сорокин, М. Кастельс, Х. Делитц [16],

^{1,2,3} – Термины и определения вводятся авторами впервые

Р. Смит, В. Бани [17, 18]. Самыми известными современными зарубежными архитекторами, применяющими социологический подход в процессе проектирования, являются Р. Колхас, К. Портзампарк.

Эти исследования и научные публикации стали основой для формирования социальных групп потребителей образовательных услуг и определения запроса к организаторам образовательной деятельности по составу, видам и формам ведения внеурочной деятельности, на основании которых были сформированы функциональные программы для каждой группы.

Для функционального моделирования *применялся сценарный подход*. К авторам, чьи научные работы основаны или составлены в рамках сценарного подхода, относятся: А. В. Крашенинников [19], М. В. Сидоренко, Е. А. Ахмедова, Г. В. Коробова, В. И. Мешкова, В.Т. Шимко, Э.И. Баширова [20], Р. К. Назимов [20], М. О. Воробьев [21–22], С. Г. Михалчева [23], Я. Гейл, Дж. М. Кэрол, Б. М. Россон, К. Бартоломео, Л. Д. Хопкинс, М. Запата, Р. Шипли, Б. Холл, С. Первен, Дж. К. Джонс и Дж. А. Огилви, Минг-Чун Ли [24], Б. Элуйти [25], др.

Для архитектурно-типологических моделей образовательного комплекса был применен *структурный подход*, разработанный М. В. Шубенковым [28,29].

Цель исследования состоит в разработке теоретической модели архитектурного объекта новой типологии — образовательного комплекса полного дня для последующего ее внедрения в архитектурно-проектную практику создания новых или реновации объектов для воспитания и обучения российских школьников, их социализации, формирования гражданской патриотической позиции и развития творческой инициативы.

Задачи исследования:

1. изучить социальные предпосылки к появлению архитектурного объекта новой типологии — образовательных комплексов полного дня и выявить запросы потребителей образовательных услуг в части видов и форм внеурочной деятельности в «школе полного дня»;
2. предложить функциональные программы для членов и участников образовательных групп в соответствии с их запросами;
3. разработать теоретическую модель образовательного комплекса полного дня.

Объект исследования — образовательные комплексы полного дня.

Предмет исследования — формирование теоретической модели образовательного комплекса полного дня.

2. Модели и методы

Понятие «теоретическая модель архитектурного объекта» возникло в 1960–1970-е годы вследствие быстрого распространения научно-методологических идей и методов теории естествознания и философии в архитектурной науке. Теоретическое модели идеального архитектурного объекта представляются как витрувианская (классическая), моноструктурная и полиструктурная модели. Модель современного полнодневного образовательного комплекса возможно отнести к моноструктурной модели, в которой, подчиняясь «... принципам рационализма и функционализма, совершенствовалась организация внутреннего пространства; в проектирование и строительное производство широко внедрялись стандартные и унифицированные элементы, на основе которых создавались типовые, быстровозводимые проекты» [30]

Модель любого архитектурного объекта имеет свою структуру [31]. По мнению авторов, теоретическую модель полнодневного образовательного комплекса, как архитектурного объекта новой типологии, можно представить в виде трехчастной структуры — совокупности социальных, функциональных и типологических подструктурных уровней:

1) социальный уровень — формируют потребители образовательных услуг, является основой для разработки задания на проектирование архитектурного комплекса и определяет требования для следующих подструктурных уровней;

2) функциональный уровень — отвечает запросам потребителей на виды и формы деятельности, обеспечивающие реализацию воспитательно-образовательных задач, определяет функциональное наполнение комплекса;

3) типологический уровень — содержит архитектурно-типологические модели, отражающие 1-й и 2-й уровни в материально-пространственной форме.

Для исследования каждой части структуры теоретической модели применялись различные научные методы и подходы.

Социальный уровень. Для выявления потребностей основных социально-образовательных групп. В части формирования пакета предложений по функциональному составу функциональных блоков и зон структурных подразделений (школа, детский сад, ЦВДиДО) образовательного комплекса был применен *социологический подход*. Определение социологии архитектуры появилось на стыке XIX и XX вв. и все еще находится в стадии развития и становления. Направлениями исследования данной научной области являются социология создания архитектуры, архитектура как система, изучение архитектуры как таковой [14].



Рисунок 1 - Социологический подход по Р. Смит и В. Бани, схема разработана авторами

Социологический метод включает в себя несколько стадий взаимодействия архитектора и социального общества, что вытекает из определения, данного американскими социологами Рональдом Смитом и Валери Бани «социология архитектуры — это применение социальных теорий и методов в процессе разработки архитектурного проекта» [17, 18]. Такой подход имеет глубокие исторические корни. Он опирается на давно существующие научные дисциплины такие, как психология взаимодействия с окружающей средой, экологическая социология, социология организаций и социология сообществ (Рис.1).

Организация и проведение социологического исследования осуществляется последовательно. К основным ее этапам относятся: подготовка исследовательского мероприятия, сбор первичных социологических сведений, подготовка и обработка собранных данных, анализ информации с последующим подведением итогов и формулированием выводов [11, 12]. Наиболее востребованными методами социологического исследования в рамках архитектурного проектирования являются: анализ документов, социальное наблюдение, анкетирование, метод экспертизы оценок.

В архитектурной среде развивается идея соучастного проектирования. Принципы теории строятся на вовлечении горожан, местных сообществ, представителей бизнеса, экспертов и местных властей в создание общественных пространств. Целью данной концепции является выявление потребностей пользователей, определение направлений развития территории, поиск совместных решений по осуществлению строительства. Реализация программ соучаствующего проектирования базируется на применении вышеупомянутых видов социологических исследований.

При проектировании зданий для образования, помимо социологии архитектуры важнейшей отраслью изучения становится социология досуга. Данное направление исследует поведение индивидов и групп в свободное время, способы удовлетворения потребностей в рекреации, развлечении, общении, развитии личности.

Функциональный уровень. Для формирования функциональных моделей образовательного комплекса применялся *сценарный подход*. Сценарное проектирование — это научный метод, алгоритмы которого направлены на создание ряда сценариев (поведенческих ситуаций) человека в пространстве проектирования, с целью выявления закономерностей влияния функциональной среды на поведение человека, определения основных траекторий движения, формирования эргономичного пространства.

Созданию проектов предшествует аналитическая работа по прогнозированию использования площадей зданий и сооружений его посетителями, в целях создания максимально комфортной и эргономичной среды. В то же время уделяют внимание экономической составляющей проекта, чтобы его реализация оставалась рентабельной [21, 22]. Объемно-планировочная структура здания должна соответствовать критериям, предъявляемым со стороны его потребителей, а также обладать гибкостью, обеспечивающей функциональное расширение диапазона проектируемых помещений.

В основе сценарного подхода лежит исследование проекта на уровень соответствия его архитектурных решений существующим в определенных условиях задачам, путем составления ряда сценариев использования помещений здания, в зависимости от конкретной группы посетителей. Создание сценариев способствует логическому выявлению поведенческих особенностей человека, предугадывая возможные варианты развития событий, для функционального обеспечения его нахождения в конкретных условиях [23, 24].

Научно-теоретическое становление сценарного подхода в архитектурных направлениях проектного исследования только началось, поэтому установленной формулировки и алгоритма применения сценарного подхода в проектировании не существует. В научных работах зарубежных и отечественных исследователей выделяются различные направления апробации подхода в зависимости от поставленных задач, исходных данных и преследуемых целей. Современная наука не имеет четкой формулировки сценарного проектирования, однако, среди специалистов, занимающихся изучением проблематики, можно выделить следующие:

- это часть «проектного прогнозирования», в основе которого лежит алгоритм проигрывания альтернативных стратегий с учетом всех действующих лиц прогнозной ситуации (А. В. Крашенинников) [19];
- представление об архитектурном объекте как о развивающейся системе архитектурных пространств, в соответствии с возможными способами использования этих пространств, а также совокупность принципов и приемов проектирования, основанных на данном представлении (Э. И. Баширова, Р. К. Назимов) [20] (Рис. 2);

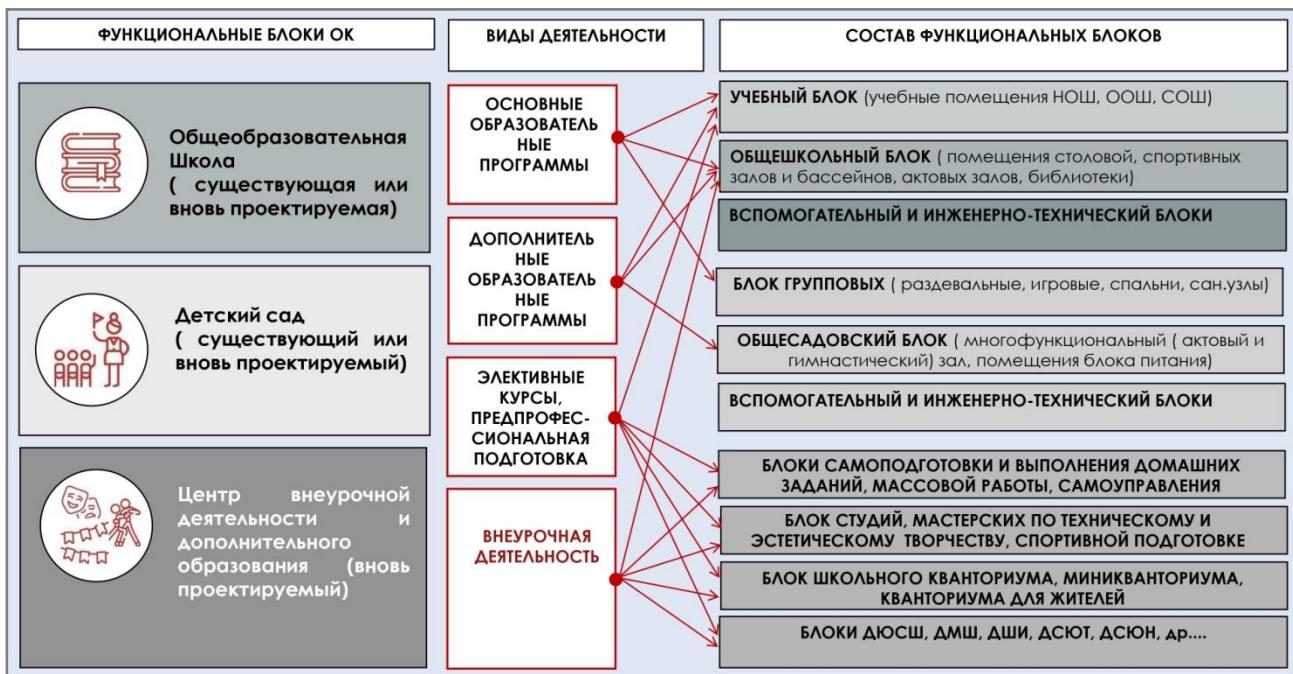


Рисунок 2 - Сценарный подход по Э. И. Башировой, Р. К. Назимову; схема разработана авторами

- это методология, которая описывает различные возможные конфигурации, операции, взаимодействия и эксперименты «что, если» над разработанными продуктами, чтобы исследовать и предсказать их потенциал, характеристики, слабые и сильные стороны и возможности до их фактического производства (Б. Элуйти) [25].

Сценарный подход служит для образования единого пространства, логически разделенного на отдельные участки, с сохранением общего эстетического направления. Сценарий приравнивается к понятию маршрута следования посетителя. Ему задается визуальный ряд восприятия окружающего пространства, дополняемого возможностью более глубокого его познания путем участия в различного рода занятиях. Пространство рассматривается в виде череды сценических площадок, каждая из которых отмечена своим действием. Посетители могут сами формировать свой сценарий, основываясь на предложениях различных по функции объектов и пространств [26, 27].

Функциональный сценарий может быть составлен с учетом интересов различных социальных групп. Конфигурация помещений также должна способствовать оптимально быстрому изменению площади помещений, путем перемены существующих перегородок, а также других автоматических систем, применение которых особенно актуально при проектировании многофункциональных залов. При их создании основной упор делается на использование трансформируемых систем, способных изменять пространство в зависимости от проводимых в нем действий — выступлений танцевальных коллективов, научных чтений и т.п.

Типологический уровень. Типологический подход активно используется при проектировании новых объектов. Например, при проектировании образовательного комплекса (ОК) типологический анализ помогает правильно зонировать и организовать внутреннее пространство и обеспечить удобство перемещения посетителей и предусмотреть необходимую инфраструктуру. Для формирования типологических моделей ОК применяется *структурный метод*. Согласно академику М. В. Шубенкову [28,29], при определении архитектурно-планировочных различий в организации пространственной формы, можно выделить пять типов структур. Каждая из них отображает определенное архитектурно-пространственное содержание и отличается топологическими свойствами связности.

Архитектура и градостроительство

К основным типам структур пространственной связи относят: анфиладный, гребешковый, ветвеобразный, ромашковый и сеточный (Рис. 3).



Рисунок 3 - Структурный подход, по М. В. Шубенкову

Если рассматривать пространственное формообразование как вариационное множество решений, которое может быть классифицировано по своему «тяготению» к тому или иному структурному типу, то переход от одного типа к другому определяется преодолением некого порога в структурном состоянии. В образовательном комплексе были использованы гребешковая и ромашковая структуры.

3. Результаты исследования и их анализ

Таким образом, объединенная теоретическая модель образовательного комплекса полного дня имеет 3-х частную структуру и включает в себя социальные, функциональные и типологические модели (Рис.4).

Рассмотрим применение данной модели на примере разработки образовательного комплекса полного дня в условиях реновации существующих зданий школ в Белгородской области.



Рисунок 4 - Структура и компоненты теоретической модели полнодневного образовательного комплекса в условиях реновации существующих зданий школ, разработано авторами

Социальная модель. Среди региональных социально-территориальных групп потребителей образовательных услуг были определены и рассмотрены 3 социальных модели (городская, пригородная и сельская), установлены виды деятельности и взаимодействие членов и участников групп между собой внутри групп сообщества (Рис. 5).

социальная модель	численность жителей, плотность населения	типология зданий существующего школьного фонда	состав семьи, количество детей,	доход семьи	доступность организаций дополнительного образования	восприимчивость и открытость для инноваций	информированность и потребность в расширении услуг
СМ-1 ГОРОДСКАЯ СТГ 	численность жителей 100 тыс. жит. - 330 тыс. жит. 	вместимость школьных зданий (усредненная) 900-1000 уч.мест 	кол-во членов в семье 3 чел. 	уровень дохода высокий и ниже 	общественный транспорт 30-60 мин. 	открыты для инноваций 	информированность
СМ - 2 ПРИГОРОДНАЯ СТГ 	численность жителей 5 тыс. жит. - 18 тыс. жит. 	вместимость школьных зданий (усредненная) 700-1100 уч.мест 	кол-во членов в семье 4 чел. 	уровень дохода средний 	общественный транспорт 60-90 мин. 	открыты для инноваций 	информированность
СМ - 3 СЕЛЬСКАЯ СТГ 	численность жителей 2 тыс. жит. - 10 тыс. жит. 	вместимость школьных зданий (усредненная) 200-500 уч.мест 	кол-во членов в семье 4 чел. 	уровень дохода низкий и выше 	общественный транспорт 120 мин. 	недоступны для инноваций 	информированность

Рисунок 5 - Состав социальных образовательных групп; схема разработана авторами

Для выявления предпочтений в группах, в рамках данного исследования, был проведен социологический опрос населения на тему «Выявление удовлетворенности и основных потребностей в сфере оказания образовательных услуг внеурочной деятельности в школе полного дня среди жителей городских, пригородных и сельских территорий Белгородской области». Опрос населения проводился среди членов и участников региональных социально-территориальных групп потребителей образовательных услуг (обучающиеся, родители, учителя, воспитатели, жители) населенных пунктов Белгородской области для выявления их основных предпочтений по организации внеурочной деятельности в полнодневном образовательном комплексе и формирования запроса целевой аудитории к объекту проектирования. Опрошенные респонденты положительно оценивают переход на полнодневную работу школы, при этом отмечают недостаточность материально-технической базы для реализации ее деятельности; большинство респондентов из разных групп высказались о необходимости расширения направлений внеурочной деятельности и положительно отнеслись к объединению разноуровневых образовательных организаций в единый образовательный комплекс.

При этом они отметили недостаточность фактических площадей в зданиях школ для введения дополнительных функций; отсутствие организаций дополнительного образования в пешеходной доступности от места проживания или учебы и подчеркнули сложность в совмещении занятий в полнодневной школе с посещением организаций дополнительного

образования. Большинство респондентов отмечают необходимость приблизить данные организации к школам и положительно оценивают предложение о создании образовательных комплексов полного дня с центрами внеурочной деятельности и дополнительного образования для пользователей различных возрастов. Высказаны мнения о необходимости при образовательном комплексе предусмотреть помещения для занятий взрослых жителей территории, особенно интересны направления современных ИТ-технологий, коворкинги, помещения для совместного творчества и развития народных ремесел, певческого и хореографического направлений. Положительный ответ был дан на вопрос о необходимости в функциональной структуре образовательного комплекса предусмотреть новый функциональный блок для внеурочной деятельности и дополнительного образования.

Полученные данные позволили предположить, что в сегодняшних условиях бурного развития информационных технологий и удаленного взаимодействия заметно стремление членов и участников территориальных образовательных групп к личностному общению, модель полнодневного комплекса позволяет создать условия для активного сотрудничества и взаимодействия членов сообществ разных возрастов.

Опрос был проведен среди *экспертного сообщества* Белгородской области — специалистов в области проектирования общеобразовательных школ, преподавателей высшей школы, руководителей региональных общеобразовательных организаций, исследовалась функциональная и архитектурно-планировочная структура образовательных комплексов полного дня.

Эксперты-педагоги рекомендуют: проанализировать организацию второй половины дня в расписании, рассмотреть возможность расширения внеурочной деятельности, дополнительного образования в части реализации программ по всестороннему развитию личности школьников; усилить работу над информационной открытостью в социуме в части донесения до населения особенностей реализации программ внеурочной деятельности, дополнительных образовательных услуг, адаптированных программ обучения; расширить спектр мероприятий, при проведении которых родители могут принимать участие в обсуждении и выборе стратегии развития школы и получать информацию о реализуемых проектах (образовательных и воспитательных); в системе урочной и воспитательной деятельности при формировании ценностных ориентаций учащихся больше внимания должно уделяться гуманистическому подходу: стремление к уважению, признанию, компетентности, справедливости, гармонии и самореализации.

Для выполнения данных положений, *эксперты архитекторы* рекомендуют: объединить в единый образовательный комплекс отдельные организации общего дошкольного, школьного образования и организации дополнительного образования; развивать полнодневные образовательные комплексы с расширенным списком услуг внеурочной деятельности; при образовательных комплексах полного дня создать центры внеурочной деятельности и дополнительного образования детей, школьников и взрослых.

Результаты социологического исследования и экспертного опроса отражены в таблице 1.

Таблица 1 - Виды и формы деятельности членов и участников социально-образовательных групп в полнодневном образовательном комплексе

<i>Группы участников</i>	<i>Виды деятельности В группах</i>	<i>Формы видов деятельности</i>	<i>СМ 1</i>	<i>СМ 2</i>	<i>СМ 3</i>
<i>дошкольники</i>	игровая, исследовательско-познавательная, коммуникативная, спортивно-оздоровительная	игры творческие и игры с установленными правилами, занятия в МИНИ-Кванториуме; изучение иностранных языков; освоение программ раннего развития; занятия по подготовке к школе; занятия изобразительными искусствами; общеразвивающие спортивные занятия	✓	✓	✓

Окончание Таблицы 1

учащиеся	классно-урочная деятельность по освоению основных образовательных программ	занятия в классах, классах-кабинетах, универсальных и специализированных кабинетах	✓	✓	✓
	внеклассная деятельность	занятия вне учебных помещений, формы и виды отличные от классно-урочной деятельности	✓	✓	✓
	освоение дополнительных образовательных программ по выбору	углубленное изучение отдельных предметов, возможны занятия в классах, классах-кабинетах, универсальных и специализированных кабинетах	✓	✓	✓
	занятия в группе полного дня	отдых, общение, прогулки, подготовка домашних заданий, занятия в студиях, секциях и др.	✓	✓	✓
	освоение программ профориентации	занятия в мастерских, на предприятиях шефов, в тематических студиях предпрофессиональной подготовки («город мастеров»), занятия в автошколе и др.	✓	✓	✓
	внешкольные программы (деятельность классных руководителей)	классный час, общешкольные праздники, посещение музеев, выставок, просмотр кинофильмов, субботники и совместные походы	✓	✓	✓
	деятельность по 5-ти направлениям развития личности и творческого потенциала: 1) спортивно-оздоровительная; 2) социальная активность; 3) духовно-нравственная; 4) общеинтеллектуальная; 5) общекультурная	1) соревнования, спортивные эстафеты, секции, плавание; 2) волонтерство, участие в поисковых отрядах, общественно-полезный труд, шефская помощь; 3) посещение выставок, участие в конкурсах, слетах; 4) занятия в Кванториуме, дополнительные программы ИТ-технологии, технопарк; 5) занятия в кружках, студиях, конкурсах	✓	✓	✓
	деятельность ученического самоуправления	работа в школьных комитетах добрых дел, в школьном Правительстве, работа пресс-центра, выпуск школьной газеты	✓	✓	✓
	коммуникативная деятельность	совместная творческая или иная деятельность, досуг, отдых, конкурсы и др.	✓	✓	✓
	освоение программ дополнительного образования	занятия в ДЮСШ, ДШИ, ДМШ, ДШИО, СЮТ, СЮН и др. по различным творческим направлениям предпрофессиональной подготовки	✓	✓	✓
педагоги	просветительская, коммуникативная, совместный досуг, оздоровительная	собрания, семинары, «круглый стол», конференция, курсы повышения квалификации, встречи, отдых, организация быта, занятия в бассейне и спортивных секциях	✓	✓	✓
родители	просветительская, коммуникативная, совместный досуг, оздоровительная	Родительские собрания, лекции и семинары по вопросам воспитания и семейного права, встречи с психологами, специалистами по семейным конфликтам, совместные праздники, турпоходы, мастер-классы, работа в коворкинге, технопарке и др., занятия в бассейне и в физкультурно-оздоровительных группах, фитнес-залах	✓	✓	✓
жители территории	просветительская, коммуникативная, совместный досуг, оздоровительная	освоение ИТ-технологий, занятия в Кванториуме для взрослых по освоению навыков работы с ПК, занятия в школьной медиатеке, вечера отдыха, встречи, концерты, занятия в студиях различного направления, занятия в бассейне и в физкультурно-оздоровительных группах, фитнес-залах	✓	✓	✓
шефы	просветительская, коммуникативная, шефская, спонсорская	Взаимодействие с органами власти на местах, благотворительные вечера, программы профориентации, технопарки, субботники, встречи	✓	✓	✓

Функциональный уровень. Функциональная организация образовательного процесса в полнодневном образовательном комплексе определяется социально-педагогическими аспектами:

- **объединением уровней образования** (дошкольного, школьного и дополнительного) в единый образовательный комплекс (общеобразовательная школа, детский сад и организации дополнительного образования);
- наличием 2-х составляющих в образовательной деятельности – **классно-урочной** (классы, классы-кабинеты, специализированные и универсальные кабинеты, рекреации, вспомогательные помещения) и **внеурочной деятельностью** (универсальные залы, мастерские, студии, технопарки, кванториумы и др.);
- **полнодневным форматом занятий** – подготовка домашних заданий в школе (универсальные кабинеты, рекреации), отдых (комнаты релакса), коммуникация (коворкинг) сбережение здоровья (3-х разовое питание, комнаты отдыха, игровые площадки, спортивно-оздоровительные занятия, кабинеты физиопроцедур);
- развитием ИТ-технологий, использование дистанционного формата работы (школьный кванториум, библиотеки-медиатеки);
- практико-ориентированной проектной деятельностью (технопарк, агроБО, бизнес-школа и инженерная школа).

В функциональной структуре образовательного комплекса полного дня большое место отводится социально-ориентированным зонам различного назначения: детский сад; учебные зоны в соответствии с уровнями образования (начальная, основная и средняя школы); внеурочные зоны для занятий по 5-ти направлениям развития личности обучающихся, зоны дополнительного образования и творческих занятий детей и взрослых.

Разработано 3 функциональные модели образовательного комплекса — базовая (ФМ-1), специализированная (ФМ-2) и комплексная (ФМ-3) модели (Рис.4).

При разработке функциональных моделей, как основы для предложения по типологии, приняты следующие условия:

- перечень основных помещений функциональных блоков определяется в соответствии с мероприятиями внеурочной деятельности для каждой социальной модели;
- оптимальные параметры основных функциональных элементов приняты на основе исследований мирового опыта проектирования;
- функциональная модель построена таким образом, чтобы расширить ее диапазон и несколько социальных моделей могли реализоваться в одной универсальной структуре.

Базовая модель содержит минимально необходимый набор дополнительных функций, необходимых для организации полнодневной школы (помещения для подготовки домашних заданий, самообразования, освоения ИТ-технологий, школьный, детский и взрослый кванториумы, коворкинги для школьников и взрослых, помещения для массовой работы – многофункциональный зал, комнаты для настольных игр, школьный кафетерий и др.).

Функциональные блоки базовой модели являются обязательными. Специализированная модель включает в себя помещения для творческих развивающих занятий по направлениям музыка, хореография, изобразительное искусство, архитектура, техническое творчество, зоны военно-патриотического воспитания, технопарки, бизнес и агроБО, изучение космоса и др. *Функциональные блоки специализированной модели применяются* по выбору и зависят от ряда факторов, например, наличие в шаговой доступности объектов с аналогичными функциями. Комплексная модель объединяет в себе функциональные блоки базовой и специализированной моделей, ее применение также определяется выбором потребителей.

В структуру образовательного комплекса **входят три функциональных блока**, это — монофункциональные блоки «школа» и «детский сад» и многофункциональный блок «центр внеурочной деятельности и дополнительного образования» (ЦВДиДО) (Рис.6).

Здания «школа» и «детский сад» в работе трактуются как монофункциональные блоки образовательного комплекса. Данные блоки имеют сложившуюся функциональную и архитектурно-планировочную структуру, требования к которой отражены в федеральных и

региональных законах, в документах строительного и ведомственного нормирования, поэтому их функциональный состав и архитектурная организация не рассматривается и вынесены за границы исследования.



Рисунок 6 - Структура функциональной модели полнодневного образовательного комплекса; схема разработана авторами

ЦВДиДО является новым функциональным блоком, в котором предлагается организовывать внеурочную деятельность и дополнительное образование по различным направлениям в полнодневном образовательном комплексе. В ЦВДиДО будут включаться блоки, набирающие популярность, такие как робототехника, инженерно-компьютерные кружки, лектории, проектная деятельность для подростков, образовательные проекты для людей старшего и пенсионного возраста, создание мультимедийных студий и классов визуальных искусств. Ключевым подходом в организации ЦВДиДО является сознательная ориентация на аудиторию разных возрастов, от дошкольников до пенсионеров. Именно необходимость многофункциональности устаревших зданий школ и детских садов становится немаловажным условием создания таких образовательных объединений.

Важной частью функционирования многофункционального образовательного комплекса является многофункциональность его внутренних помещений. Обустройство многофункциональных пространств, многоцелевых залов и мастерских — это возможность менять использование помещений под различные нужды: от организации коворкинга до, например, лектория.

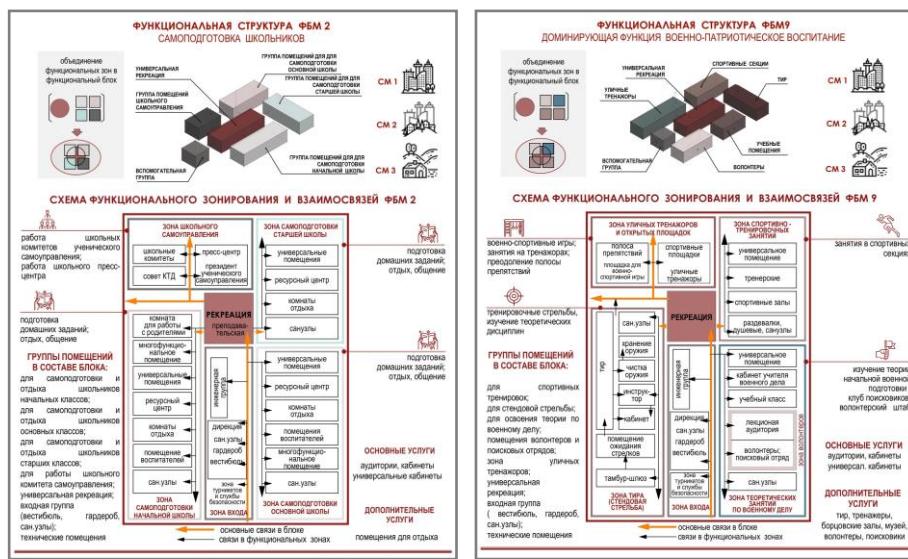


Рисунок 7 - Схема функционального зонирования функциональных блоков (на примере ФБ «Самоподготовка» и ФБ «Патриот»), разработана авторами

Авторами работы сделаны рекомендации по функциональному составу ЦВДиДО. Рекомендации включают разработку 12 функциональных блоков, направленных на реализацию различных сценариев деятельности в полнодневном комплексе, это ФБ «Технология», «Самоподготовка», «Школьный коворкинг», «Массовая работа», «Творчество1,2,3,4», «Патриот», «Спорт», «Профессиональная ориентация», «Био и космос» (Рис. 7). На основе известных приемов кооперации помещений функциональных зон и блоков предложены многофункциональные блоки для ведения внеурочной деятельности (Рис. 8).

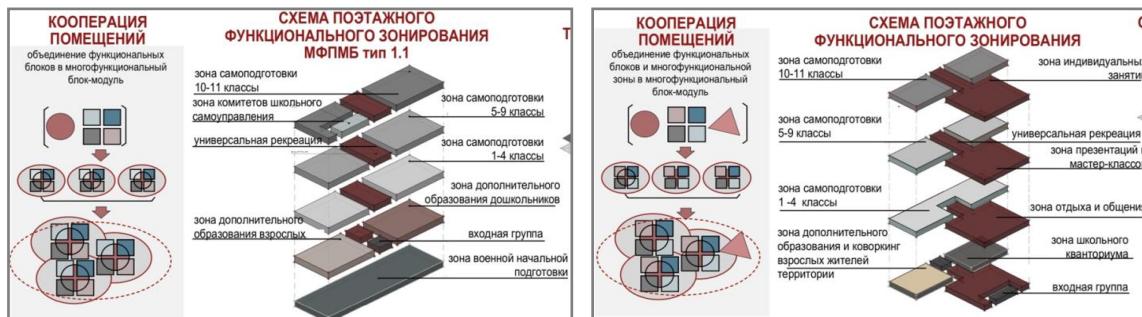


Рисунок 8 - Схема кооперации функциональных зон в многофункциональных блоках, разработано авторами

Типологический уровень. «Сложившаяся в процессе эволюции объемно-планировочная структура школьных зданий характеризуется зонированием здания на четыре обособленных группы помещений — блок учащихся младших классов, блок учащихся среднего и старшего возраста, блок зальных помещений и блок помещений для организации продленного дня» [34]. Сегодня блок помещений для организации продленного дня, в который входят несколько кружковых и помещение группы продленного дня, не удовлетворяет потребности школы в организации внеурочной полнодневной деятельности, типология здания меняется под влиянием объективных исторических процессов [32,33,35].

Предлагается развить данную группу помещений в структуре здания школы до самостоятельного многофункционального блока ЦВДиДО — полнодневного блок-модуля в объемно-пространственной структуре комплекса.



Рисунок 9 - Теоретические типологические модели образовательных комплексов полного дня с ЦВДиДО, разработано авторами

Основным направлением в развитии архитектурной композиции образовательных комплексов полного дня является децентрализованная система, состоящая из автономных блоков, дифференцированных по функциональным признакам (ООО, ДОО, ЦВДиДО). Для формирования образовательного комплекса были разработаны два вида типологических моделей — территориально-типологические модели образовательных комплексов и архитектурно-типологические модели блок-модулей ЦВДиДО, входящих в состав комплексов. Образовательные комплексы полного дня решаются на основе зонирования комплекса по функциональному содержанию — учебные помещения, мастерские и залы (школа), основные — групповые, игровые, спальные и дополнительные помещения (ДОО), помещения самоподготовки, дополнительного образования и творческого развития детей и взрослых (ЦВДиДО). Для различных градостроительных условий предлагается 4 типа территориально-типологических моделей образовательных комплексов (Рис. 9).

Для каждого типа образовательных комплексов, с учетом существующих зданий школ, созданы градостроительные варианты архитектурно-типологических моделей блок-модулей ЦВДиДО, отличающиеся между собой по объемно-планировочному решению:

1. **Линейная модель** — представляет собой 4-х этажное здание с цокольным этажом, простой конфигурации в плане с размерами в осях 17x7,5 м. Организация внутреннего пространства решена на основе коридорной схемы группировки помещений, объединенных вокруг универсальной рекреации. Функциональное зонирование решено на основе принципа вертикального зонирования: в цокольном этаже размещены функциональные зоны и группы помещений для военно-спортивной подготовки (тренажерные залы, помещения тира) и военно-патриотического воспитания (волонтерский (волонтерский штаб, поисковый отряд); на 1-м этаже находятся помещения для занятий взрослых по освоению компьютерной грамоты, школьный квантториум, дошкольный миниквантториум, коворкинг для жителей; на 2-м, 3-м и 4-м этажах размещаются функциональные зоны для подготовки домашних заданий, отдыха и общения, в соответствии с возрастными группами учащихся.

2. *Компактная модель* — 4-х этажное здание с цокольным этажом, простой конфигурации в плане с размерами в осях 17x17м. Организация внутреннего пространства решена на основе периметральной схемы группировки помещений, объединенных вокруг зального помещения (универсальный зал-трансформер). Функциональное зонирование также решено на основе принципа вертикального зонирования: в цокольном этаже размещены функциональные зоны и группы помещений для военно-спортивной подготовки (тренажерные залы, помещения тира) и военно-патриотического воспитания (волонтерский (волонтерский штаб, поисковый отряд); на 1-м этаже находятся помещения входной зоны, школьный кафетерий, помещения для настольных игр и помещения, обслуживающие универсальный зал; на 2-м и 3-м этажах расположен универсальный зал на 600 мест, по периметру которого находятся помещения функциональных зон для самоподготовки школьников, а также в отдельных блок выделена функциональная зона помещений для обслуживания сценического комплекса, на 4-м этаже расположен школьный коворкинг и помещения для занятий старшеклассников.

3. *Смешанная (линейная+компактная) модель* — 4-х этажное здание с цокольным этажом, объемно-планировочное решение которого образовано сочетанием объемов линейного и компактного типов. Линейная часть имеет габариты в осях 17x7,5 м, компактная – 15x15 м. Эти два объема блокируются между собой через универсальную рекреацию, расположенную в центре линейного объема. Архитектурно-планировочное решение линейной части здания решено аналогично линейной модели, компактная часть представляет собой многоуровневый атриум с верхним освещением, в котором расположен школьный коворкинг. На 1-м этаже расположена входная группа помещений, на 2-м — зоны для проведения мастер-классов и презентаций, на 3-м этаже – зоны для индивидуальной работы, на 4-м- зоны активного, интерактивного и пассивного отдыха, общения и проведения досуга.

4. *Лучевая модель* — представляет собой 3-х этажное здание (возможно с цокольным этажом), форма которого образована сочетанием центрального атриума многосветового объема и 3-х объемов линейного и зального типов, исходящих из центрального атриума. Основана на применении схем горизонтального и вертикального функционального зонирования, подходит для организации специализированных видов деятельности и может иметь в своей функциональной структуре крупные зальные помещения (спортзалы, бассейны и др.).

5. *Блочная модель с развитым центром (централизовано-блочный)* — это 3-х этажное здание (возможно с цокольным этажом) компактного типа, но с четким зонированием по функциональному признаку. Здание формируется вдоль внутреннего развитого центрального атриума, объединяющего несколько основных функциональных блоков в единую систему. В центральном атриуме расположено общественное гибридное пространство коворкинга.

На основе этих моделей создана серия функциональных блок-модулей ЦВДиДО, которые могут быть использованы в качестве типовых для города, пригорода и села; из них можно «собирать» комплексы в соответствии с многообразными местными условиями. Типы архитектурно-типологических моделей блок-модулей ЦВДиДО представлены на рис. 9.

На рис. 10 показан пример реновации общеобразовательной школы в г. Старый Оскол Белгородской области (автор арх. И. П. Чечель). На территории размещаются два школьных здания – здание начальной школы и здание основной и старшей школы (т.п. № 2С-02-07, 1970-е гг.) и два здания детского сада того же периода строительства.





Рисунок 10 - Экспериментальный проект реновации общеобразовательной школы в г.Старый Оскол Белгородской области, арх. И. П.Чечель, 2024 г. Многофункциональные блок-модули тип 2.1С+ЗБ+3.1

Для развития здания школы в образовательный комплекс с Центром внеурочной деятельности и дополнительного образования, в проекте реновации были применены несколько типов многофункциональных планировочных блок-модулей: тип 3Б и тип 3.1С — для дополнения функциональной структуры существующих зданий школ и тип 2С — для дополнения функциональной структуры существующего детского сада. Здания блок-модулей выполнены в виде самостоятельных объемов, соединенных с существующим зданием Н-образной школы надземными переходами, организованными в уровне 2-го этажа и наземным переходом, соединившим начальную школу и новый блок ЦВДиДО. Для создания единой композиции нового архитектурного объекта в данном проекте применены блок-модули компактной композиции, чтобы своим объемно-пространственным решением и применяемыми отделочными материалами они гармонично вписались в существующую застройку.

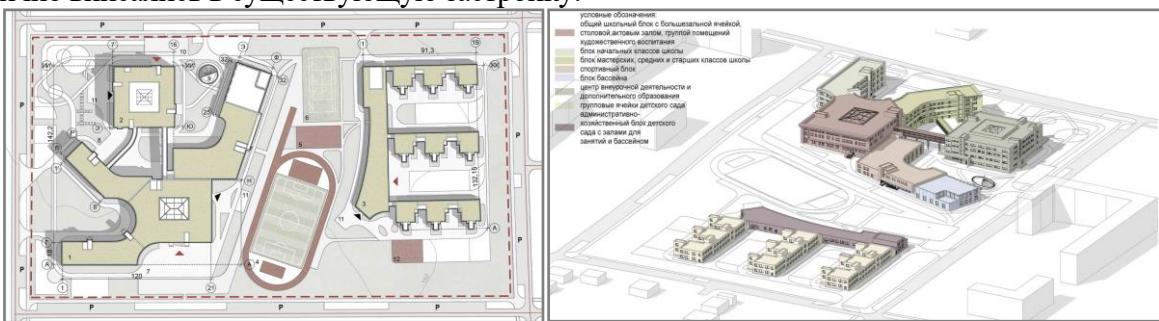


Рисунок 11 - Дипломный проект образовательного комплекса полного дня (новое строительство) в г. Старый Оскол Белгородской области, автор Ткаченко Е., рук. Чечель И.П., 2025 г.
Генеральный план, схема функционального зонирования. Многофункциональный блок-модуль тип 3С

Типологические модели блок-модулей ЦВДиДО позволяют развивать архитектуру не только реновируемых объектов, но и вновь проектируемых и строящихся образовательных комплексов. В качестве примера можно привести проектное предложение образовательного

комплекса полного дня для г. Старый Оскол, выполненное в рамках дипломного проектирования (Рис. 11).

4. Заключение

1. Стремление создать образовательные комплексы нового поколения обусловлено тенденцией объединения людей в группы по интересам, что особенно ярко проявилось во время прекращения общения во время чрезвычайной ситуации пандемии и их стремлению к самореализации (в т.ч. творческой, культурной, образовательной и т.п.). Человек ищет свое место в социуме, желательно в кругу тех, кто разделяет взгляды, интересы и цели. Занимаясь в кружках, секциях, объединениях, человек стремится реализовать свое внутреннее «я» через, например, игру на музыкальных инструментах, пение, спортивные победы и т.д., добиваясь в выбранных областях успехов, привнося в них что-то свое или оставляя в них след. Для общения особенно важны общественные гибридные пространства коворкингов, как мест, где можно работать и учиться совместно. Выполняя схожие по направлению виды действий в помещении с другими людьми, человек может научиться новому, путем перенятия опыта, советоваться с коллегами по рабочему пространству, образовывать группы брейнсторминга (метод мозгового штурма) по решению тех задач, которые находятся в компетенции конкретной группы участников. Движимое вышеперечисленными предпосылками, общество приходит к идее создания образовательных комплексов, в которых будут реализовываться образовательные, культурные и коммуникативные потребности его членов, при этом сохраняется возможность занятия разными видами деятельности в контексте крупной территории: к понятию «образовательного комплекса» добавляется приставка в виде слова «многофункциональный», а в контексте режима его работы – «полнодневный».

2. Современной тенденцией реализации проектов полнодневных образовательных комплексов является реновация (в том числе реконструкция) уже имеющихся зданий школьных фондов. Большое значение при этом должно уделяться экологической составляющей проекта и принципам устойчивого развития. На этой базе появляется подход «повторного использования adaptive reuse» или «реабилитация имущества», включающий в себя рефункционализацию архитектурного пространства под новые варианты использования. Данные для применения подхода — морально устаревшие школьные здания. Отдельно к эффектам подхода могут быть отнесены: создание нового «маяка общества»: формирование новых общественных точек притяжения; снижение затрат на строительство и возможность корректировки социального заказа в последующем. Среди причин реновации школ в комплексы можно также выделить:

- создание наиболее приспособленных для самовыражения и отдыха пространств;
- ориентир на «открытую деятельность»: может прийти любой желающий вне зависимости от своего роли и места в образовательной группе и воспользоваться предложенными услугами;
- восстановление баланса между видами активного досуга: некоторые жилые районы городов России обеспечены учреждениями с узким функциональным диапазоном деятельности (например, только стадионом или музыкальной школой), создание комплекса как многофункционального центра общественно-культурного развития включает в себя расширение диапазона кружков и иных видов активности;
- моральное старение фондов школьных зданий: длительное отсутствие поддержки учреждений образования со стороны федерального, регионального и муниципального сектора страны не позволило сохранять объекты в облике и наполнении, отвечающим современным высокотехнологичным требованиям.

3. Объединенная теоретическая модель образовательного комплекса полного дня

представляет собой 3-х частную структуру, как совокупность социального, функционального и типологического подструктурных уровней. Данная модель позволяет не только реновировать существующие здания школ в образовательные комплексы, но и создавать новые архитектурные комплексы.

Значимость результатов данной работы заключается в том, что предложенная объединенная теоретическая модель формирует научно-обоснованную базу для развития архитектурной типологии объектов общего образования нового поколения, для ее дальнейшего внедрения в архитектурную проектную практику. В своей основе она опирается на социальные группы потребителей образовательных услуг, их потребности, выражющиеся в конкретных видах и формах воспитательно-образовательной деятельности, на прогрессивные архитектурные и объемно-планировочные решения, учитывающие современные тенденции в проектировании архитектурных объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Задвернюк Л. В. Проблемы реализации современной модели организации школьного пространства в архитектуре России // Ноэма (Архитектура. Урбанистика. Искусство). 2020. № 2(5). С. 125-139. EDN VYOOJW.
2. Сырова Н.В., Перцева Л.Н., Набокина А.В. Влияние архитектуры образовательного пространства на развитие творческих способностей школьников // Проблемы современного педагогического образования. 2022. С.277–280.
3. Игнатьева А. В. Создание творческой образовательной среды для формирования познавательного мотива // Создание и совершенствование творческой образовательной среды в учреждении образования: проблемы, идеи, решения : сборник научных статей. Уральский государственный педагогический университет ; под общей редакцией С. А. Новоселова. Екатеринбург.2022. С.121-131.
4. Маркова Д. Д. Сущность, структура и проектирование творческой образовательной среды в учреждении дополнительного образования // Создание и совершенствование творческой образовательной среды в учреждении образования: проблемы, идеи, решения : сборник научных статей. Уральский государственный педагогический университет ; под общей редакцией С. А. Новоселова. Екатеринбург. 2022. С.169-179.
5. Федеральный закон. Об образовании в Российской Федерации. от 29 декабря 2012 г. N273-ФЗ: [принят ГД ФС РФ 21.12.2012]. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/36698/page/1> (дата обращения: 18.05.2025).
6. Федеральный государственный образовательный стандарт основного общего образования. Министерство образования и науки Российской Федерации, приказ от 17 декабря 2010 г. N 1897 об утверждении федерального государственного образовательного стандарта основного общего образования [Электронный ресурс]. URL: https://docs.edu.gov.ru/document/8f549a94f631319a9f7f553_2748d09fa (дата обращения 07.06.2025).
7. Национальный проект «Образование» [Электронный ресурс]. URL: <https://edu.gov.ru/national-project> (дата обращения 07.06.2025).
8. Региональный проект «Организация образовательной деятельности в общеобразовательных учреждениях Белгородской области в режиме «Школа полного дня» URL: <https://obr.belregion.ru/deyatelnost/proekty/organizaciya-obrazovatelnoj-deyatelnosti-v-obsheobrazovatelnyh-uchrezhdeniyah-belgorodskoj-oblasti-v/> (дата обращения: 21.05.2025).
9. Чечель И.П. Тенденции развития архитектуры образовательных комплексов полного дня (на примере опыта Белгородской области) // Международная научная конференция перспективных разработок молодых ученых. Курск: ЗАО «Университетская книга», 2024. Т.4. С. 277-284.
10. Вильковский М.Б. Социология архитектуры М.: Фонд «Русский авангард».2010. 592 с. ISBN 978-5-91566-021-1.
11. Кияненко К.В. Путеводитель по сферам социального знания в архитектуре и окрестностях // Архитектурный вестник. 2009. №3. С.62- 66.
12. Кияненко К.В. Социология архитектуры // IV Очередной Всероссийский социологический конгресс Социология и общество: глобальные вызовы и региональное развитие. Секция 40. С.7414-7420 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.isras.ru/files/File/congress2012/part54.pdf> (дата обращения 07.06.2025).
13. Филиппов А.Ф. Социология пространства. С-Пб.: Изд-во «Владимир Даль». 2008.
14. Барчугова Е.В., Рочегова Н.А. Социология архитектуры. Три этапа развития // Информационные технологии и архитектура. 2018. №3(44). С. 377-391.
15. Глазычев В.Л. Социология архитектуры – какая и для чего? // Зодчество. 1978. №2(21). С. 25-29.
16. Делицц Х. Архитектура в социальном измерении: Пер.нем.Вильковский М.Б., Воробьева А.Г. // Социологические исследования. 2008. № 10. С.113-121.
17. Смит Р., Бани В. Теория символического интеракционизма и архитектура // Социологические исследования. 2010. №9. С.71-79.
18. Смит Р., Бани В. Искусственно созданное материальное окружение по отношению к людям, символам и социальной действительности: предложение по изменению архитектурного подхода // Человечество и общество. 2002. С. 293-311.
19. Крашенинников, А.В. Сценарное проектирование городской среды // Architecture and Modern Information Technologies. 2017. №4 (41). С. 242-256.

20. Баширова Э.И., Назимов Р.К. Применение сценарного подхода при разработке функционального зонирования в ходе архитектурной реконструкции и реставрации Казанского Театра юного зрителя// Известия КГАСУ. 2019. №3 (49). С. 7-15.
21. Воробьева М.О. Приемы сценарного подхода в организации общественно-рекреационных пространств //Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Градостроительство: сб. материалов конф. под ред. М.И. Бальзанникова, К.С. Галицкова, Е.А. Ахмедовой. Самара: Изд-во СГАСУ. 2015. С. 248-255.
22. Воробьева М.О. Принципы сценарного подхода в организации общественно-рекреационных пространств на примере парков [Текст] / М.О. Воробьева // Градостроительство и архитектура (Самара). 2017. Том: 7. № 2 (27). С.119-124. DOI: 10.17673/Vestnik.2017.02.19.
23. Михалчева С.Г. К вопросу о сценарном подходе к проектированию городской среды // Образование и наука в современном мире. Инновации (Пенза). 2018. № 5 (18). С.194-200.
24. Минг-Чун Ли На пути к основанному на сценариях подходу к коллективному проектированию. 2018. DOI:10.17831/REP:ARCC%Y544
25. Эйлуты Б. Сценарное проектирование: новые применения в метаморфической архитектуре. Границы архитектурных исследований. 2021. Том 10, Выпуск 1. С. 224-225.
26. Огилви Дж. Создание лучшего будущего: сценарное планирование как инструмент для создания лучшего будущего. Издательство Оксфордского университета; 1-е издание. 2002. 256 с.
27. Данилов П. А. Сценарный подход в проектировании городского парка // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Градостроительство: сб. материалов конф. под ред. М.И. Бальзанникова, К.С. Галицкова, Е.А. Ахмедовой // Самарский государственный архитектурно строительный университет. Самара: Изд-во СГАСУ. 2015. С. 222-228.
28. Шубенков М.В. Структурные закономерности архитектурного формообразования. М.: Архитектура-С. 2006. 320 с. ISBN 5-9647-0105-1
29. Шубенков М.В. Структура архитектурного пространства. Дис. доктора арх. 2006.
30. Воличенко О., Иманкулов Д., Марченко А. Теоретическая модель художественного и архитектурного объекта // Проект Байкал. 2023. Т. 20, № 75. С. 98-104. DOI 10.51461/pb.75.22. EDN FKMDWQ.
31. Омуралиев, Д. Д., Воличенко О. В. Структурная модель архитектурного объекта // Вестник Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н.Исанова. 2009. Т. 3, № 1. С. 204-208. EDN HTVLMP.
32. Воличенко, О. В. Методика предпроектного и проектного анализа в архитектуре и градостроительстве. Саратов: Вузовское образование, 2020. 144 с. ISBN 978-5-4487-0635-6. DOI 10.23682/89677. EDN IJJFCS.
33. Воличенко О. В. Архитектурное проектирование. Концептуально-прототипное моделирование архитектурных объектов. Саратов: Вузовское образование, 2020. 140 с. ISBN 978-5-4487-0634-9. DOI 10.23682/89676. EDN HLZZUX.
34. Степанов В.И. Проблемы архитектуры школьных зданий. Дисс. доктора арх. 1983.
35. Чечель И.П. Актуальная архитектурная классификация общеобразовательных школ и комплексов полного дня (на примере отечественного и зарубежного опыта) // 3-я Всероссийская молодежная научная конференция. Курск: ЗАО «Университетская книга». 2025. 545 с. С. 360-366.

REFERENCES

1. Zadvernyuk L.V. Problems of implementing the modern model of school space organization in Russian architecture [Problemy realizacii sovremennoj modeli organizacii shkolnogo prostranstva v arhitekture Rossii]. *Noema (Architecture. Urbanistics. Art)*. 2020;(2):125-139. EDN: VYOOJW. (rus)
2. Syrova N.V., Pertseva L.N., Nabokina A.V. The Influence of the Architecture of the Educational Space on the Development of Students' Creative Abilities [Vliyanie arhitektury obrazovatel'nogo prostranstva na razvitiye tvorcheskih sposobnostej shkolnikov]. *Problems of Modern Pedagogical Education* [Problemy sovremenennogo pedagogicheskogo obrazovaniya]. 2022:277–280. (rus)
3. Ignatieva A.V. Creating a Creative Educational Environment for the Formation of an Educational Motive [Sozdanie tvorcheskoj obrazovatelnoj sredy dlya formirovaniya poznavatelnogo motiva]. In: Novoselov S.A. (ed.). *Creating and Improving a Creative Educational Environment in an Educational Institution: Problems, Ideas, and Solutions* [Sozdanie i sovershenstvovanie tvorcheskoj obrazovatelnoj sredy v uchrezhdenii obrazovaniya: problemy, idei, resheniya]. Yekaterinburg: Ural State Pedagogical University, 2022. Pp. 121-131. (rus)
4. Markova D.D. Essence, structure and design of a creative educational environment in an institution of additional education [Sushnost, struktura i proektirovanie tvorcheskoj obrazovatelnoj sredy v uchrezhdenii dopolnitelnogo obrazovaniya]. In: Novoselov S.A. (ed.). *Creation and improvement of a creative educational environment in an educational institution: problems, ideas, solutions* [Sozdanie i sovershenstvovanie tvorcheskoj obrazovatelnoj sredy v uchrezhdenii obrazovaniya: problemy, idei, resheniya]. Yekaterinburg: Ural State Pedagogical University, 2022. Pp. 169-179. (rus)
5. *Federal Law About education in the Russian Federation* [Ob obrazovanii v Rossijskoj Federacii] dated December 29, 2012, No. 273-FZ. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/36698/page/1> (date of application: 16.04.2025). (rus)

6. *Federal State Educational Standard of Basic General Education* [Federalnyj gosudarstvennyj obrazovatelnyj standart osnovnogo obshchego obrazovaniya]. Order of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation No. 1897 dated December 17, 2010. URL: <https://docs.edu.gov.ru/document/8f549a94f631319a9f7f5532748d09fa> (date of application: 07.06.2025). (rus)
7. National Project "Education" [Nacionalnyj proekt «Obrazovanie»]. URL: <https://edu.gov.ru/national-project> (date of application: 07.06.2025). (rus)
8. Regional project "Organization of educational activities in educational institutions of the Belgorod region in the "Full-time school" mode [Organizaciya obrazovatelnoj deyatelnosti v obshcheobrazovatelnyh uchrezhdeniyah Belgorodskoj oblasti v rezhime«Shkola polnogo dnya»]. URL: <https://obr.belregion.ru/deyatelnost/proekty/organizaciya-obrazovatelnoj-deyatelnosti-v-obsheobrazovatelnyh-uchrezhdeniyah-belgorodskoj-oblasti-v/> (date of application: 26.04.2025). (rus)
9. Chechel I.P. Tendencies of development of architecture of full-day educational complexes (on the example of experience of the Belgorod region) [Tendencii razvitiya arhitektury obrazovatelnyh kompleksov polnogo dnya (na primere optya Belgorodskoj oblasti)]. *International scientific conference of perspective developments of young scientists. Kursk: CJSC University Book*, 2024. Vol. 4. Pp. 277-284. (rus)
10. Vilkovsky M.B. *Sociology of Architecture* [Sociologiya arhitektury]. Moscow: Russian Avant-Garde Foundation, 2010. 592 p. ISBN 978-5-91566-021-1. (rus)
11. Kiyanenko K.V. A Guide to the Spheres of Social Knowledge in Architecture and Surroundings [Putevoditel po sferam socialnogo znanija v arhitekture i okrestnostyah]. *Architectural Bulletin*. 2009;(3):62-66. (rus)
12. Kiyanenko K.V. Sociology of Architecture [Sociologiya arhitektury]. IV Regular All-Russian Sociological Congress *Sociology and Society: Global Challenges and Regional Development*. Section 40. Pp. 7414-7420. URL: <http://www.isras.ru/files/File/congress2012/part54.pdf> (date of application: 07.06.2025). (rus)
13. Filippov A.F. *Sociology of Space* [Sociologiya prostranstva]. St. Petersburg: Vladimir Dal Publishing House, 2008. (rus)
14. Barchugova E.V., Rochegova N.A. Sociology of Architecture. Three Stages of Development [Sociologiya arhitektury. Tri etapa razvitiya]. *Information Technologies and Architecture*. 2018;3(44):377-391. (rus)
15. Glazychev V.L. Sociology of Architecture – What Kind and For What? [Sociologiya arhitektury – kakaya i dlya chego?]. *Zodchestvo*. 1978;2(21):25-29. (rus)
16. Delitz H. Architecture in the Social dimension [Arhitektura v socialnom izmerenii]. *Sociological research*. 2008;(10):113-121. (rus)
17. Smith R., Bani V. Theory of symbolic interactionism and architecture [Teoriya simvolicheskogo interakcionizma i arhitektury]. *Sociological research*. 2010;(9):71-79. (rus)
18. Smith R., Bani V. Man-made material environment in relation to people, symbols and social reality: a proposal for changing the architectural approach [Iskusstvenno sozdannoe materialnoe okruzhenie po otnosheniyu k lyudyam, simvolam i socialnoj deistvitelnosti: predlozhenie po izmeneniyu arhitekturnogo podhoda]. *Humanity and Society*. 2002:293-311. (rus)
19. Krasheninnikov A.V. Scenario design of the urban environment [Scenarnoe proektirovanie gorodskoj sredy]. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2017;4(41):242-256. (rus)
20. Bashirova E.I., Nazimov R.K. Application of the scenario approach in the development of functional zoning during the architectural reconstruction and restoration of the Kazan Theatre for Young Spectators [Primenenie scenarnogo podhoda pri razrabotke funkcionalnogo zonirovaniya v hode arhitekturnoj rekonstrukcii i restavracji Kazanskogo Teatra yunogo zritelya]. *Izvestiya KGASU*. 2019;3(49):7-15. (rus)
21. Vorobyeva M.O. Receptions of the scenario approach in the organization of social and recreational spaces [Priemy scenarnogo podhoda v organizacii obshchestvenno-rekreacionnyh prostranstv]. In: Balzannikov M.I., Galitskov K.S., Akhmedova E.A. (eds.). *Traditions and innovations in construction and architecture. Urban planning*. Samara: Publishing house of SGAU, 2015. Pp. 248-255. (rus)
22. Vorobyeva M.O. Principles of the Scenario Approach in the Organization of Social and Recreational Spaces on the Example of Parks [Principy scenarnogo podhoda v organizacii obshchestvenno-rekreacionnyh prostranstv na primere parkov]. *Urban Planning and Architecture (Samara)*. 2017;7(2):119-124. DOI: 10.17673/Vestnik.2017.02.19. (rus)
23. Mikhacheva S.G. On the Scenario Approach to Urban Environment Design [K voprosu o scenarnom podhode k proektirovaniyu gorodskoj sredy]. *Education and Science in the Modern World. Innovations (Penza)*. 2018;5(18):194-200. (rus)
24. Ming-Chun Lee. Towards a Scenario-Based Approach to Collaborative Design [Na puti k osnovannomu na scenariyah podhodu k kollektivnomu proektirovaniyu]. 2018. DOI:10.17831/REP:ARCC%Y544. (rus)
25. Eiluti B. Scenario-Based Design: New Applications in Metamorphic Architecture [Scenarnoe proektirovanie: novye primeneniya v metamorficheskoy arhitekture]. *Frontiers of Architectural Research*. 2021;10(1). (rus)
26. Ogilvy J. *Creating a Better Future: Scenario Planning as a Tool for Creating a Better Future* [Sozdanie luchshego budushchego: scenarnoe planirovanie kak instrument dlya sozdaniya luchshego budushchego]. Oxford University Press; 1st edition, 2002. 256 p. (rus)

27. Danilov P.A. Scenario Approach in the Design of an Urban Park [Scenarnyj podhod v proektirovaniu gorodskogo parka]. In: Balzannikov M.I., Galitskov K.S., Akhmedova E.A. (eds.). *Traditions and Innovations in Construction and Architecture. Urban Planning*. Samara: SSUACE Publishing House, 2015. Pp. 222-228. (rus)
28. Shubenkov M.V. *Structural patterns of architectural form* [Strukturnye zakonomernosti arhitekturnogo formoobrazovaniya]. Moscow: Architecture-S, 2006. 320 p. ISBN 5-9647-0105-1. (rus)
29. Shubenkov M.V. *Structure of architectural space* [Struktura arhitekturnogo prostranstva]. Dr. Arch. dissertation, 2006. (rus)
30. Volichenko O., Imankulov D., Marchenko A. Theoretical Model of an Artistic and Architectural Object [Teoreticheskaya model hudozhestvennogo i arhitekturnogo obekta]. *Project Baikal*. 2023;20(75):98-104. DOI: 10.51461/pb.75.22. EDN: FKMDWQ. (rus)
31. Omuralev D.D., Volichenko O.V. Structural model of an architectural object [Strukturnaya model arhitekturnogo obekta]. *Bulletin Kyrgyz State University of Construction, Transport and Architecture named after N. Isanov*. 2009;3(1):204-208. EDN: HTVLMP. (rus)
32. Volichenko O.V. *Methodology of pre-project and project analysis in architecture and town planning* [Metodika predproektnogo i proektnogo analiza v arhitekture i gradostroitelstve]. Saratov: Vuzovskoe Obrazovanie, 2020. 144 p. ISBN 978-5-4487-0635-6. DOI: 10.23682/89677. EDN: IJJFCS. (rus)
33. Volichenko O.V. *Architectural Design. Conceptual and Prototype Modeling of Architectural Objects* [Arhitekturnoe proektirovanie. Konceptualno-prototipnoe modelirovanie arhitekturnyh obektov]. Saratov: University Education, 2020. 140 p. ISBN 978-5-4487-0634-9. DOI: 10.23682/89676. EDN: HLZZUX. (rus)
34. Stepanov V.I. *Problems of the Architecture of School Buildings* [Problemy arhitektury shkolnyh zdaniy]. Dr. Arch. dissertation, 1983. (rus)
35. Chechel I.P. Actual Architectural Classification of General Education Schools and Full-Day Complexes (Based on Domestic and Foreign Experience) [Aktualnaya arhitekturnaya klassifikaciya obshcheobrazovatelnyh shkol i kompleksov polnogo dnya (na primere otechestvennogo i zarubezhnogo opыта)]. *3rd All-Russian Youth Scientific Conference*. Kursk: University Book CJSC, 2025. Pp. 360-366. (rus)

Информация об авторах

Воличенко Ольга Владимировна

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;
ФГАОУ ВО «Российский университет Дружбы народов им. Патриса Лумумбы (РУДН); г. Москва, Россия;
ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова)», г. Белгород, Россия,
доктор архитектуры, профессор кафедры архитектуры, реставрации и дизайна
E-mail: wolitschenko@mail.ru

Чечель Иван Павлович

ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова)», г. Белгород, Россия,
старший преподаватель кафедры «Архитектура и градостроительство»
E-mail: golden-line7@yandex.ru

Information about authors

Volichenko Olga V.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National Research Moscow State University of Civil Engineering" (NRU MGSU); Moscow, Russia;
FGAOU HE "Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba (RUDN University); Moscow, Russia;
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)", Belgorod, Russia,
Doctor of Architecture, Professor of the Department of Architecture, Restoration and Design
E-mail: wolitschenko@mail.ru

Chechel, Ivan P.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (BSTU named after V.G. Shukhov)", Belgorod, Russia, Senior Lecturer at the Department of Architecture and Urban Planning
E-mail: golden-line7@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 03.06.2025

The article was submitted 03.06.2025

Одобрена после рецензирования 21.09.2025

Approved after reviewing 21.09.2025

Принята к публикации 01.10.2025

Accepted for publication 01.10.2025

Н.В. РОЗАНЦЕВА¹

¹ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», Санкт-Петербург, Россия

РЕКОНСТРУКЦИЯ ЗАМКА ИНСТЕРБУРГ С ПРИСПОСОБЛЕНИЕМ ДЛЯ СОВРЕМЕННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Аннотация. Статья посвящена проблеме реконструкции средневекового замка Инстербург, расположенного в Калининградской области России. Рассматривается важность сохранения этого объекта культурного наследия и предлагается вариант его адаптации для современного использования. Проведённый анализ включает изучение технического состояния замка, оценку возможности его реконструкции и разработку предложений по сохранению и функциональному применению. В статье рассматриваются различные подходы к реконструкции, включая музеефикацию и функциональное переосмысление, а также архитектурно-планировочные решения, основанные на принципах имитации и контраста. Важное место занимает обсуждение необходимости сочетания исторического наследия с современными элементами для создания гармоничного архитектурного образа. Для реконструкции замка Инстербург предложен комплекс архитектурных и конструктивных решений: создание стеклянного купола на металлических колоннах; возведение внешних стен и устройство атриума из витражного остекления, что придаст конструкции воздушность и эстетичность, а также позволит снизить нагрузку на основание; усиление исторических стеновых конструкций; решение проблемы фундамента путём подведения стилобата, который соединит сохранившиеся стены замка с новыми конструкциями. Даные меры обеспечат работу конструкций как единого целого, повысят общую устойчивость и надежность объекта и позволят передавать нагрузку на свайное основание. В расчётовой части произведён сбор нагрузок и определены параметры шпунтового ограждения и свайного основания. Предложенные решения направлены на сохранение исторического облика замка, обеспечение его функциональности и адаптацию к современным условиям эксплуатации.

Ключевые слова: объекты культурного наследия, функциональное использование, реконструкция, архитектурно-планировочные решения, стилобат.

N. V. ROZANTSEVA¹

¹ Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia

RECONSTRUCTION OF INSTERBURG CASTLE WITH ADAPTATION FOR MODERN USE

Abstract. This article addresses the problem of reconstructing the medieval Insterburg Castle, located in the Kaliningrad region of Russia. It examines the importance of preserving this cultural heritage site and proposes a variant for its adaptation to modern use. The conducted analysis includes a study of the castle's technical condition, an assessment of its reconstruction feasibility, and the development of proposals for its preservation and functional application. The article explores various approaches to reconstruction, including museumification and functional reinterpretation, as well as architectural and planning solutions based on the principles of imitation and contrast. Significant attention is given to the discussion of the need to combine historical heritage with contemporary elements to create a harmonious architectural image. A set of architectural and structural solutions is proposed for the reconstruction of Insterburg Castle: the installation of a glass dome on metal columns; the erection of external walls and the construction of an atrium with stained-glass glazing, which will give the structure a sense of lightness and aesthetic appeal while also reducing the load on the foundation; the strengthening of the historic wall structures; and addressing the foundation problem by introducing a stylobate that will connect the preserved castle walls with the new structures. These measures will ensure the structures work as a single unit, enhance the overall stability and reliability of the facility, and enable the transfer of loads to the pile foundation.

© Розанцева Н.В., 2025

The calculation section includes the determination of loadings and the definition of parameters for the sheet pile enclosure and the pile foundation. The proposed solutions are aimed at preserving the historical appearance of the castle, ensuring its functionality, and adapting it to modern operational conditions. These solutions are aimed at preserving the historical appearance of the castle, ensuring its functionality and adapting to modern operating conditions.

Keywords: cultural heritage sites, functional use, reconstruction, architectural and planning solutions, stylobate.

1. Введение

Калининградская область — наш самый западный регион, обладающий несомненной исторической ценностью. История региона тесно переплетена с историей европейских государств и России. У Восточной Пруссии уже были периоды вхождения в состав России. Первый раз это произошло во время Семилетней войны. В январе 1758 года главнокомандующим был назначен Вильгельм Вильгельмович Фермор, и уже 13 января жители Кёнигсберга присягнули на верность России [1]. В этот период губернаторами Восточной Пруссии также были Николай Андреевич Корф, Василий Иванович Суворов, Пётр Иванович Панин и Фёдор Матвеевич Войков [2; 3]. Второй раз территория нынешней Калининградской области вошла в состав России во время Первой мировой войны, 21 августа 1914 года, когда часть Восточной Пруссии оказалась под управлением русского генерал-губернатора Павла Григорьевича Курлова [4; 5]. С 1945 года, после окончания Второй мировой войны, область навсегда вошла в состав СССР, а затем России.

Уникальность региона заключается в том, что здесь можно буквально прикоснуться к Средневековью: на его территории расположено наибольшее в России количество памятников архитектуры средневековой Европы [6]. Однако большинство объектов культурного наследия находится в руинированном состоянии, и их сохранность является одной из наиболее сложных проблем региона.

Объект исследования — характерная постройка фортификационного сооружения Восточной Пруссии XIV–XV веков — замок Инстербург, находящийся в центре Калининградской области, в городе Черняховске, у слияния рек Инстреч и Анграпы (см. рис. 1, в).

Строительство замка началось в первой трети XIV века, но, начиная с XV века, он неоднократно надстраивался и перестраивался, что очень заметно по различной толщине и кладке сохранившихся стен. Замок имеет почти квадратную в плане форму 44 на 45 метров с просторным внутренним двором и колодцем. Однако с учётом обрушения внутренней стены его текущая конфигурация скорее напоминает букву «П». К замку плотно примыкает значительно лучше сохранившийся форбург, превосходящий его по площади [7].

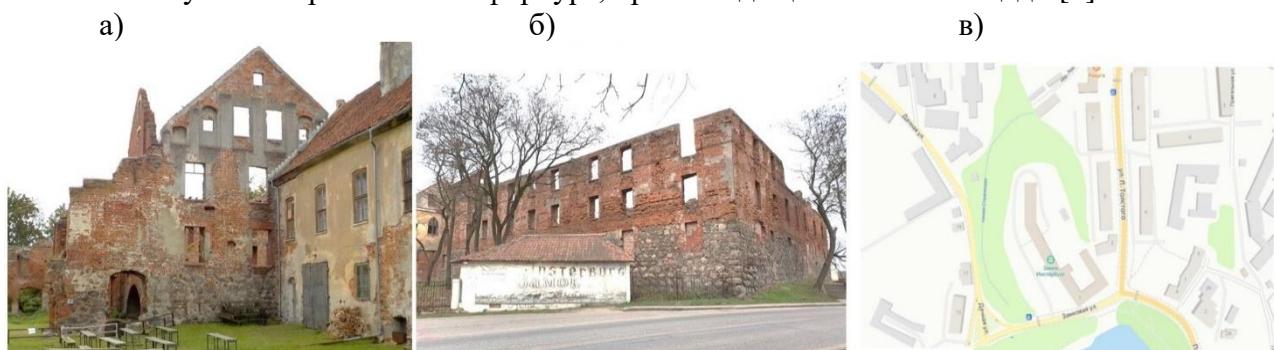


Рисунок 1 – Замок Инстербург: а- вид внутренней части замка в 2024 году(фото автора); б- внешняя стена замка в 2024 году(фото автора); в- ситуационный план расположения замка

Город Черняховск (в то время — Инстербург) сильно пострадал от английских бомбардировок во время Второй мировой войны. Однако разрушение замка произошло не в ходе боевых действий, а вследствие разборки его стен на кирпич для хозяйственных нужд соседней Литовской ССР. Работы велись варварским способом, что и привело замок в

современное руинированное состояние.

В 1997 году группа энтузиастов предприняла попытку начать восстановление замка. Им даже удалось включить его в федеральную программу «Культура России».

Цель исследования — разработка и предложение варианта реконструкции средневекового замка Инстербург, расположенного в Калининградской области России, с приспособлением под современное использование. Исследование направлено на сохранение этого объекта культурного наследия и поиск оптимального способа его адаптации к современным условиям эксплуатации.

Основные задачи исследования:

- *Анализ технического состояния замка:* оценка степени разрушения и определение возможностей реконструкции;
- *Разработка архитектурно-планировочных решений:* применение принципов имитации и контраста для интеграции новых конструкций с историческим наследием;
- *Определение инженерных решений:* проектирование варианта фундамента, усиления исторических стеновых конструкций, и решения стеклянного купола с центральным атриумом.
- *Оценка целесообразности предлагаемого варианта реконструкции.*

2. Модели и методы

Важно помнить, приступая к реконструкции с последующим приспособлением объекта к современному использованию, что реконструкция не является ремонтом, это сложный процесс поиска оптимальных решений в процессе восстановления объекта, требующий как бережного отношения к истории [8].

Среди основных способов приспособления можно выделить: музеефикацию и функциональное переосмысление, позволяющий превратить памятник архитектуры как правило в общественное пространство.

В процессе реконструкции с приспособлением используют архитектурно-планировочные решения, такие как:

- принцип имитации, очень часто с применением современных материалов с сохранением подобия стиля;
- принцип «контраста», современных пристроек или построек с исторической средой;
- принцип «Вставки» в историческую среду, когда новые объемы органично вписываются в существующую застройку.
- воссоздание по архивным документам или аналогам, например комплекс работ, которые были проведены и проводятся в Санкт-Петербурге по восстановлению объектов культурного наследия пострадавших в период Второй мировой войны.

Ярким примером использования принципа совмещения имитации и контраста при реконструкции исторических объектов является проект Главного учебного корпуса Высшей школы менеджмента Санкт-Петербургского государственного университета в Петергофе [9]. В этом проекте архитектор Никита Явейн создал интересный диалог между историческим и современным: сохранил существовавшую историческую часть, сымитировал некоторые элементы в псевдоисторическом стиле и добавил контрастное решение — перекрытие атриумов, образованных на месте дворовой территории корпусов.

В данном случае результат реконструкции представляет собой гармоничный баланс между сохранением исторического наследия и внедрением современных элементов. При этом новые части не пытаются копировать старые, а создают яркий контраст, подчеркивая свою современность за счёт прозрачных конструкций, металлических элементов, лаконичных крупных форм, игры отражений и применения современных материалов.

Следует признать, что фортификационные сооружения — как крепости, так и замки —

являются одними из наиболее сложных объектов для реконструкции. Находящиеся в аварийном состоянии объекты обычно возвращают к жизни путём реставрации, утраченные — путём воссоздания, а руинированные, имеющие серьёзные утраты, — почти исключительно путём консервации. Это связано с тем, что они часто не могут принести практической пользы или экономической выгоды, и работа с ними продиктована в первую очередь необходимостью сохранения духовно-нравственного и исторического потенциала. Для понимания масштаба проблемы отметим, что на сегодняшний день в Калининградской области выявлено 178 объектов культурного наследия, обладающих признаками руинированного состояния.

Реконструкция руинированных сооружений — не консервация и не воссоздание — ранее не имела широкой методологической и практической базы [10; 11]. Однако сохранение этих объектов может послужить дополнительным фактором развития туризма в Калининградской области.

В 2003 году, в связи с включением замка в федеральную программу «Культура России», было проведено обследование технического состояния, заказанное Фондом «Дом-Замок», для принятия обоснованного решения по реконструкции. Обследования проведены путем вскрытий, проходов и шурфов¹:

- грунтов основания и подножия насыпи замка, земляных полов в сохранившейся части подвалов замка, стен фундаментов, а также сохраненных частей стен, с целью определения сохранности;
- наличие и состояние подземных вод, гидроизоляция подземной части;
- обнаружения дефектов, а также обмеров, для определения конструктивного решения, и последующего сбора нагрузок.

Исследования, подтвердили наихудшие опасения: фундаменты замка и низлежащие элементы стен, простоявшие не одно *десятилетие разгруженными, не смогут воспринимать дополнительную нагрузку*. Среди прочих опасных геотехнических факторов, значительно усложняющих возможность реконструкции, преобладающее значение имеют:

1) сложность инженерно-геологических условий:

- наличие насыпных техногенных грунтов неоднородных по мощности, составу и свойствам, слежавшиеся, перемешанные с примесью органических веществ, со строительным мусором до 70%. Залегают на глубине 0,05–0,10 м (мощность от 2,70 до 3,20 м);
 - высокое положение уровня грунтовых вод;
 - наличие пучинистых пылевато-глинистых и пылевато-песчаных грунтов в слоях основания, обладающих тиксотропными свойствами, которые могут прийти в движение при любых работах и воздействии динамически действующих установок, может спровоцировать развитие серьезных деформаций в фундаментах мелкого заложения замка и форбурга;

2) невозможность стандартного усиления фундаментов замка;

3) наличие существующих зданий в зоне влияния: на расстояние 0,8 м от объекта находится 2-этажное здание (форбурга), являющееся объектом культурного наследия, и всего 12м до близлежащего жилого дома;

4) наличие распределительных коллекторов: канализационных, отопления, водоснабжения, а также труб для прокладки эл.кабеля под пятном застройки и вдоль южной и восточных границ участка, т.к. рядом находятся современная застройка (см.рис.2,в).

Реконструкция замка в сложившихся условиях с применением стандартных решений потребует колоссальных финансовых затрат, что, видимо, и послужило причиной приостановки работ. В 2010 году Калининградской областной думой было принято решение о безвозмездной передаче ряда маргинальных объектов культурного наследия, в число которых попал и замок Инстербург, в собственность Митрополии Русской Православной Церкви [12] — «в связи с необходимостью сохранения объектов культурного наследия». Однако, поскольку преобразовать замок в действующий храм невозможно, церковные администраторы

¹ ГОСТ 31937-2011 Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния

не проявляют заинтересованности в его восстановлении.

В целом текущее состояние замка можно охарактеризовать как неудовлетворительное и аварийное, а по сути — как серьёзно руинированное. Этот уже неэксплуатируемый памятник имеет множество дефектов и в силу объективных причин не может быть возвращён в хозяйственный оборот. В своём нынешнем виде он не подлежит приспособлению для современного использования, особенно в узкоутилитарных целях. Если в ближайшее время не начать консервационные или реставрационные работы, замок может быть окончательно признан утраченным.

Изучение проекта Никиты Явейна позволяет выдвинуть гипотезу о том, что контрастное включение современных конструкций и материалов может позволить снизить стоимость реконструкции, сохранить объект и трансформировать его в востребованное общественное пространство.

Следует отдать должное группе энтузиастов, которые на начальном этапе консервации разобрали наиболее аварийные участки, а оставшиеся стены укрепили инъекционным раствором для кладки IM-01, чтобы обеспечить безопасность. Высверливание инъекционных шпурков и диаметр бура подбирались в соответствии с размером инъекционных трубок. Инъектирование проводилось с двух сторон сохранившейся кладки стен снизу вверх. Условная схема работ по инъектированию и фотографии текущего состояния стен подвала замка приведены на рис. 2.



Рисунок 2 – Текущее состояние стен подвала замка Инстербург после укрепления кладки стен, и схема проведения укрепления кладки: а- текущее состояние подвала с видимыми следами проведенных инъекций (фото автора); б- фотография свода подвальной части (фото автора); в- схема проведения укрепления стен подвала

Поиски решений, выявили ряд проблем: полноценная реставрация замка невозможна, воссоздание **не планируется**. Но шанс у замка все-таки есть. На стадии предварительного обследования проведены замеры геометрических параметров лазерным дальномером Leica Disto D2H, показавшие, сохранность геометрических параметров замка, несмотря на явное руинированное состояние.

Предлагается применить «принцип контраста», и сохранить оставшиеся элементы здания накрыв их воссоздающим ранее существующих контур замка стеклянным куполом, но образующим центральный атриум, подчеркнув выразительность архитектурного образа, и гармонично соединив функциональность с современностью. С этой целью, для устройства внешних витражных стен устанавливаются металлические фахверковые колонны, располагаемые параллельно друг другу, по контуру объекта, крышу выполнить из металлических ферм, с внешним покрытием из витражного стекла. Оно имеет сравнительно небольшой вес и состоит из двух видов стекла – закаленного и многослойного (триплекса)(см.рис.3). Такое решение позволит не только сохранить исторический памятник в законсервированном состоянии, но и сделать объект функциональным, обустroив под сводами

общественное пространство¹. Разработан вариант конструктивного решения по реконструкции с увеличением несущей способности, путем изменения конструктивно планировочной схемы —разгружение и передача полностью нагрузки на вновь возводимые элементы и конструкции: установка тяжей, скоб, разгрузочных поясов, хомутов, установка дополнительных опор —разгружающих каркасов.

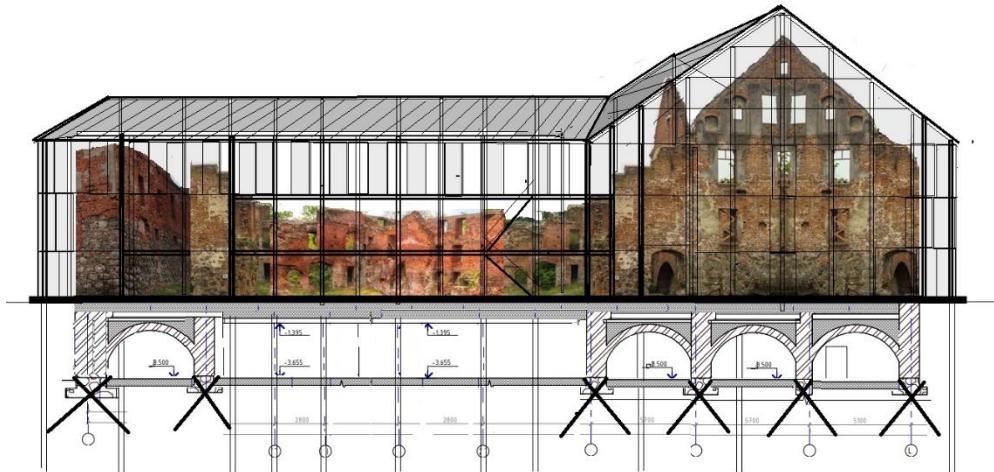


Рисунок 3 –Предлагаемое решение реставрации замка Инстербург

Для воплощения этой идеи необходимо обеспечить совместную работу продольных и поперечных стен и удержание их в вертикальном состоянии, выявленные значительные повреждения и участки с утратой стен требуют разработки мероприятий, например усиления стены с применением металлических хомутов, пластин и тяжей (см.рис.4.).

Предлагается произвести неглубокое штрабление с шагом не менее 1,5 м и устройством металлических закладных обоям с заанкериванием натяжными ленточными тяжами, в противоположные стены, с внутренней и наружной стороны оставшихся элементов стен создав жесткую диафрагму и таким образом взяв каркас здания в несколько единых жестких колец (см.рис.5). Внутренние тяжи лучше выполнить в районе уровня пола первого этажа и предполагаемых перекрытий с заанкериванием их в конструкции стоек и перекрытий. Поверх штрабы обустраивать металлические сетки с нанесением с верху торкрет-бетонного слоя [14], распределяющие нагрузки на всю плоскость стены, и позволяющие значительно снизить вероятность увеличения деформации, возникающих в старой кладке в том числе и из-за проведения штрабления.

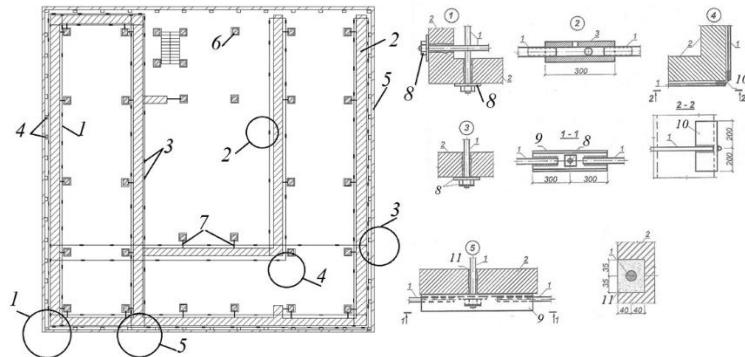


Рисунок 4 – Крепление стен металлическими тяжами[13]: а- внутри здания и снаружи здания; б-вариант укладки тяжей в штрабу; 1- тяжи диаметром 20...36 мм с нарезкой на концах; 2- деформированное здание; 3- стяжные муфты диаметром 35...50мм с правой и левой резьбой; 4 – фахверковые колонны стойки для удержания наружного ограждения; 5- витражное остекление; 6- стойки; 7- связевые элементы для передачи нагрузки на стойки; 8- металлические пластины и гайки; 9- швейцер №16...20; 10- уголок №15...20, устанавливаемый на цементный раствор; 11- цементный раствор марки 100

¹ Федеральный закон от 30.12.2009 N 384-ФЗ. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений (с изменениями на 25 декабря 2023 года).

Стойки нового несущего каркаса выполнить металлическими. По окончании установки стоек произвести внешнюю выравнивающую заливку пола. Стойки между собой и с остатками стен соединены с помощью металлических балок и анкерных тяжей(см.рис5). Межэтажные перекрытия выполнить по металлическим балкам.

По результатам шурфования и аналитических расчётов выдвинуто предположение, что фундаменты не обладают достаточной несущей способностью.

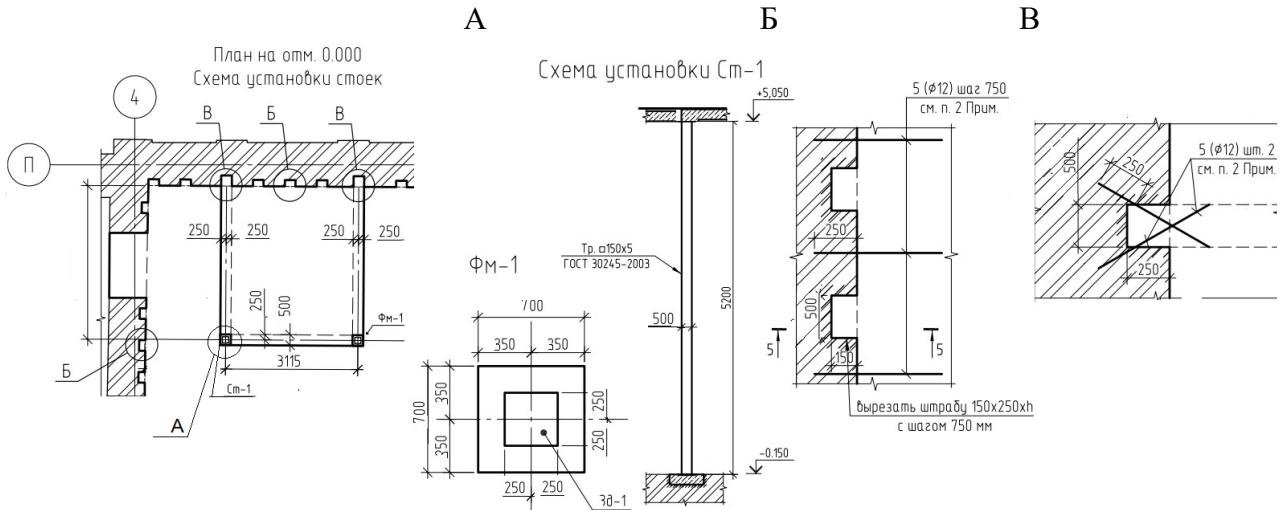


Рисунок 5 –Схема установки дополнительных опорных стоек и штрабления:

А- элементы стоек; Б, В- узлы соединения существующих участков стен и вновь возводимых конструкций

Необходимо предусмотреть мероприятия по сохранению естественного сложения грунтов основания, исключающие возможность их динамического разжижения, замачивания и промораживания.

Предлагается изменить расчетную схему: *перенести нагрузку на новое основание: т.е. выполнить над всей частью сохранившегося арочного кирпичного фундамента новое дополнительное единое монолитное основание — СТИЛОБАТ, с увеличением внешней площади, надежно соединив с ним сохранившиеся стены (см.рис.6).*

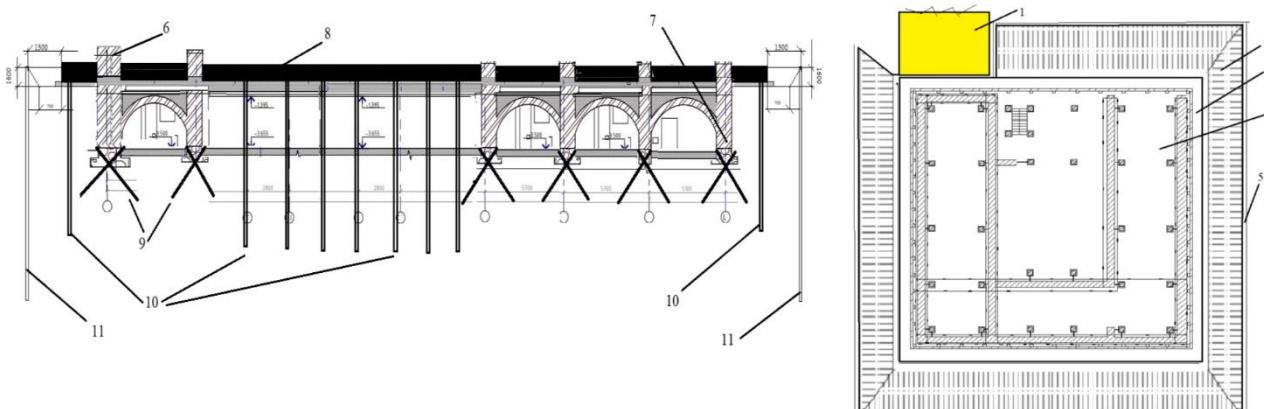


Рисунок 6 –Разработка нового фундамента:

1- Здание форбурга; 2- Реконструируемый Замок Инстербург; 3- Подводимое новое несущее основание (Стилобат); 4- котлован; 5- шпунтовое ограждение в плане; 6- оставшиеся стены замка; 7- сохранившаяся часть фундамента замка; 8- подводимое несущее основание (Стилобат) в разрезе; 9- инъекционные сваи; 10- сваи(под колонны); 11- шпунт

В рассматриваемой ситуации при наличии слабых тиксотропных глинистых и песчаных грунтов, однозначным является выбор свайного варианта фундамента [15].

Стилобат — конструкция плиты, в которую будут включены оголовки свай под новые несущие конструкции, и которая будет являться опорой для новых несущих колонн замка,

дополнительные нагрузки от которых и сооружаемых перекрытий, а также фахверковых колонн и купола, в конечном счете и будут передаваться на сооружаемую плиту на свайном основании.

Замок следует сохранить на цельном грунтовом основании, той исторической призме, размеры которой обеспечат устойчивость грунтового откоса от выпирания под действием веса замка с сооружаемым куполом.

В начале производства работ вокруг замка должны быть удалены часть насыпного грунта, оставшегося строительного и бытового мусора, сорная растительность, демонтируются все элементы сохранившейся части пола 1 этажа, произведены собственно консервационные работы (гидроизоляция, укрепление несущих конструкций); производится укрепление конструкций подвала, вдоль стен по крайним осям.

Чтобы избежать возможных деформаций замка и близ расположенного форбурга (до него всего 80 см), работы должны вестись под защитой замкнутого по контуру шпунтового ограждения, для ограничения подвижности грунта и водопритока в котлован и предотвращения выноса частиц грунта, применение методов погружения шпунта, связанных с динамическим воздействием недопустимо. Шпунт будет ограничивать площадь экскавации и служить упором для горизонтальных распорок при откопке:

- глубина ограждения траншеи должна определяться расчетом, при этом для защемления нижней части шпунта, исключения водопритока в траншею и минимизации деформаций соседнего здания в имеющихся грунтах потребуется заглубление шпунта ориентировочно не менее 18 м от поверхности (для внешней шпунтовой стенки);
- применять щадящие методы изготовления шпунтового ограждения методом статического вдавливания, или как вариант устройство траншейной стены в грунте из бурокасательных свай, изготавливаемых с выемкой грунта под защитой глинистого раствора).

Общие этапы возведения можно представить следующим образом: устройство шпунтового ограждения, не извлекаемого, устройство свай, в том числе инъекционных свай усиления, разработка траншеи, устройство стилобата, возведение надземной части, и обратная засыпка.

Необходимо в процессе работ предусмотреть минимальные дополнительные деформации замка, и окружающей застройки. Поэтому начало работ, после разбора завалов, будет связано с устройством **усиления стен с применением металлических хомутов, пластин и тяжей. И только потом устройство шпунтового ограждения.** Шпунт не извлекаемый! В качестве ограждения котлована по периметру площадки целесообразно рассматривать применение металлического шпунта марки Ларсен 5УМ длиной 18 м от поверхности, погружаемого по технологии вдавливания.

Проектом предусматривается, в границах захватки, примыкающей к существующему зданию форбурга(объектом культурного наследия), до начала работ по откопке котлована, после погружения шпунта, произвести закрепление грунтов методом струйной цементации Jet Grouting, а откопку вести по захваткам, так же, как и обустройство плиты [16]. В результате цементации грунтов в указанных отметках должен быть создан грунтоцементный массив высотой 2,65 м, расположенный на 1 м ниже дна траншеи и выполняющий роль дополнительного распора шпунта. Данное мероприятие позволяет минимизировать смещения ограждающей конструкции в области слабых грунтов и, как следствие, предотвращает смещение грунтовых масс из-под подошвы примыкающего здания в сторону траншеи.

Количество свай и их размещение определяется потребностью в расположении несущих колонн-стоец наземной части, под сооружаемый купол; с расчетом по первой группе предельных состояний, т.е. по несущей способности. Несущая способность свай определяется геометрическими размерами свай, инженерно-геологическими условиями площадки, технологией устройства.

В данном случае под проектируемые объемы целесообразно рассмотреть устройство буровабивных свай диаметром 500–650 мм, устраиваемых во внутренней части замка, и по внешней стене. Предложенные типоразмеры свай являются предварительными и подлежат

уточнению в проекте свайного поля. Возможная длина свай должна предусмотреть наличие под острием свай несущего слоя грунта толщиной не менее 1/3 длины свай.

Технология изготовления буронабивных свай должна назначаться из условия минимального воздействия на окружающую застройку. Наиболее опасными участками при погружении свайного поля на рассматриваемой площадке являются место примыкания к существующему зданию форбурга и существующие стены замка. В связи с этим погружение свай в непосредственной близости от существующего здания рекомендуется осуществлять на расстоянии не менее 1,5м строго после устройства шпунтового ограждения. Для дальнейшего выполнения работ нулевого цикла и обустройства новой фундаментной плиты – СТИЛОБАТА, выполняется откопка траншеи вокруг замка, устраивается бетонная подготовка. Устройство плиты СТИЛОБАТА выполняется во враспор шпунтового ограждения; между торцом плиты и ограждением котлована выполняется доливка бетона с целью обеспечения распора. В конструкции стилобата должны быть подготовлены опорные элементы «встречной» части стоек-колонн на определенном расстоянии от сохранившейся части исторической кладки на специально сформированных подошвах с закреплением дополнительными анкерными соединениями с монолитной плитой.

Выполняются работы по вязке арматуры, соединяемой с выпусками анкеров, удерживающих тяжи на уровне пола с внешней и внутренней сторон исторических стен, обустраиваемых стоек и выпусков металлических закладных обойм, соединяющих тяжами исторические стены, с арматурой плиты стилобата, что в дальнейшем надежно соединит все конструкции. После чего устанавливается опалубка и производится бетонирование.

Образуемая фундаментная плита - стилобата, объединяется с вновь возведёнными элементами стоек и существующих исторических стен замка. Приведенные схемы носят рекомендательный характер, окончательная схема будет разрабатываться на этапе рабочего проектирования.

3. Результаты исследования и их анализ

Основная задача проекта, подведение нового основания под здание замка, с возможностью последующего устройства купольной части. Были учтены основные факторы возможного развития осадок окружающей застройки и возможные мероприятия по их предотвращению. К основным факторам возможного развития осадок относятся: устройство необходимой проектируемой траншеи, статическое загружение территории весом проектируемого комплекса с купольной частью, а также возможные технологические осадки, например, связанные с устройством шпунтового ограждения.

Шпунтовые ограждения были заданы элементом «Plaxis» с «интерфейсами», с помощью которых было учтено понижение прочностных характеристик грунта на контакте «грунт-ограждение». Значения коэффициентов понижения прочности на контакте принимались на основании СП381.1325800.2018 «Сооружения подпорные. Правила проектирования»¹. Метод погружения — вдавливание.

Таким образом, после каждого этапа строительных работ формируется новое напряженно-деформированное состояние, соответствующее изменениям в расчетной модели.

СП 22.13330.2016 (п.9.13)² допускает возможность численного расчета осадки фундаментов зданий.

После этапов разработки конструктивного решения нулевого цикла Замка было смоделированы его эксплуатационные нагрузки

Расчеты проведены в программном комплексе Plaxis 3D с численным моделированием

¹ СП381.1325800.2018 Сооружения подпорные. Правила проектирования (с Изменением № 1): <https://docs.cntd.ru/document/551394482>

² СП22.13330.2016 Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83* (с Изменениями N 1, 2, 3, 4, 5): <https://docs.cntd.ru/document/456054206>

геотехнических задач. В качестве модели основания использована модель упрочняющегося грунта.

В ходе расчетов рассмотрено две задачи:

1. Смоделирована откопка траншеи и выполнена оценка влияния экскавации на окружающую застройку, определены деформации шпунта, и дополнительная осадка соседнего здания ОКН.

2. Смоделировано возведение проектируемого здания и его влияние строительства на окружающую застройку, определена осадка основания проектируемого здания и дополнительная осадка соседнего здания ОКН.

Аналитический расчёт шпунтового ограждения котлована произвели с проверкой сечения шпунта по несущей способности. В качестве расчетного выбран шпунт Л5, с учетом момента сопротивления шпунта $2962\text{cm}^3/\text{м}$, и моментом инерции $50943\text{ cm}^3/\text{м}$. Длина шпунта 18м с глубиной заделки в принятые за несущие грунты основания на 1,5 м.

Были построены эпюры сил активного и пассивного давления на шпунтовое ограждение, определены главные векторы сил и значения моментов активного давления на грунт $M_A = 290\text{kH}\cdot\text{м}$ и пассивного отпора $M_p = 346,5\text{kH}\cdot\text{м}$ относительно предполагаемой точки вращения, точки «О», и коэффициентом устойчивости $M_{sf} = 1,195$. Также проверили аналитически полученные данные в ПК PLAXIS 2D [17;18], разница аналитического и программного расчета коэффициента устойчивости составила 0,004, что возможно из-за принимаемых допущений.

Произведена проверка сечение шпунта по несущей способности. При максимальном значении изгибающего момента $50,16 \text{ kNm/m}$ (рис.7), требуемое значение момента сопротивления определяется как $W_{mp} = 1967 \text{ cm}^3/\text{м}$, при принятом значении расчетного сопротивления стали: $R_{st} = 255\text{МПа} = 25,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$.

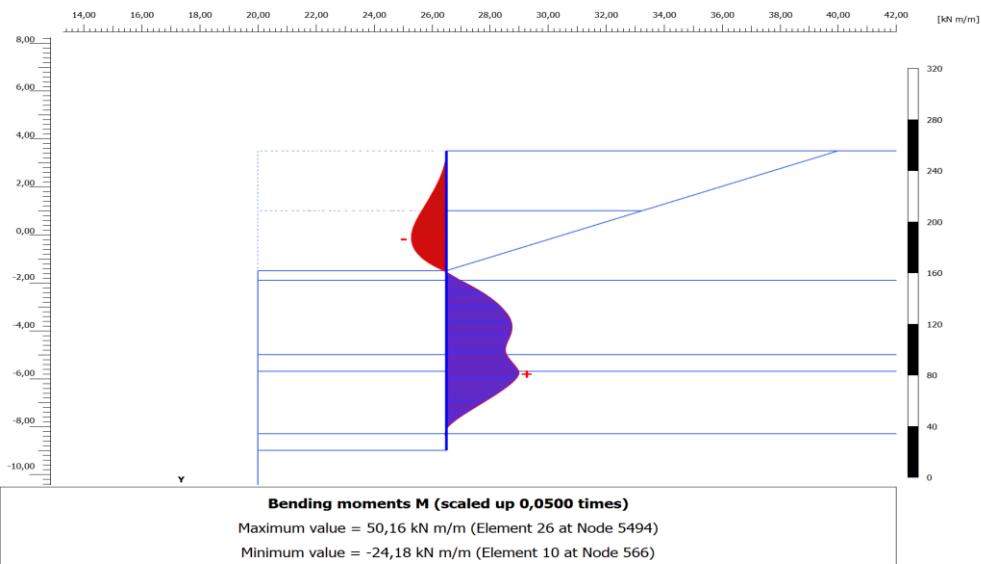


Рисунок 7 -. Изгибающие моменты в шпунтовом ограждении (выполнено в PLAXIS 2D). Расчетный максимальный показатель $50,16 \text{ kNm/m}$

При погонном моменте сопротивления шпунтового ограждения Ларсен Л5, равного $2000 \text{ cm}^3/\text{м} < 1967 \text{ cm}^3/\text{м}$, условие выполняется, следовательно прочность ограждения по материалу шпунта обеспечена.

Выполнен аналитический расчёт несущей способности свай вдавливания [19] с применением ПК MathCad.

Таблица 1 – Входные данные грунта для расчёта осадки условного фундамента

№	Мощно сти слоев, м	J, гра д	Техног е-ний	Песчан ый пылевая ты	Пылев ато- глинист ый	Показат ель текущест и	с, кПа	p, т/м ³	Коэф. пор е	E, кПа
1,2	5,4	34	1				1	1,92	0,65	27000
2,1	3,1	31		1			6	1,99	0,55	38000
2,2	2,6	27		1			4	1,92	0,65	15000
2,1	5,6	31			1	1,24	6	1,99	0,55	38000
3	2	9			1	1,07	9	1,86	0,97	6000
4,1	1,6	6			1	1,08	11	1,76	1,1	5000
5	3,3	11			1	0,91	17	1,9	1,2	7000
6	7	16			1	0,35	16	2,13	0,88	15500
10	9,1	24			1	0,14	29	2,14	0,47	25000
11	3,6	15			1	-0,31	88	2,1	0,56	18500
12	4,5	18			1	-0,5	102	2,15	0,48	25000

В рассматриваемом варианте предполагается устройство $n = 1004$ свай, с уменьшением шага на периметре стенок, что в пересчёте на площадь фундамента можно представить как свайное поле с шагом $a=1,415\text{м}$

Произведен расчет осадки условного фундамента, на основании принятой расчетной схемы с учетом входных параметров(табл.2), при числе слоев до 12, отметке уровня грунтовых вод WL-2,6м и отметке водоупора UWL-11,8.

Таблица 2 – Входные параметры расчётной схемы

$\gamma_{c1} = 1,2; \gamma_{c2} = 1,1; k=1; Su=150$	Предельная осадка фундамента, м
b=50	Ширина подошвы фундамента(стилобата), м
l=50	Длина подошвы фундамента(стилобата), м
db=0	Глубина подвала, м
dl ₁ =0,4	Глубина заложения фундамента(стилобата), м
dpile=32,4	Глубина заложения свай, м
$\gamma_{cf}=0$	Расчетное значение удельного веса конструкции пола под подошвой
hcf=0	Толщина пола подвала, м
p=207	Давление по подошве фундамента(стилобата), кПа
drec=0,325	Радиус свай, м
a=1,415	Шаг свай, м

Допустимая максимальная расчётная нагрузка от эксплуатационного загружения на одну сваю в эквивалентном виде составила $F_A=415\text{ кН}$, и для свай под фундаментом стилобата $F_A=466\text{ кН}$ ¹, при отношении длины здания к высоте 1,5. Для наглядного отображения расчётного сопротивления свай по грунту построили эпюры лобового (рис. 8) и бокового (рис. 9) расчётных сопротивлений.

¹ СП 24.13330.2021 Свайные фундаменты:
https://sibgeo.pro/netcat_files/31/21/_24.13330.2021_2.02.03_85_.pdf_dn115357.pdf

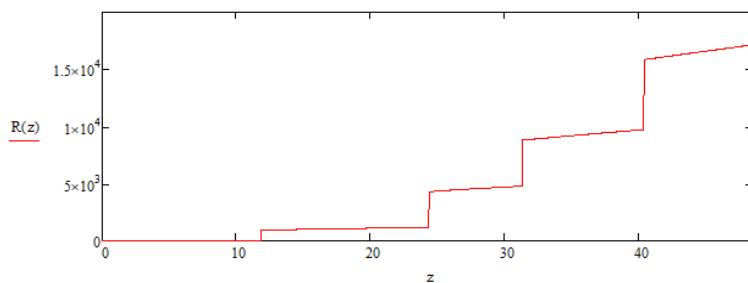


Рисунок 8 – Эпюра лобового расчётного сопротивления сваи до умножения на её площадь поперечного сечения (выполнено в MathCad)

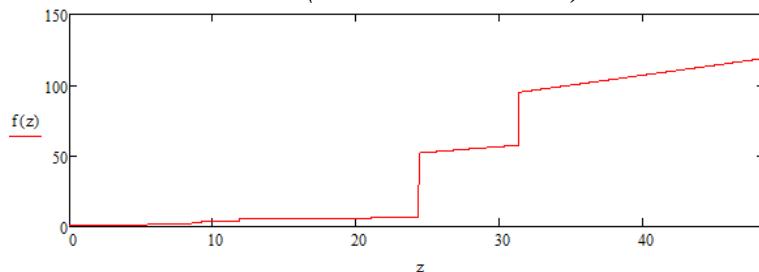


Рисунок 9 – Эпюра бокового расчётного сопротивления сваи до умножения на её периметр (выполнено в MathCad)

Достижение несущей способности согласно проведенным аналитическим расчетам сваи в 770 кН достигается при глубине острия сваи (650мм), равного 30 м, однако, при увеличении длины сваи на 2 м значение несущей способности должно значительно увеличиться, по этому, рассмотрим сваю длиной 32 м. Были введены геометрические параметры сваи, и определено расчетное значение несущей способности сваи по предполагаемому грунту в MathCad — расчётное сопротивление составило $R=49,977$ кПа, оно значительно меньше допустимой максимальной расчетной нагрузки (415 кПа), следовательно допустимо определение осадки условного фундамента методом послойного суммирования. Глубина сжимаемой толщи составляет $H_c = 41.4$ м от острия свай (рис. 10).



Рисунок 10 – Эпюра распределения напряжений по глубине сжимаемой толщи (выполнено в MathCad)

В процессе расчета в MathCad были получены следующие результаты: осадка условного фундамента составляет $S_{ef}=60,452$, а дополнительная осадка условного фундамента за счет продавливания свай на уровне подошвы фундамента $\Delta S_p=6,934$; осадка за счёт сжатия ствола сваи $\Delta S_c=3,449$, с учетом заданного шага свай свайного поля, находящегося в пределах данной условной сваи; суммарная осадка свайного фундамента: $s = s_{ef} + \Delta S_p + \Delta S_c = 70,836(1)$

где s_{ef} — осадка условного свайного фундамента; ΔS_p — разница в возможной дополнительной осадке за счет продавливания свай на уровне подошвы условного фундамента; ΔS_c —

получаемая разница дополнительной осадки за счет сжатия стволов свай.

Значение осадки условного фундамента, полученное аналитическим расчётом метода послойного суммирования (70.8 мм) и в ПК PLAXIS 3D (73.4 мм – средняя осадка днища) отличаются в 2.6 мм или на 3.7 % в относительных величинах, что может быть обосновано допущениями аналитического расчёта послойного суммирования, исключающими, например, консолидацию грунта основания.

Расчетные усилия, возникающие в сваях, не превышают 110 т. Принимаем монолитную плиту стилобата 800 мм, с утолщениями под стойки колонны до 1000 мм.

4. Заключение

В статье рассмотрены и предложены комплексные научно-технические подходы к восстановлению средневекового замка Инстербург, сочетающие традиционные принципы реставрации с современными технологиями. Действенным способом спасения руинированных объектов культурного наследия, в последнее время, служит превращение их из собственно руинированных памятников как архитектурно-художественного явления, в объекты культурно-просветительских пространств, в этом случае возможно воспользоваться международным опытом сохранения историко-культурного наследия. Венецианская хартия [20] от 31.05.1964 утверждает, что наслаждения разных эпох, привнесенные в архитектуру памятника, должны быть сохранены, поскольку единство стиля не является целью реставрации. Буквально это звучит так: «воссоздание разрушенного объекта должно рассматриваться в более широком контексте переживания травмы, причиненной катастрофой» [21].

Основные научные результаты исследования:

1. *На основании проведенного обследования и анализа технического состояния замка, разработан архитектурно планировочный вариант реконструкции*, предполагается, что «принцип контраста» позволит интегрировать современное строительство с сохранением уникальных черт архитектурного наследия.

2. *Подтверждена эффективность предлагаемой методики реконструкции*, результатами моделирования и анализа расчетных схем (был проведен комплексный подход к решению задачи реконструкции замка, определена зависимость эффективности реконструкции от выбранных методов, в том числе и усиления (с помощью тяжей, скоб, разгрузочных поясов, хомутов, дополнительных опор), установлена связь между качеством грунтов, устойчивостью замка и выявлены количественные показатели прочности шпунтового ограждения); которые показывают допустимую степень деформаций и позволяют повысить стабильность замка, равномерно перераспределить нагрузки, предотвратить неравномерные осадки замка и окружающих строений сохранив исторические элементы, создать надежную конструкцию, способствующую дальнейшему функционированию замка.

Рассматриваемый вариант имеет следующие **преимущества**: новый фундамент обеспечивает устойчивость всей конструкции и значительно уменьшает возможные осадки, сокращая зону влияния, нежели от принятия решения полного восстановления объекта; купольное покрытие защищает руины от атмосферных осадков, сохраняя аутентичную атмосферу средневекового сооружения; создание просторного внутреннего пространства, практически со свободной планировкой, адаптируемой под различные современные функции, позволяет в кратчайшие сроки реально приспособить объект под общественное пространство, повысив инвестиционную привлекательность. Важно отметить, что подобный метод реконструкции особенно эффективен для объектов с сильно разрушенными конструкциями, где полная реставрация может быть нецелесообразна или экономически невыгодна.

Возможные **проблемы**: необходимость согласования радикального решения с органами охраны памятников и с собственником в лице РПЦ, в том числе о выдаче долгосрочной аренды; высокие финансовые затраты, требующие соучастия в работах государственного и частного участия.

Проведенное исследование демонстрирует комплексный подход к реконструкции объектов культурного наследия, основанный на сочетании инновационных технических решений и традиционных реставрационных методик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Назимов Е.С. Принятие присяги как одна из форм взаимодействия российских военных властей с местным населением Восточной Пруссии в 1758 г //Научно-технический прогресс: информация, технологии, механизм: сборник статей Международной научно-практической конференции. Уфа, 2022. С. 153-157.
2. Назимов Е.С. Первые административные мероприятия в. В. Фермора на занятых русской армией территориях Восточной Пруссии в 1758 г// Advances in Science and Technology: сборник статей XLIV международной научно-практической конференции. Москва, 2022. С. 147-150.
3. Назимов Е.С. Российский институт губернаторства в прусской системе местного управления Восточной Пруссии во время Семилетней войны//Концепции, теория и методика фундаментальных и прикладных научных исследований: сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции. Стерлитамак, 2022. С. 137-140.
4. Первая мировая война, Версальская система и современность//Сборник статей / Том Выпуск 4. Санкт-Петербург, 2017.
5. Нереализованный проект генерал-губернаторства Восточной Пруссии (1914 г)// Калининградские архивы. 2015. № 12. С. 96-116.
6. Бахтин А. П. Замки и укрепления Немецкого ордена в северной части Восточной Пруссии /Калининград, 2005. 208 с.
7. Репа, Д.А. Историческое развитие Инстербурга-Черняховска // В сборнике: Актуальные проблемы архитектуры, градостроительства и дизайна. Материалы Международной научной конференции - 2018. С. 266-269.
8. Енин А.Е., Заплавная А.Э. Функциональный подход в условиях реконструкции планировочных элементов жилой среды городского исторического центра// Строительство и реконструкция. 2023. №4 (108). С. 119-131.
9. Явейн Н.И. Игры разума в дворцовых интерьерах//Вестник Зодчий.21 век.2008 №3(28).с.82-87
10. Pittaluga P. Pioneering urban practices in transition spaces // City Territ Archit. 2020. Vol. 7. Iss. 18.Pp. 1–10. doi:10.1186/s40410-020-00127-6
11. Zukin Sh. Naked City. The Death and Life of Authentic Urban Places (excerpts) // Journal of Economic Sociology. Vol. 19. Iss. 1. 2018. Pp. 62-91. doi:10.17323/1726-3247-2018-1- 62-91
12. «О планах передачи РПЦ объектов культурного наследия» [Электронный ресурс]. URL: : <https://www.yabloko.ru/regnews/Kaliningrad/2010/11/25>
13. Иванов Ю.В. Реконструкция зданий и сооружений: усиление, восстановление, ремонт: учеб. пособие / Ассоциация строительных вузов – М.: АСВ, 2013. – 312 с.
14. Симаков О.А. Применение торкрет-бетона для усиления каменной кладки// Строительство и реконструкция. 2024. №1 (11). С. 99-108.
15. Бедов А.И., Рязанова В.А., Габитов А.И., Салов А.С., Исламгалиева Д.Р. Вариантное проектирование фундаментов промышленных и общественных зданий для различных гидрогеологических условий// Строительство и реконструкция. 2023. №1 (105). С. 104-113
16. Киргинцева С.В. Компьютерный анализ эффективности пакетного перпендикулярного армирования грунтовых оснований плитных фундаментов / Известия Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. № 6 (93). С. 59-63. 2015.
17. Егорова Е.С. Модели грунтов, реализованные в программных комплексах SCAD Office и Plaxis 3D/ Е.С. Егорова, А.В. Иоскевич, В.В. Иоскевич, К.Н. Агишев, В.Ю. Кожевников // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2016. №3 (42). С. 31-60.
18. Ершов А.В. Примеры решения геотезнических задач методом конечных элементов: Задания и указания для расчётных работ, выполняемых с использованием программы «Plaxis 8.2» / А.В. Ершов; СПбГАСУ. – СПб., 2014. – 63 с.
19. Caldentey A.P., Padilla P., Muttoni A., Ruiz M. F. Effect of Load Distribution and Variable Depth on Shear Resistance of Slender Beams without Stirrups // ACI Structural Journal. September-October, 2012. Vol. 109.No. 5. Pp. 595–603.
20. Международная хартия по консервации и реставрации памятников и достопримечательных мест (Венецианская хартия) от 31 мая 1964 года: <https://docs.ctnd.ru/document/901756982>
21. Report of the Decisions adopted during the 40th session of the World Heritage Committee (Istanbul/UNESCO, 2016) [Электронный ресурс]. – URL: <https://whc.unesco.org/en/sessions/40COM> (дата обращения: 01.03.24).

REFERENCES

1. Nazimov E.S. Taking the oath of office as one of the forms of interaction between the Russian military authorities and the local population of East Prussia in 1758. *Scientific and technological progress: information, technologies, mechanism*: collection of articles of the International Scientific and Practical Conference. Ufa, 2022. Pp. 153-157. (rus)
2. Znamov E.S. V. V. Germor's first analytical studies in the territories of Eastern Europe occupied by the Russian army in 1758. *Achievements of Science and technology*: collection of articles of the XLIV International Scientific and Practical Conference. Moscow, 2022. Pp. 147-150. (rus)
3. Nazimov E.S. The Russian Institute of Governorship in the Prussian system of local government of East Prussia during the Seven Years' War. *Concepts, theory and methodology of fundamental and applied scientific research*:

- a collection of articles based on the results of the International Scientific and Practical Conference. Sterlitamak, 2022. Pp. 137-140. (rus)
4. *The First World War, the Versailles system and modernity*: Collection of articles. Vol. 4. St. Petersburg, 2017. (rus)
 5. The unrealized project of the General Government of East Prussia (1914). *Kaliningrad Archives*. 2015;(12):96-116. (rus)
 6. Batin A.P. *Castles and shelters of the Germans in the northern part of Eastern Russia*. Kaliningrad, 2005. 208 p. (rus)
 7. Repa D.A. Historical development of Insterburg-Chernyakhovsk. *Actual problems of architecture, urban planning and design*: Materials of the International Scientific Conference. 2018. Pp. 266-269. (rus)
 8. Enin A.E., Zaplavnaya A.E. Functional approach in the context of reconstruction of planning elements of the residential environment of the urban historical center. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2023;4(108):119-131. (rus)
 9. Yavein N.I. Mind games in palace interiors. *Bulletin of the Architect. 21st century*. 2008;3(28):82-87. (rus)
 10. Pittaluga P. Innovative urban practices in transitional spaces. *Architecture of urban territories*. 2020;7(18):1-10. DOI:10.1186/s40410-020-00127-6
 11. Zukin S. The Naked City. Death and life of authentic urban places (excerpts). *Journal of Economic Sociology*. 2018;19(1):62-91. DOI:10.17323/1726-3247-2018-1-62-91
 12. «I plan to continue working on the cultural heritage project». URL: <https://www.yabloko.ru/regnews/Kaliningrad/2010/11/25> (date of application: 01.03.2024). (rus)
 13. Ivanov Yu.V. *Reconstruction of buildings and structures: reinforcement, restoration, repair*. Moscow: DIA, 2013. 312 p. (rus)
 14. Simakov O.A. The use of shotcrete to strengthen masonry. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2024;1(11):99-108. (rus)
 15. Bedov A.I., Ryazanova V.A., Gabitov A.I., Salov A.S., Islamgalieva D.R. Variant design of foundations of industrial and public buildings for various hydrogeological conditions. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2023;1(105):104-113. (rus)
 16. Kirgintseva S.V. Computer analysis of the effectiveness of batch vertical reinforcement of ground bases of slab foundations. *Izvestiya Gomelskogo gosudarstvennogo universiteta n.a. F. Skoriny*. 2015;6(93):59-63. (rus)
 17. Egorova E.S., Yoskevich A.V., Yoskevich V.V., Agiev K.N., Shulgin V.V., Kozhevnikov [et al.]. Runt models developed in the SCAD Office and Plaxis 3D software package. *State and Law*. 2016;3(42):31-60. (rus)
 18. Yershov A.V. *Geothetic examples of solving problems by the finite element method: Tasks and instructions for computational work performed using the program "Flaxis 8.2"*. St. Petersburg: SPbGASU, 2014. 63 p. (rus)
 19. Caldentei A.P., Padilla P., Muttoni A., Ruiz M.F. The effect of load distribution and variable depth on shear resistance of thin beams without guides. *ACI Structural Journal*. 2012;109(5):595-603.
 20. The International Charter for the Conservation and Restoration of Monuments and Places of Interest (the Venice Charter) of May 31, 1964. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901756982> (date of application: 01.03.2024).
 21. Report on decisions taken during the 40th session of the World Heritage Committee (Istanbul/UNESCO, 2016). URL: <https://whc.unesco.org/en/sessions/40COM> (date of application: 01.03.2024).

Информация об авторах

Розанцева Надежда Владимировна

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», г.Санкт-Петербург, Россия,
кандидат технических наук, доцент кафедры организации строительства,
e-mail: nrozanceva@lanspbgasu.ru

Information about authors

Rozantceva NadezhdaV.

candidate of technical sciences, associate professor of the department of construction organization,
Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia,
e-mail: nrozanceva@lan.spbgasu.ru

Статья поступила в редакцию 19.05.2025
Одобрена после рецензирования 21.07.2025
Принята к публикации 11.09.2025

The article was submitted 19.05.2025
Approved after reviewing 21.08.2025
Accepted for publication 11.09.2025

Т.С. ФЕДОРОВА¹, Н.В. ФЕДОРОВА¹

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

ПРИНЦИПЫ РЕСТАВРАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В КОНЦЕПЦИИ ПАРАДИГМЫ БИОСФЕРНОСОВМЕСТИМЫХ ГОРОДОВ И ПОСЕЛЕНИЙ

Аннотация. . Современные теоретико-методологические модели реставрации объектов архитектурного наследия опираются, как правило, на узкопрофессиональные научные принципы, определяющие историзм, максимальную объективность восстановления оригинального состояния, сохранение аутентичности (подлинности), определение ценности всех периодов жизненного цикла и другие. В статье рассмотрен новый подход к содержанию и принципам создания и практической реализации программ реставрации объектов архитектурного наследия в городской среде, основанный на общей парадигме сохранения и развития социо-техно-биосферы современного города. Показано, что успешное продвижение программ и проектов реновации городской среды, включая объекты реставрации и реконструкции архитектурных памятников, в определяющей степени связано с созданием действенных механизмов их реализации на основе принципиально нового метода – единого градостроительного подхода к организации пространственной городской структуры. В практическом плане, как показано в приведенном примере реконструкции и реставрации памятника конструктивизма 20–30-х годов прошлого века – здания кинотеатра, это позволит решать проблемы реставрации в едином контексте сохранения исторической ценности объектов для будущих поколений, сохранения национальной архитектуры и идентичности, улучшения качества городской среды и человеческого потенциала, используя образовательный аспект в изучении истории и культурного наследия города.

Ключевые слова: парадигма биосферной совместимости, принципы реставрационной деятельности, архитектурное наследие, аутентичность, городская среда, инновации, качество городской среды

T.S. FEDOROVA¹, N.V. FEDOROVA¹

¹ National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation

PRINCIPLES OF RESTORATION ACTIVITY WITHIN THE CONCEPT OF THE BIOSPHERE-COMPATIBLE CITIES AND SETTLEMENTS PARADIGM

Abstract. Contemporary theoretical and methodological models for the restoration of architectural heritage sites are typically based on specialized scientific principles. These principles define historicity, the maximum objectivity in recovering the original state, the preservation of authenticity, the assessment of the value of all stages of the asset's life cycle, among others. This article examines a novel approach to the content and principles for developing and practically implementing architectural heritage restoration programs within an urban context. This approach is founded on the overarching paradigm of conserving and developing the socio-techno-biosphere of the modern city. It is demonstrated that the successful advancement of urban renewal and environmental programs and projects, including the restoration and reconstruction of architectural monuments, is critically dependent on establishing effective implementation mechanisms. These mechanisms are based on a fundamentally new method: a unified urban planning approach to organizing the city's spatial structure. From a practical standpoint, as illustrated by the case study of the reconstruction and restoration of a Constructivist-era cinema building from the 1920s-1930s, this integrated strategy enables addressing restoration challenges within a unified context. This encompasses preserving the historical value of assets for future generations, safeguarding national architectural identity, enhancing the quality of the urban environment and human potential, and leveraging the educational aspect of studying urban history and cultural heritage.

Keywords: biosphere compatibility paradigm, principles of restoration, architectural heritage, authenticity, urban environment, innovations, quality of the urban environment

1. Введение

Традиционными объектами реставрации выступают исторические архитектурные памятники в виде зданий и других объектов недвижимости, относящихся к определённому историческому периоду их постройки, а в качестве предмета исследования определяется анализ и формирование принципов и методов их реставрации [1–3]. При этом уместно заметить, что сведения об объектах реставрации в большинстве случаев представлены фрагментарно в архивных источниках и научных публикациях, а реже, что особенно ценно, как отмечается в статье [2], – на личных впечатлениях от изучения реставрационных практик различных стран. Теоретико-методологические основы реставрации, как правило, строятся на узкопрофессиональных научных принципах, таких как: максимально возможное сохранение историзма и минимальное вмешательство; учёт внешних обстоятельств, влияющих на ход работ [4]; определение ценности всех периодов жизни здания; дифференциация нового и старого [5]; сохранение аутентичности (подлинности) объекта реставрации [6]; принципы адаптивного использования исторических зданий для новых функций [8] и др. При безусловной значимости и важности узкопрофессиональных принципов, используемых при реставрации объектов архитектурного наследия, они не отражают общие подходы к управлению реставрационной деятельностью, которые во многом, если не в главном, определяют возможность практической реализации целевых установок, принимаемых в программах реставрации. В этой связи в данной статье, опираясь на методологию и общие принципы сохранения и развития социо-природо-технической системы города, сформулированные академиком РААСН В.А. Ильичевым [9–11], предложено новое прочтение этих принципов применительно к реставрационной деятельности, а также к реализации программ и схем управления этой деятельностью.

2. Модели и методы

Рассмотрим общие принципы, определяющие механизм научного управления реставрационной деятельностью, которые активно развиваются в последние два-три десятилетия в сфере архитектуры, строительства и эксплуатации объектов недвижимости. В основу этих принципов положен новый подход доктрины градоустройства, базирующийся на осознании единства человека и природы во все исторические периоды жизнедеятельности человека [11]. Тем самым определяются ответные функции города, удовлетворяющие потребности человека, включая сохранение национальной культуры и идентичности, сохранение исторической ценности объектов архитектурных памятников для будущих поколений и улучшение качества городской среды; при этом данным процессам даются количественные оценки.

Сегодня нет недостатка в научном обсуждении проблемы и подходов к реализации задач реставрации на различных форумах и в научных публикациях. Тем не менее анализ исследований, касающихся использования инноваций в этой деятельности, обращает внимание на то, что подавляющее их число направлено на исследования историко-хронологических признаков [12], принципов проверяемости, адаптации исторических социо-природо-технических систем в контексте регуляции и замещения [13] и на архитектурно-строительное образование [14]. Меняется значение профессий «архитектор», «инженер», «градостроитель». Они становятся все более далекими от функционирования в узких рамках какой-либо одной деятельности. Понятия об этих профессиях почти не касаются человека как элемента природы в социо-природо-технической системе, каковым, несомненно, должен стать современный город, сохранение его идентичности в рамках общей парадигмы развития биосферно совместимых или «природоподобных» технологий как будущего мировой экономики [15].

Первым принципом доктрины реставрационной деятельности в социо-природо-технической системе города следует признать осознание единства человека и природы.

Соответственно, целевые установки этой деятельности должны формулироваться как направленные на гармонизацию совокупности природных и искусственных средовых пространств, находящихся в постоянном взаимодействии [13,15]. В этом смысле проблема реконструкции, рассматриваемая через призму пространственного развития территории города как его составляющая, но без учёта «интересов» природы, даже на основе самых передовых технологий, может оказаться губительной для среды и человека и, как показано в [11], должна решаться на основе принципиально иных критерииев и инструментария.

Второй принцип основан на парадигме двойственности и заключается во взаимном влиянии: человек, воздействуя на природные и искусственные средовые пространства с целью сохранения национальной культуры и идентичности, в конечном счёте оказывает влияние и на самого себя. В контексте реставрационной деятельности этот дуализм проявляется в двух направлениях. С одной стороны, это внешнее воздействие, направленное на сохранение исторической среды и природы. С другой — внутреннее, обращённое к человеку и выражющееся в улучшении его здоровья в широком смысле: духовного, физического и социального. Важно подчеркнуть, что состояние этого здоровья не может быть улучшено исключительно за счёт благоустройства придомовых территорий, создания безбарьерной среды или устройства новых тротуаров — то есть мер, которые часто предписываются программами по созданию комфортной городской среды. В рамках предлагаемого подхода восстановление утраченных архитектурных памятников реализуется в комплексе со всеми другими функциями города или поселения, такими как достойное жизнеобеспечение, качественная медицина, образование и социальная защита. Такой комплексный подход, реализованный архитектурными средствами, позволяет сформировать у общества позитивное отношение к наследию.

Принципиальной особенностью доктрины реставрационной деятельности в социо-природо-технической системе города является её количественная оценка. Поэтому третий принцип рассматриваемой парадигмы заключается в поддержании баланса между количеством сохраняемых для жителей исторических объектов (при условии научного иуважительного подхода), качеством городской среды и адаптацией исторических зданий под современные нужды при сохранении их уникальности и связи с биосферой. Нарушением этого баланса можно назвать нередко встречающиеся в реставрационной практике случаи, когда продление жизни объекта и улучшение его функциональности практически полностью исключают восстановление оригинального состояния, а также сохранение исторической, культурной и художественной ценности здания.

Четвёртый принцип определяет состояние нормативной базы в широком смысле слова. Он исходит из того, что при проведении реставрации зачастую приходится искать компромиссные решения между интересами сохранения памятника и нормативными требованиями [16]. При этом существующая нормативно-правовая база пока не отвечает новой парадигме сохранения архитектурного наследия и, в более широком контексте, задачам саморазвития и безопасности городов, общества и государства в сферах экономики, экологии и энергетики как факторов, определяющих «здравье» природы и человека как её части. Ценные здания и сооружения должны сохраняться и реставрироваться с сохранением подлинных конструкций, деталей и позднейших «наслойений» — всем тем, что связывает памятник истории и культуры с искусством и историей эпохи его возникновения. Нормативно-регуляторная база призвана обеспечивать это в полной мере. Соответствующие нормативные документы, в том числе один из основополагающих [17], должны способствовать сохранению и включению памятников культурного наследия в жизнь современного общества. Эта цель может быть достигнута двумя путями: во-первых, благодаря профессиональному выявлению художественной и исторической ценности памятника, и, во-вторых, благодаря наделению его практической функцией — адаптации исторических зданий под современные потребности и стандарты при сохранении оригинального состояния и минимизации воздействия на окружающую среду.

Пятый принцип – это принцип «знания как основа любого развития», в том числе и развития человека через сохранение культурного наследия. Так же, как и осознание главной целевой установки – единства природы и человека, данный принцип определяет методологию достижения целей через научно обоснованные программы решения городских проблем. В рамках этой методологии должны создаваться так называемые платформы и программы развития, которые, в свою очередь, будут включать проекты реставрации и реконструкции исторических зданий и прилегающих территорий со встроенными механизмами реализации, с использованием программно-целевых методов и различных частно-государственных фондов [18]. В настоящее время эффективное управление социо-природо-технической системой города возможно на основе использования наддисциплинарных знаний, включая знания из философии, социологии, психологии, культурологии и ряда других дисциплин [8,19,20].

Шестой принцип основан на использовании традиционных статистических индикаторов в рамках системных подходов к программам развития. Эти индикаторы призваны обеспечить мониторинг реализации реставрационной деятельности в течение периода выполнения конкретной программы. Кроме того, они должны показывать, как изменился человеческий потенциал жителей города, то есть их отношение к сохранению культурного наследия, а также рост осведомлённости об истории благодаря непосредственному взаимодействию с реставрируемыми объектами, которые способствуют улучшению облика городов. К сожалению, до настоящего времени решение о разработке проекта и финансировании реконструкции и реставрации здания кинотеатра не принято, и существует опасность, что, игнорируя мнение жителей города, в проекте будет реализовано высказываемое некоторыми инвесторами намерение сохранить лишь главный фасад кинотеатра, включив его, например, в состав очередного торгового комплекса.

Реализация предыдущих шести принципов создаёт необходимые условия для перехода к седьмому принципу – разработке механизмов матричного управления [18,21] в рамках рассматриваемой парадигмы. Данный принцип охватывает функции реставрационной деятельности. Реализация этого принципа начинается с формирования содержания программы и проекта реставрации. Они должны включать в себя:

1. Научно обоснованный комплекс узкопрофессиональных требований: восстановление оригинального состояния, улучшение функциональности объекта, сохранение его исторической, культурной и художественной ценности.
2. Задачи пространственного развития реконструируемой территории (по образцу рассмотренного проектного предложения), учитывающие нормируемую территориальную доступность объектов для каждого жителя.

Реализация всех этих функций должна быть заложена в структуру градостроительных решений разных уровней: от проекта планировки территории с охраняемыми объектами до проектов территориального развития конкретных микрорайонов, районов и города в целом, с расширенной номенклатурой городских функций.

Например, реализация одной из функций реставрации – функции «знания» в пределах микрорайона – может обеспечиваться не только наличием дошкольных и школьных образовательных учреждений в его границах, но и за счёт включения в образовательную среду средних и высших учебных заведений всего города.

Следующий, восьмой принцип парадигмы реставрационной деятельности, направлен на удовлетворение потребности горожан в общественных контактах в рамках функционирования охраняемого объекта. Реализация этого принципа также способствует созданию дружественной и комфортной среды жизнедеятельности, а также открывает возможности для обучения и повышения осведомлённости об истории и культуре через непосредственное взаимодействие с реставрируемыми зданиями и сооружениями, в том числе в процессе подготовки архитекторов [11,15].

Заключительный, девятый принцип рассматриваемой парадигмы охватывает аспект безопасности. Речь идёт о безопасности всей эко-социотехнической системы города или поселения, включая безопасность, обеспечиваемую архитектурными средствами. При условии выполнения всех сформулированных принципов реставрационной деятельности в рамках общей концепции градоустройства формируется положительный вектор самоподдерживающегося развития урбанизированной территории и сохраняется тройственный баланс между количеством сохраняемых для жителей исторических объектов (при условии научного иуважительного подхода), качеством городской среды и уровнем человеческого потенциала.

В качестве иллюстрации реализации принципа 5 и частичного использования принципов 1–9 можно привести пример проектного предложения по реконструкции кинотеатра «Родина» — объекта культурного наследия федерального значения в городе Орле [6]. Построенный в 1937 году в стиле советского конструктивизма по проекту архитектора Виктора Калмыкова, кинотеатр «Родина» стал ярким примером архитектуры конца 1930-х годов XX века. Однако, как и все объекты этого стиля, он прожил в СССР недолгую, но яркую жизнь — менее двадцати лет. Таких зданий уникального плана было создано по всей стране порядка пятидесяти, и до сегодняшнего дня сохранились лишь единицы, в том числе и кинотеатр в Орле. Архитекторы-конструктивисты искали новые формы и материалы, чтобы воплотить идеи нового социума — свободного и счастливого — и подарить молодой стране прекрасные города. Кинотеатр «Родина» сразу же после введения в эксплуатацию в 1940 году стал значимым объектом культуры на карте Орла (Рисунок 1, а). К сожалению, сегодняшнее состояние этого памятника архитектуры стало хуже (здание не отапливается с 2008 года), чем даже во время Великой Отечественной войны и оккупации города Орла немецкими захватчиками, хотя и в тот период кинотеатр использовался по назначению (Рисунок 1, б, в). Уместно отметить, что ранее на месте кинотеатра с 1759 по 1837 год стояла старая Воззвиженская церковь, а с 1837 по 1937 год — новая Крестовоздвиженская церковь.

a)



б)



в)



Рисунок 1 - Объектом культурного наследия федерального значения - кинотеатр «Родина» в Орле: а- в начале эксплуатации в 1940 году; б- в годы ВОВ; в- в настоящее время

Проблемой реставрации здания кинотеатра общественность и власти города занимаются уже более 20 лет. В 2010 году, после проведения общего собрания РААСН в г. Орле, идея сохранения памятника архитектуры получила поддержку, и профессионалы Академии однозначно высказались в пользу сохранения кинотеатра. Более того, группой архитекторов (Волчек Ю.П., В.Н. Медведев, З.Т. Басария, М.Н. Канунников, О.В. Мединский [8]) было выполнено проектное предложение по реконструкции и реставрации кинотеатра «Родина». Данное предложение отвечало не только всем требованиям восстановления оригинального состояния здания с сохранением его функционального назначения для современного использования, но и высоким стандартам улучшения качества городской среды на прилегающей территории, соответствую всем целевым функциям реконструкции и реставрации с позиций рассматриваемой парадигмы (принципы 1–5). Вдоль Московской улицы — от института строительства и архитектуры Орловского государственного университета им. И.С. Тургенева до детской библиотеки им. М.Н. Пришвина — вокруг кинотеатра предложено сформировать пространство для общения горожан (Рисунок 2, 3).

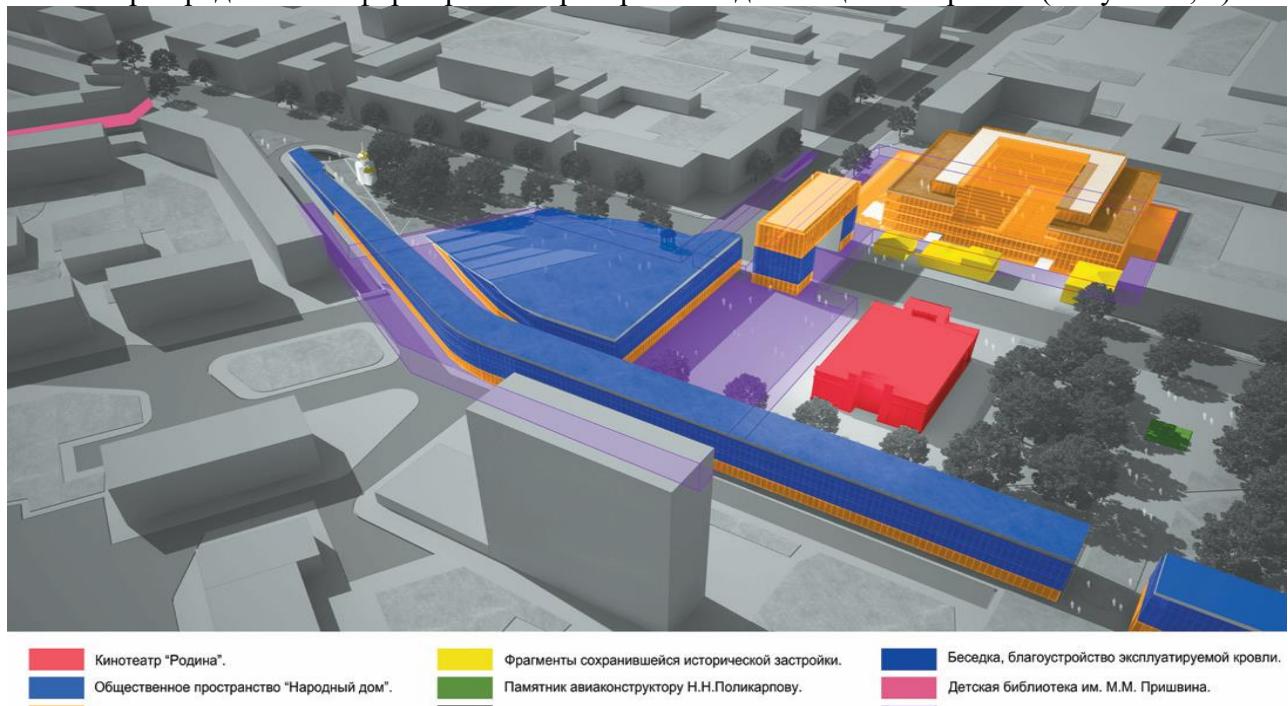


Рисунок 2 - Функциональная схема многофункционального пространства общественного центра общения в Орле Проектная концепция, архитекторы Ю.П. Волчек, В.Н. Медведев, З.Т. Басария, М.Н. Канунников, О.В. Мединский [6-7]

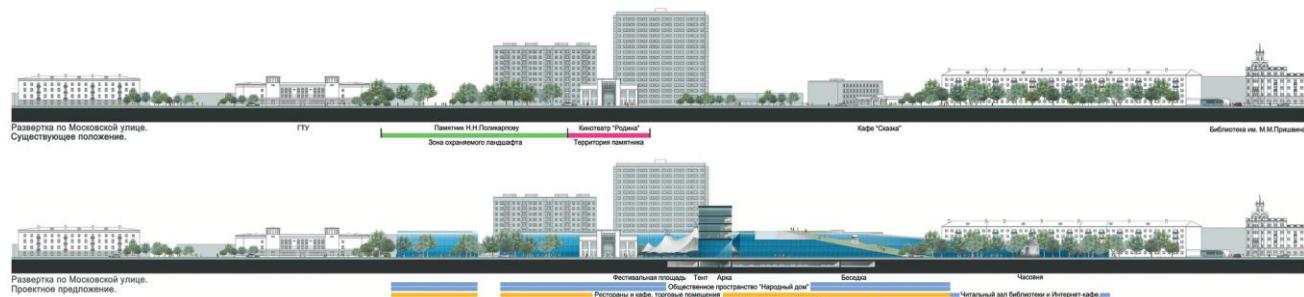


Рисунок 3 - Сопоставлении двух разверток вдоль Московской улицы: сложившегося характера застройки и предлагаемой в проектной концепции [8]

Оно основывается на выявлении историко-культурной значимости этого района как «центра орловской цивилизации» в пространстве города. Предложенная концепция формирования общественного центра – пространства для общения – способна вобрать в себя многообразие структурных элементов, обобщаемых понятием «народный дом», и создать условия для реализации самых разнообразных проявлений креативных потребностей горожан. Народный дом в современной интерпретации – это, несомненно, универсальное городское пространство для общения.

a)



б)



Рисунок 4 - Универсальное пространство между кинотеатром «Родина» и Народным домом: а- вид днем; б- вечерний вид. (Проектная концепция, архитекторы Волчек Ю.П. В.Н. Медведев, З.Т. Басария, М.Н. Канунников, О.В. Мединский [8])

Жители города и любого другого поселения (как будет отмечено ниже в принципе 8 рассматриваемой парадигмы) нуждаются в общении, особенно в настоящее время — век интернета и искусственного интеллекта. Для этого в городе должны быть созданы возможности как физические (залы, клубы и т.п.), так и организационные, для различного рода собраний, встреч по интересам и дискуссий, а также для общественных дел. Формообразование и стилистическое решение вновь возводимых дополнительных объектов в рассматриваемом пространстве общения основывается на современном развитии и прочтении содержания и сути исторических объектов и функций, сложившихся в городе. Использованный в рассматриваемом частном эпизоде приём реставрации состоял в объединении в единое целое весьма разнообразных объектов, расположенных по обе стороны от кинотеатра. Это позволяет организовать современное использование здания кинотеатра, реализуя при этом подлинно уважительное отношение как к памятнику культурного наследия, так и к сохранению истории городской культуры в целом, и несомненно способствует воспитанию позитивного отношения к наследию, реализуемого архитектурными средствами.

В приведённом примере проекта реставрации кинотеатра «Родина» в г. Орле, в рамках предложенной в [6] концепции, сохраняется статус памятника культурного наследия федерального значения и создаётся возможность для формирования уникального пространства. Это пространство предназначено для общения горожан, проведения международных фестивалей и других творческих форумов, что отвечает статусу самобытного, исторически значимого города.

3. Результаты исследования и их анализ

Проведённое исследование позволило разработать целостную концепцию реставрационной деятельности, интегрированную в парадигму биосферосовместимого развития городов. Центральным результатом работы стала систематизация девяти взаимосвязанных принципов, которые расширяют традиционное понимание реставрации, выводя его за рамки сугубо технических и исторических задач. В отличие от традиционных подходов, фокусирующихся на аутентичности и минимальном вмешательстве, предложенная система рассматривает реставрацию объектов архитектурного наследия как ключевой элемент управления сложной социо-природо-технической системой современного города.

Анализ предложенных принципов выявляет их логическую иерархию и системную взаимосвязь. Исходным пунктом становится философское осознание единства человека и природы (Принцип 1), которое определяет целеполагание всей последующей деятельности. Это основание конкретизируется в принципах, направленных на сохранение национальной идентичности и качества городской среды (Принципы 2, 3). Далее система принципов переходит к механизмам реализации, охватывая необходимость адаптации нормативной базы (Принцип 4), роль знаний и платформенных решений (Принцип 5), важность оценки через индикаторы человеческого потенциала (Принцип 6) и необходимость внедрения матричных механизмов управления (Принцип 7). Завершают систему принципы, ориентированные на конечные социальные цели — удовлетворение потребности в общении (Принцип 8) и обеспечение комплексной безопасности городской системы (Принцип 9). Такой подход демонстрирует, что успешная реставрация возможна лишь при синхронном учёте всех уровней — от философско-методологического до конкретно-управленческого.

Важнейшим результатом исследования является обоснование возможности и необходимости количественной оценки эффективности реставрационной деятельности. Предлагается оценивать её не только по степени сохранения материальной субстанции памятника, но и по достижению динамического баланса между количеством сохраняемых исторических объектов, качеством городской среды и уровнем человеческого потенциала. Этот критерий переводит реставрацию из области преимущественно экспертных и подчас субъективных оценок в плоскость измеримых показателей, что значительно повышает обоснованность управленческих решений при реализации крупных городских программ. При этом уместно заметить, что критерии количественной оценки эффективности реставрационной деятельности ещё предстоит разработать.

Практическая значимость и действенность предложенной парадигмы была проиллюстрирована на примере проектной концепции реставрации кинотеатра «Родина» в Орле. Анализ этого примера показал, что предлагаемый подход позволяет преодолеть типичный дисбаланс, когда функциональное обновление объекта достигается ценой утраты его историко-культурной ценности. В рассмотренном проекте реставрация памятника конструктивизма становится не самоцелью, а катализатором позитивных изменений городской среды. Создание вокруг кинотеатра многофункционального общественного пространства, ориентированного на общение и творчество, наглядно демонстрирует реализацию ключевых принципов — от сохранения идентичности до развития человеческого потенциала через архитектурные средства. Таким образом, результаты исследования свидетельствуют о том, что предложенная система принципов создаёт теоретический

фундамент и практический инструментарий для перехода от точечного восстановления памятников к их комплексной интеграции в жизнедеятельность биосферосовместимого города, обеспечивая синергетический эффект для его устойчивого развития.

4. Заключение

1. В рамках парадигмы биосферосовместимого развития городов и поселений предложено новое прочтение содержания, структуры и практической реализации проектов реставрации объектов архитектурного наследия в городской среде, основанное на общих принципах создания и реализации программ развития.

2. Рассмотренные принципы реализации программ реставрации в широком смысле строятся на новой парадигме и новых механизмах самоподдерживающегося развития урбанизированных территорий как «проекции человека на город». В результате появляется возможность количественной оценки реставрационной деятельности на научной основе, что способствует росту числа носителей высокопрофессиональных знаний, создающих высокотехнологичный продукт национальной и культурной идентичности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бирюкова А.П. Механизм привлечения инвестиций для реализации проектов по сохранению объектов культурного наследия // Международный журнал прикладных наук и технологий «Integral». 2022. № 1. С. 7-15.
2. Быстрова Т.Ю. Деградация и реабилитация историко-архитектурного наследия: функционально-типологический подход // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2019. № 3. С. 26-29. DOI: 10.25628/UNIPR.2019.42.3.005.
3. Волчек Ю.П. Кинотеатр «Родина» в городе Орле: пять доводов в пользу его сохранения // Архитектура и строительство России. 2011. № 8. С. 29-37.
4. Горячева А.В. Современные подходы к восстановлению архитектурных памятников после катастроф в Италии // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Т. 1079, № 4. С. 042002. DOI: 10.1088/1757-899X/1079/4/042002.
5. Енин А.Е., Заплавная А.Э. Функциональный подход в условиях реконструкции планировочных элементов жилой среды городского исторического центра // Строительство и реконструкция. 2023. № 4 (108). С. 119-131. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2023-108-4-119-131>.
6. Ильичев В.А., Емельянов С.Г., Колчунов В.И., Бакаева Н.В. Инновационные технологии в строительстве городов. Биосферная совместимость и человеческий потенциалучебное пособие. М.: Издательство ACB, 2019. 208 с.
7. Ильичев В.А., Емельянов С.Г., Колчунов В.И., Гордон В.А., Бакаева Н.В. Принципы преобразования города в биосферосовместимый и развивающий человек: монография. М.: ACB, 2015. 185 с.
8. Ильичев В.А., Колчунов В.И., Бакаева Н.В. Архитектура градоустройства // Научный журнал строительства и архитектуры. 2020. Вып. № 4 (60). С. 121-132. DOI: 10.36622/VSTU.2020.60.4.012.
9. Ильичев В.А., Каримов А.М., Колчунов В.И., Алексашина В.В., Бакаева Н.В., Кобелева С.А. Предложения к проекту доктрины градоустройства и расселения (стратегического планирования – city-planning) // Жилищное строительство. 2012. № 1. С. 2-11.
10. Камалова Г.М., Дауренбекова Т.К. Мировой опыт архитектурной адаптации исторического наследия к новой функции // QazBSQA Хабаршысы. Сәүлет және құрылыш. 2023. № 3 (89). URL: <https://doi.org/10.51488/1680-080X/2023.3-04> (дата обращения: ...).
11. Канбулат И. Принципы реставрации, проектирование и практика / на примере Сафранболу, объекта всемирного наследия ЮНЕСКО // Structural Health Assessment of Timber Structures: материалы междунар. науч. конф. (Стамбул, Турция, 20–22 сентября 2017 г.). Стамбул, 2020. Май.
12. Кимеева Т.И., Юдин М.О. Формирование методики реставрации объектов архитектурного наследия; исторический аспект // Исторические исследования. 2019. № 3. С. 72-79. DOI: 10.25136/2409-868X.2019.3.29308.
13. Курман З. Принципы реставрации: примеры и desiderata (1906) // Future Anterior: Journal of Historic Preservation, History, Theory, and Criticism. 2010. Т. 7, № 2. С. 64–85.
14. Малмыгин И.А., Недотко П.А. Деятельность инновационных фондов // Экономист. 1993. № 4. С. 92-96.
15. Мельникова В.В. Человек и архитектурное пространство: осмысление взаимосвязей в социальных науках и градостроительной практике // Academia. Архитектура и строительство. 2019. № 3. С. 85-89.
16. Перськова М.В., Алексеев Ю.В., Ахмедова Е.А., Метленков Н.В., Шубенков М.В. Архитектурное образование и вызовы современности // Архитектура и строительство России. 2020. № 2 (234). С. 6-13.

17. Романова Л.С., Малевич С.С. Адаптация исторической застройки к современным условиям // Вестник ТГАСУ. 2013. № 4. С. 115-126.
18. Сапрыкина Н.А. Формирование объектов адаптивной архитектуры в контексте кинематической модификации пространства обитания // Architecture and Modern Information Technologies. 2020. № 4 (53). С. 34–56. URL: https://marhi.ru/AMIT/2020/4kvert20/PDF/02_saprykina.pdf (дата обращения: ...). DOI: 10.24411/1998-4839-2020-15302.
19. Сыч Е.Р., Захарчук М.Г. Особенности применения строительных норм и правил при реставрации объекта культурного наследия // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2019. Т. 9. № 2. С. 438–451. DOI: 10.21285/2227-2917-2019-2-438-451.
20. Шубенков М.В. Природоориентированный подход в градостроительстве: аспекты реализации // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2020. № 1 (29). С. 30-41.
21. ГОСТ Р 55528-2013. Состав и содержание научно-проектной документации по сохранению объектов культурного наследия. Памятники истории и культуры. Общие требования. Введ. 2014-07-01. М.: Стандартинформ, 2014. 25 с.

REFERENCES

1. Biryukova, A. P. Mechanism of attracting investments for the implementation of cultural heritage preservation projects. *International Journal of Applied Sciences and Technologies "Integral"*, No. 1, pp. 7-15, 2022. (rus)
2. Bystrova, T. Yu. Degradation and rehabilitation of historical and architectural heritage: A functional-typological approach. *Academic Bulletin of UralNIIproekt RAASN*, No. 3, pp. 26-29, 2019. DOI: 10.25628/UNIIP.2019.42.3.005 (rus)
3. Volchek, Yu. P. The "Rodina" cinema in the city of Orel: Five arguments in favor of its preservation. *Architecture and Construction of Russia*, No. 8, pp. 29-37, 2011. (rus)
4. Goryacheva, A. V. Modern approaches to the restoration of architectural monuments after disasters in Italy. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 1079, No. 4, p. 042002, 2021. DOI: 10.1088/1757-899X/1079/4/042002 (rus)
5. Enin, A. E., & Zaplavnaya, A. E. Functional approach in the reconstruction of planning elements of the residential environment in the urban historical center. *Construction and Reconstruction*, No. 4, pp. 119-131, 2023. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-108-4-119-131 (rus)
6. Ilyichev, V. A., Emelyanov, S. G., Kolchunov, V. I., & Bakaeva, N. V. *Innovative technologies in urban construction. Biospheric compatibility and human potential: textbook*. ASV Publishing House, 2019. (rus)
7. Ilyichev, V. A., Emelyanov, S. G., Kolchunov, V. I., Gordon, V. A., & Bakaeva, N. V. *Principles of city transformation into a biosphere-compatible and human-developing one: monograph*. ASV Publishing House, 2015. (rus)
8. Ilyichev, V. A., Kolchunov, V. I., & Bakaeva, N. V. Architecture of urban development. *Scientific Journal of Construction and Architecture*, Vol. 60, No. 4, pp. 121-132, 2020. DOI: 10.36622/VSTU.2020.60.4.012 (rus)
9. Ilyichev, V. A., Karimov, A. M., Kolchunov, V. I., Aleksashina, V. V., Bakaeva, N. V., & Kobeleva, S. A. Proposals for the draft doctrine of urban planning and settlement (strategic planning - city-planning). *Housing Construction*, No. 1, pp. 2-11, 2012. (rus)
10. Kamalova, G. M., & Daurenbekova, T. K. World experience of architectural adaptation of historical heritage to a new function. *QazBSQA Habarshysy. Saulet Jane qurylys*, No. 3, p. 89, 2023. DOI: 10.51488/1680-080X/2023.3-04
11. Kanbulat, I. Restoration principles, design and practice: A case study from Safranbolu, the UNESCO world heritage. In *Structural Health Assessment of Timber Structures: Proceedings of the International Scientific Conference*, Istanbul, May 2020.
12. Kimeeva, T. I., & Yudin, M. O. Formation of a methodology for the restoration of architectural heritage objects: a historical aspect. *Historical Research*, No. 3, pp. 72-79, 2019. DOI: 10.25136/2409-868X.2019.3.29308 (rus)
13. Curman, S. Principles of restoration: Examples and desiderata (1906). *Future Anterior: Journal of Historic Preservation, History, Theory, and Criticism*, Vol. 7, No. 2, pp. 64–85, 2010.
14. Malmygin, I. A., & Nedotko, P. A. Activities of innovation funds. *Economist*, No. 4, pp. 92-96, 1993. (rus)
15. Melnikova, V. V. Man and architectural space: Understanding interrelationships in social sciences and urban planning practice. *Academia. Architecture and Construction*, No. 3, pp. 85-89, 2019. (rus)
16. Perkova, M. V., Alekseev, Yu. V., Akhmedova, E. A., Metlenkov, N. V., & Shubakov, M. V. Architectural education and the challenges of our time. *Architecture and Construction of Russia*, No. 2, pp. 6-13, 2020. (rus)
17. Romanova, L. S., & Malevich, S. S. Adaptation of historical buildings to modern conditions. *Bulletin of TGASU*, No. 4, pp. 115-126, 2013. (rus)

18. Saprykina, N. A. Formation of adaptive architecture objects in the context of kinematic modification of the living space. *Architecture and Modern Information Technologies*, No. 4, pp. 34–56, 2020. DOI: 10.24411/1998-4839-2020-15302 (rus)
19. Sych, E. R., & Zakharchuk, M. G. Features of the application of building codes and regulations in the restoration of cultural heritage objects. *News of Universities. Investments. Construction. Real Estate*, Vol. 9, No. 2, pp. 438–451, 2019. DOI: 10.21285/2227-2917-2019-2-438-451 (rus)
20. Shubenkov, M. V. Nature-oriented approach in urban planning: Aspects of implementation. *Biospheric Compatibility: Man, Region, Technologies*, No. 1, pp. 30-41, 2020. (rus)
21. GOST R 55528-2013. *Composition and content of scientific and project documentation for the preservation of cultural heritage objects. Historical and cultural monuments. General requirements*. Standartinform, 2014.

Информация об авторах:

Таисия Сергеевна Федорова

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,
студент института ИАГ
E-mail: fedorovats@mgsu.ru

Наталья Витальевна Федорова

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,
профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Промышленное и гражданское строительство»
E-mail: fedorovanv@mfmgsu.ru

Information about authors:

Fedorova Taisiia S.

National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Moscow, Russia,
Student of the Institute of Architecture and Urban Planning,
E-mail: fedorovats@mgsu.ru

Fedorova Nataliia V.

National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Moscow, Russia,
Professor, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Department of Industrial and Civil Engineering.
E-mail: fedorovanv@mfmgsu.ru

Статья поступила в редакцию 10.09.2025
Одобрена после рецензирования 01.10.2025
Принята к публикации 10.10.2025

The article was submitted 10.09.2025
Approved after reviewing 01.10.2025
Accepted for publication 10.10.2025

А.М. АБДУЛЛАЕВ¹, С.-А.Ю. МУРТАЗАЕВ^{1,2}, М.А.-В. АБДУЛЛАЕВ¹, М.С. САЙДУМОВ²,
Р.М. АБДУЛЛАЕВ¹

¹ Комплексный научно-исследовательский институт им. Х. И. Ибрагимова Российской академии наук, Грозный, Россия

²Грозненский государственный нефтяной технический университет им. акад. М.Д. Миллионщикова, Грозный, Россия

ВЛИЯНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ ДОБАВКИ НА ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ ВОДЫ И ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ

Аннотация. Обоснована актуальность разработки композиционных строительных материалов на основе природного бентонита месторождений Чеченской Республики. Установлена наноразмерность модификатора на основе бентонитового порошка месторождения Чеченской Республики, в комплексе с гиперпластификатором *Frem Giper S-TB*, посредством применения современных технологий и оборудования. Цель работы - изучение роли поверхностного натяжения бентонитовых суспензий отдельно и в комплексе с гиперпластификатором *Frem Giper S-TB* на прочность и плотность цементного камня, а также их взаимозависимости. В качестве материалов использовались гиперпластификатор *Frem Giper S-TB* (страна производитель Республика Беларусь) и природный бентонит, добываемый в Чеченской Республике. Для проведения экспериментальных исследований в качестве основного вяжущего применялся портландцемент АО «Чеченцемент» ЦEM I 42,5 Н. Показано снижение водоцементного отношения (В/Ц) до 24%, посредством снижения значений поверхностного натяжения воды затворения, использованием комплексного наномодификатора на основе природного сырья. Использование комплексного наномодификатора показало значительное снижение поверхностного натяжения с определением минимума при концентрациях 2-4% от массы воды. Достигнуты минимальные значения поверхностного натяжения воды равные 40-41 мН/м. Установлено, что прочность образца при совместном введении добавок *Frem Giper S-TB* 0,4% и 0,4% бентонитового порошка, по сравнению с контрольным образцом, увеличивается на 22%. Дальнейшее увеличение концентрации бентонита и гиперпластификатора отрицательно влияет на прочностные характеристики цементного камня, что является результатом чрезмерного диспергирования цемента в процессе замешивания модифицированной водой с низким поверхностным натяжением и снижения плотности цементного теста раздвижкой зерен цемента образующими мицеллами с гиперпластификатором *Frem Giper S-TB*.

Ключевые слова: комплексный наномодификатор, поверхностное натяжение, цементный камень, плотность, прочность, экология, мицеллы.

ABDULLAEV A.M.¹, MURTAZAEV S.-A.YU.^{1,2}, ABDULLAEV M.A.-V.¹, SAIDUMOV M.S.²,
ABDULLAEV R.M.¹

¹Integrated Research Institute named after Kh.I. Ibragimov of the Russian Academy of Sciences, Grozny, Russia

²Millionshchikov Grozny State Oil Technical University, Grozny, Russia

POROUS FILLER BASED ON METALLURGICAL SLAG AND LIQUID-GLASS COMPOSITION

Abstract. The relevance of developing composite construction materials based on natural bentonite from deposits in the Chechen Republic is substantiated. The nanoscale size of the modifier based on bentonite powder from the Chechen Republic deposit, in combination with the hyperplasticizer *Frem Giper S-TB*, was confirmed using modern technologies and equipment. The objective of this work is to investigate the role of the surface tension of bentonite suspensions, both individually and in combination with the hyperplasticizer *Frem Giper S-TB*, on the strength and density of cement stone, as

well as their interdependence. The materials used were the hyperplasticizer *Frem Giper S-TB* (manufactured in the Republic of Belarus) and natural bentonite extracted in the Chechen Republic. For the experimental research, Portland cement CEM I 42.5 N produced by JSC «Chechencement» was used as the primary binder. A reduction in the water-cement ratio (W/C) by up to 24% was demonstrated. This was achieved by lowering the surface tension of the mixing water through the use of a complex nanomodifier based on natural raw materials. The use of this complex nanomodifier showed a significant reduction in surface tension, with a minimum identified at concentrations of 2-4% by mass of water.

Minimum surface tension values of 40-41 mN/m were reached. It was established that the strength of the sample with the combined introduction of 0.4% *Frem Giper S-TB* and 0.4% bentonite powder increased by 22% compared to the control sample. A further increase in the concentration of both bentonite and the hyperplasticizer adversely affects the strength characteristics of the cement stone. This is a result of excessive dispersion of cement during the mixing process with modified low-surface-tension water, and a decrease in the density of the cement paste due to the separation of cement grains by the formed micelles of the *Frem Giper S-TB* hyperplasticizer.

Keywords: complex nanomodifier, surface tension, cement stone, density, strength, environmental impact, micelles.

1. Введение

Для достижения однородной структуры и оптимальной плотности бетонов используются различные пластифицирующие добавки, снижающие значение В/Ц, а в частности и показатели поверхностного натяжения воды, цемента, а также других компонентов образуемой системы, что приводит к ее диспергированию в бетонной смеси [1-3]. Однако, как с экономической, так и экологической точки зрения представляет интерес исследование возможности использования дешевых местных природных материалов и модификаторов синтетического происхождения, в качестве наноструктурированных добавок в бетон [4-7].

Поскольку, наноструктурированные добавки являются системами с высокоразвитой поверхностью, очевидна ведущая роль межфазных явлений в процессах формирования их свойств и взаимодействия с цементной матрицей. Основной трудностью в процессе использования наноматериалов является способ введения тонкодисперсного компонента в объем цементной матрицы и равномерность его распределения: именно однородное распределение частиц добавки в цементном композите способствует повышению физико-механических характеристик, интенсифицирует гидратацию минералов цементного клинкера, приводит к получению более прочной и плотной структуры цементного камня [8]. В настоящей работе, авторами предлагается распределение нанодисперсной добавки в воде затворения, с учетом самопроизвольного диспергирования, для более полного распределения по всему объему. Кроме того, известно [9], что процессы диспергирования в водных суспензиях бентонитов, являющейся гидрофильной системой, протекают самопроизвольно.

Сущность самопроизвольного диспергирования заключается в стремлении дисперсной фазы к равномерному распределению по объему системы (как и распределение растворенного вещества в истинных растворах), в которых в процессе самопроизвольного диспергирования способны возникать наноразмерные частицы. Эти частицы могут иметь размеры от нескольких десятков до нескольких сотен нм шириной и длиной, и от 1 до 1,5 нм толщиной [10,11]. Такие частицы могут участвовать в тепловом движении, накапливаться на границе раздела фаз, влиять на величину поверхностного натяжения. Согласно [2,10-12], совместное использование ограниченно растворимых поверхностно-активных веществ в жидких средах должно понизить поверхностное натяжение. Само присутствие наноразмерных частиц определяет характер взаимодействия между суспензией и цементной основой в бетонной смеси, являясь слабыми концентраторами напряжений, вызывающего уплотнение и упрочнение материала [13-16]. В работах [3,17,18] отмечается, что снижение поверхностного натяжения на межфазных границах приводит дисперсионную систему к повышению активности, происходит сглаживание поверхности и уплотнение структуры данной системы.

Целью настоящей работы является изучение роли поверхностного натяжения бентонитовых суспензий отдельно и в комплексе с гиперпластификатором Frem Giper S-TB на прочность и плотность цементного камня, а также их взаимозависимости.

2. Модели и методы

В представленной работе использованы следующие материалы: гиперпластификатор Frem Giper S-TB страна производитель Республика Беларусь; природный бентонит месторождения Чеченской Республики [11]. Для проведения экспериментальных исследований в качестве основного вяжущего применялся портландцемент АО «Чеченцемент» ЦЕМ I 42,5 Н, основные свойства используемого цемента приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные свойства цемента

Завод изготовитель и марка	Удельная поверхность м ² /кг	ИГ, %	Плотность, кг/м ³	Сроки схватывания, час-мин.		Активность, Мпа, 28 сут	
				начало	конец	сжатие	изгиб
Чеченцемент ЦЕМ I42,5Н	330	25	3100	2-15	3-40	52,6	6,2

Для измерения поверхностного натяжения, на электронных весах измеряли количество воды и бентонитового порошка. Контролируя на весах, в воду затворения микропипеткой DV 100 добавляли гиперпластификатор Frem Giper S-TB, и тщательно перемешивали на магнитной мешалке ПЭ-6110 в течение 1 мин. Бентонитовую суспензию готовили следующим образом: взвешивали 120г воды, количество бентонита определяли по расчету концентрации компонентов (от 1 до 6%), и тщательно перемешивали на магнитной мешалке ПЭ-6110 в течение 1 мин. Полученную суспензию подвергали ультразвуковому воздействию на установке ИЛ100-6/2 в течение 10 сек. Измерения поверхностного натяжения проводили методом висящей капли на тензиометре DSA100 фирмы «Kruss» Германия [11]. Погрешность измерения поверхностного натяжения – менее 1%. На полученной воде готовили цементное тесто нормальной густоты по шесть замесов для каждой серии образцов. При этом содержание бентонита в воде увеличивалось с шагом 0,2% масс от цемента. Составы цементного теста и воды подбирались для каждого компонента отдельно, а для их комплексного использования по аналогии. Нормальную густоту цементного теста определяли по ГОСТ 310.3-76 «Цементы. Методы определения нормальной густоты и сроков схватывания». Плотность цементного камня определяли гидростатическим взвешиванием по ГОСТ 12730.1-2002 Бетоны. Методы определения плотности.

Образцы для получения цементного камня изготавливали в стандартных металлических формах-кубах размером ребра 20 мм. Изготовленные образцы извлекали из форм и до испытания на прочность хранили при нормальных условиях, в течение 28 суток. Предел прочности цементного камня при сжатии определяли механическим разрушающим способом на испытательной машине FS150AT.

3. Результаты исследования и их анализ

Известно, что природные бентониты состоят из частиц твердой фазы размерами 100-1000 нм, а для наноструктурированной добавки в бетоны необходимы частицы размерами порядка 10 – 150 нм. Поэтому, с целью диспергирования, исследуемые образцы водных суспензий бентонита были подвергнуты ультразвуковому воздействию в течение 10 – 15 сек (частота 19,5 кГц, амплитуда переменного звукового давления 6 атм, амплитуда колебаний

частиц 2,42 мкм, амплитуда ускорения частиц $3,6 \times 10^4$ м/с²). Проведенные исследования показали, что ультразвуковое воздействие приводит к повышению коэффициентов устойчивости коагуляционной структуры в 1,2 — 1,5 раза, то есть, идет пептизация супензии, свидетельствующее о влиянии ультразвука на структурно-механические показатели бентонита.

Измерения поверхностного натяжения образцов супензии бентонитов отдельно и в комплексе с гиперпластификатором Frem Giper S-TB проводились при температуре 293К. Полученные результаты представлены на рисунке 1.

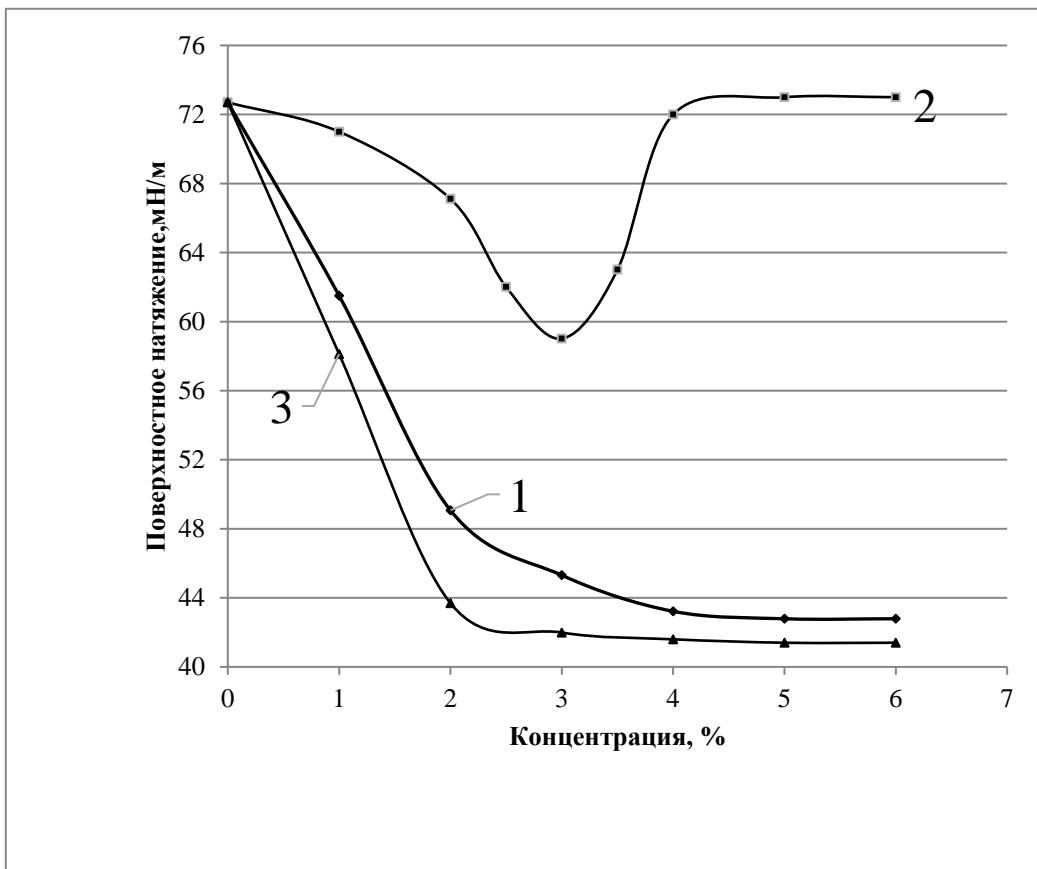


Рисунок 1 – Изотермы поверхностного натяжения:

1-Frem Giper S-TB в воде; 2-бентонитовой супензии в воде; 3-бентонитовой супензии в комплексе с Frem Giper S-TB в воде

Как показали исследования, на изотермах поверхностного натяжения при концентрации 3% масс наблюдается экстремум (изотерма 2). Монотонное снижение поверхностного натяжения до 3% массы твердой фазы позволяет сделать предположение о максимальном накоплении частиц бентонита коллоидных размеров в межфазном слое - левая часть изотермы 2. Изотерма 3 показывает, что при комплексном использовании Frem Giper S-TB с бентонитовым порошком поверхностное натяжение снижается с увеличением концентрации гиперпластификатора и бентонита интенсивнее, чем при отдельном использовании Frem Giper S-TB в воде (изотерма 1) и достигает своего минимума при концентрации 2 % масс бентонита и Frem Giper S-TB в воде. При начальной концентрации до 2% твердой фазы в супензии бентонита наблюдается снижение величины поверхностного натяжения на 10-12 мН/м, что подтверждает эффективность высокодисперсного бентонита. Появление горизонтального участка в изотермах 1 и 3, при увеличении концентрации гиперпластификатора Frem Giper S-TB и бентонита, можно предположить результатом объединения их молекул в ассоциаты в виде мицелл.

С целью изучения влияния наноразмерных добавок бентонита и бентонита в комплексе с ПАВ, при изменении значений поверхностного натяжения воды затворения, на физико-

механические свойства цементного камня были изучены их прочностные свойства (см. таблица 2).

Таблица 2 – Свойства цементного камня, полученного с использованием наноструктурированных компонентов и гиперпластификатора

Расход цемента, г	FremGiper S-TB, % мас. от цемента	Концентрация бентонитового порошка, % мас. от цемента	Поверхностное натяжение МН/м	Нормальная густота (НГ), %	Плотность цементного камня, г/см ³	Прочность на сжатие, МПа
1	2	3	4	5	6	7
1 500	-	-	72,7	23,25	2,18	112,5
2 500	-	0,2	71,0	23,25	2,204	117,4
3 500	-	0,4	67,1	23,25	2,2	121,9
4 500	-	0,6	62	24,2	2,16	120,5
5 500	-	0,8	60,1	25,3	2,16	114,3
6 500	-	1,0	72	26,8	2,11	114,8
7 500	0,2	-	63,1	21,2	2,28	122,4
8 500	0,4	-	49,1	19,6	2,32	127,6
9 500	0,6	-	45,3	18,4	2,32	132,9
10 500	0,8	-	42,79	18,25	2,32	131,3
11 500	1,0	-	42,75	18,25	2,32	130,2
12 500	0,2	0,2	56,7	18,5	2,35	133,6
13 500	0,4	0,4	43,1	17,6	2,35	137,2
14 500	0,6	0,6	41,6	17,75	2,35	136,8
15 500	0,8	0,8	41,4	17,8	2,35	132,1
16 500	1,0	1,0	41,4	17,8	2,34	128,2

В результате введения порошкообразного природного бентонита (см. таблица 2), прочность на сжатие исследуемых образцов значительно отличается от контрольных (состав 1). Прочность образца, при совместном введении добавок Frem Giper S-TB 0,4% и 0,4% бентонитового порошка, по сравнению с контрольным образцом увеличивается на 22%. Очевидно, это связано со значительным увеличением плотности такого образца от 2,18 г/см³ у контрольного до 2,35 г/см³ при модифицировании комплексной добавкой. Максимальное значение плотности и прочности исследуемых образцов цементного камня достигается в диапазоне концентрации бентонита 2,28 - 3,38 % в воде затворения.

Для более глубокого анализа, данные по прочности при сжатии и плотности цементного камня, в зависимости от концентрации бентонита в составе комплексной добавки (см. таблица 2) и результаты определения поверхностного натяжения суспензии бентонита представлены на рисунке 2.

Пример расчета концентрации комплексной добавки бентонита и Frem Giper S-TB в воде затворения цементного теста нормальной густоты для 13 строки из таблицы 2: $((0,4+0,4)*100\%)/17,6=4,545\text{г}$.

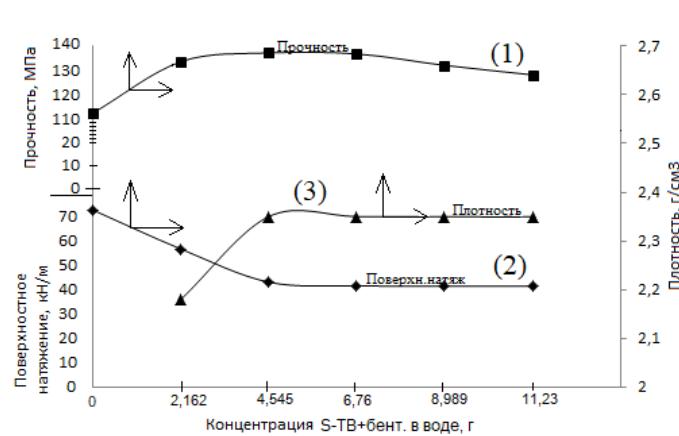


Рисунок 2 – Зависимость поверхностного натяжения воды затворения, плотности и прочности на сжатие цементного камня от концентрации твердой фазы бентонита:
(1) – зависимость прочности на сжатие цементного камня от концентрации бентонита в составе комплексной добавки; (2) – зависимость поверхностного натяжения от концентрации бентонита в суспензии; (3) – зависимость изменения плотности цементного камня (из цементного теста нормальной густоты) от концентрации бентонита в составе комплексной добавки

По изотерме 2 поверхностного натяжения видно наступление ККМ (критической концентрации мицеллообразования) при содержании в воде затворения цементного теста нормальной густоты комплексной добавки бентонит+Frem Giper S-TB 4,545г в 100г воды. Дальнейшее увеличение концентрации этой добавки в воде затворения цементного теста отрицательно влияет на прочность и плотность цементного камня, о чем свидетельствуют приведенные выше графики (рис.2).

Приведенные графики указывают на взаимосвязь между величиной поверхностного натяжения воды в присутствии комплексной добавки (бентонит- Frem Giper S-TB) а также прочностью на сжатие и плотностью цементного камня, изготовленного с применением той же добавки.

Нормальная густота цементного теста при введении бентонитового порошка изменяется незначительно. Однако, при комплексном использовании бентонита с Frem Giper S-TB это значение отличается от контрольного на 24%. Прочность образцов, изготовленных с использованием в качестве добавки бентонитового порошка, превышает значения контрольного на 8,4%. Очевидно, это связано с изменением значений поверхностного натяжения при комплексном использовании гиперпластификатора и бентонитовой глины, где оно снижается эффективнее, чем при использовании каждого из этих добавок по отдельности. Это приводит к выполнению условий устойчивости граничных пленок жидкой фазы [19] при ее утончении согласно формуле 1:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial h} < -\frac{m\sigma}{(r+h)^2} \quad (1)$$

где $m=2$ - площадь сечения сферы (для выпуклых сферических частиц); σ – поверхностное натяжение воды; r - радиус частиц; h - толщина пленки жидкости; Π - расклинивающее давление

Из этого следует, что снижение поверхностного натяжения от 72,7 мН/м до 42 мН/м, при комплексном использовании Frem Giper S-TB и наночастиц бентонитового порошка, позволяет уменьшить толщину пленки на выпуклых поверхностях частиц с сохранением устойчивости этой пленки. Это позволяет фиксировать частицы дисперсной фазы в дисперсионной среде на близких расстояниях (h). Дальнейшее увеличение концентрации обоих составляющих отрицательно влияет на прочностные характеристики цементного камня, что, по предположению авторов настоящей работы, является результатом чрезмерного диспергирования цемента в процессе замешивания модифицированной водой с низким поверхностным натяжением. Появление горизонтального участка в изотермах 1 и 3 (рис.1), при увеличении концентрации гиперпластификатора Frem Giper S-TB и бентонита, а также снижение плотности и прочности (графики 1 и 3) из рис. 2, можно предположить результатом объединения их молекул в ассоциаты в виде мицелл.

4. Заключение

1. Снижение поверхностного натяжения воды затворения посредством применения добавок Frem Giper S-TB и бентонитового порошка, как в комплексе, так и в отдельности, эффективно отражается на механических свойствах цементного камня. Доказано увеличение прочности при сжатии цементного камня при комплексном использовании представленных добавок на 22% по сравнению с контрольным составом.

2. Показано снижение водоцементного отношения до 24% посредством снижения значений поверхностного натяжения воды затворения использованием комплексного наномодификатора на основе природного сырья. Использование комплексного наномодификатора показало значительное снижение поверхностного натяжения с определением минимума при концентрациях 2-4% от массы воды. Достигнуты минимальные значения поверхностного натяжения воды равные 40-41 мН/м.

3. Показана взаимосвязь между поверхностным натяжением бентонитовой суспензии, плотностью и прочностью цементного камня на ее основе. На основании полученных результатов, комплексная добавка на основе нанопорошка бентонита и Frem Giper S-TB может быть рекомендована в качестве модификатора для повышения прочностных свойств цементного камня с наложением ограничений по концентрации.

5. Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова FZNU-2024-0003 "Разработка комплекса низкоуглеродных технологий повышения продуктивности и секвестрационного потенциала экосистемы на урбанизированных территориях с получением вторичных композиционных материалов полифункционального назначения".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ребиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах // Физикохимическая механика. Москва: Наука, 1979. С. 246-250.
2. Данилов В.Е., Айзенштадт А.М., Королев Е.В., Шаманина А.В., Гарамов Г.А. Методические аспекты определения поверхностного натяжения минеральных порошковых систем с использованием компактов //Физика и химия обработки материалов. 2024. № 4. С. 47-64.
3. Данилов В.Е., Королев Е.В., Айзенштадт А.М., Строкова В.В. Особенности расчета свободной энергии поверхности на основе модели межфазного взаимодействия Оунса-Вендта-Рабеля-Кельблэ // Строительные материалы. 2019. № 11. С. 66-72. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-776-11-66-72
4. Абдуллаев Р.М., Абдуллаев А.М., Абдуллаев М.А.В. Нанопорошок и его влияние на физико-механические свойства цементного камня // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2022. № 7 (763). С. 59-67.
5. Korolev E.V., Grishina A.N., Inozemtcev A.S., Ayzenshtadt A.M. Study of the kinetics structure formation of cement dispersed systems. Part II. Nanotechnologies in Construction. 2022; 14(4): 263–273. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-4-263-274>.
6. Жегера К.В., Лавров И.Ю., Трощев Д.В. Оптимизация синтеза наноструктурирующей добавки для применения в рабочей смеси 3D-принтера. Региональная архитектура и строительство. 2024;2(59):60-65. DOI: 10.54734/20722958
7. Жегера К.В., Дасаева Н.А. Разработка состава бетонной смеси с применением наноструктурирующей добавки для 3d-печати малых архитектурных форм. Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2025. Т. 17. № 1. С. 14-22.
8. Козлова И.В., Дударева М.О. Варианты введения тонкодисперсной добавки на основе системы TiO₂-Bi₂O₃ в цементные композиции. Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2024. Т. 16. № 2. С. 90-99.
9. Дадашев Р.Х., Джамбулатов Р.С., Элимханов Д.З., Дадашев И.Н. Методика измерения поверхностного натяжения суспензии бентонитов. Журнал физической химии. 2020. Т. 94. № 7. С. 1114-1118.
10. Абдуллаев М.А.В., Абдуллаев А.М., Абдуллаев Р.М. Высокопрочные мелкозернистые бетоны на основе комплексной нанодобавки. Известия высших учебных заведений. Строительство. 2024. № 6 (786). С. 78-93.
11. Дадашев Р.Х., Межидов В.Х., Джамбулатов Р.С., Элимханов Д.З. О природе особенностей изотерм поверхностного натяжения водных суспензий бентонитов. Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2014. Т. 78. № 4. С. 433.
12. Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы. 1982. 400 с.
13. Панин В.Е., Дерюгин Е.Е., Кульков С.Н. Мезомеханика упрочнения материалов нанодисперсными включениями // Прикладная механика и техническая физика, 2010. №4, сс. 127-142.
14. Старченко С.А., Полуэктова В.А., Шаповалов Н.А., Кожанова Е.П. Получение комплексной органоминеральной добавки на основе флогоглюцинтурфурольного олигомера и наночастиц диоксида кремния. Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2024. Т. 16. № 5. С. 447-462.
15. Пухаренко Ю.В., Аубакирова И.У., Хирхасова В.И. Целлюлоза в бетоне: новое направление развития строительной нанотехнологии // Строительные материалы. 2020. № 7. С. 39-44. -DOI: 10.31659/0585-430X-2020-782-7-39-44
16. Королев Е.В., Гришина А.Н., Данилов А.М., Айзенштадт А.М. Системный анализ эволюции знаний о структурообразовании строительных материалов. Промышленное и гражданское строительство. 2024. № 9. С. 18-27.
17. Смирнов А.Н. Определение изотерм поверхностного натяжения границ зерен на основе адсорбционных измерений // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2005. №5. сс. 93-96.
18. Щукин Е.Д., Перцов А.В., Амелина Е.А. Коллоидная химия. - М.: Издательство Московского университета, 1982. - 348 с.
19. Дерягин Б.В. Теория устойчивости коллоидов и тонких плёнок. М.: Наука, 1986.

REFERENCES

1. Rebinder P.A. Poverhnostnye yavleniya v dispersnyh sistemah [Surface phenomena in dispersed systems] *Physico-chemical mechanics*. Moscow: Nauka Publ., 1979, pp. 246-250 (rus).
2. Danilov V.E., Aisenstadt A.M., Korolev E.V., Shamanina A.V., Garamov G.A. Metodicheskie aspekty opredeleniya poverhnostnogo natyazheniya mineral'nyh poroshkovyh sistem s ispol'zovaniem kompaktov [Methodological aspects of determining the surface tension of mineral powder systems using compacts] *Physics and Chemistry of materials processing*. 2024. No. 4. pp. 47-64 (rus).
3. Danilov V.E., Korolev E.V., Aisenstadt A.M., Strokoval V.V. Osobennosti rascheta svobodnoj energii poverhnosti na osnove modeli mezhfaznogo vzaimodejstviya Ounsa-Vendta-Rabelya-Kel'ble [Features of calculating the free energy of a surface based on the Oons-Wendt-Rabel-Kjellbl interfacial interaction model] *Building materials*. 2019. No. 11. pp. 66-72. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-776-11-66-72 (rus).
4. Abdullaev R.M., Abdullaev A.M., Abdullaev M.A.V. Nanoporoshok i ego vliyanie na fiziko-mekhanicheskie svojstva cementnogo kamnya [Nanopowder and its effect on the physico-mechanical properties of cement stone] *News of higher educational institutions. Construction*. 2022. No. 7 (763). pp. 59-67 (rus).
5. Korolev E.V., Grishina A.N., Inozemtcev A.S., Ayzenshtadt A.M. Study of the kinetics structure formation of cement dispersed systems. Part II. Nanotechnologies in Construction. 2022; 14(4): 263–273. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-4-263-274>.
6. Zhegera K.V., Lavrov I.Yu., Troschnev D.V. Optimizaciya sinteza nanostrukturiruyushchej dobavki dlya primeneniya v rabochej smesi 3D-printera [Optimization of the synthesis of a nanostructuring additive for use in the working mixture of a 3D printer]. *Regional architecture and construction*. 2024; 2(59):60-65. DOI: 10.54734/20722958 (rus).
7. Zhegera K.V., Dasaeva N.A. Razrabotka состава бетонной смеси с применением nanostrukturiрующей добавки для 3d-печати малых архитектурных форм [Development of the composition of a concrete mixture using a nanostructuring additive for 3D printing of small architectural forms] *Nanotechnology in construction: scientific online journal*. 2025. Vol. 17. No. 1. pp. 14-22 (rus).
8. Kozlova I.V., Dudareva M.O. Varianty vvedeniya tonkodispersnoj dobavki na osnove si-stemy TiO₂-Bi₂O₃ v cementnye kompozicii [Options for introducing a finely dispersed additive based on the TiO₂-Bi₂O₃ system into cement compositions] *Nanotechnology in construction: scientific online journal*. 2024. Vol. 16. No. 2. pp. 90-99 (rus).
9. Dadashev R.H., Dzhambulatov R.S., Elimkhanov D.Z., Dadashev I.N. etodika izmereniya poverhnostnogo natyazheniya suspenzii bentonitov [Method of measuring the surface tension of bentonite suspension] *Journal of Physical Chemistry*. 2020. Vol. 94. No. 7. pp. 1114-1118 (rus).
10. Abdullaev M.A.V., Abdullaev A.M., Abdullaev R.M. Vysokoprochnye melkozernistye betony na osnove kompleksnoj nandobavki [High-strength fine-grained concretes based on complex nano-additives] *News of higher educational institutions. Construction*. 2024. No. 6 (786). pp. 78-93 (rus).
11. Dadashev R.Kh., Mezhidov V.Kh., Dzhambulatov R.S., Elimkhanov D.Z. O prirode osobennostej izoterm poverhnostnogo natyazheniya vodnyh suspenzij bentonitov [On the nature of the surface tension isotherms of aqueous bentonite suspensions] *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. The series is physical*. 2014. Vol. 78. No. 4. P. 433. (rus).
12. Frolov Yu.G. Kurs kolloidnoj himii [Course of colloidal chemistry. Surface phenomena and dispersed systems]. 1982. 400 p. (rus).
13. Panin V.E., Deryugin E.E., Kulkov S.N. Mezomechanika uprochneniya materialov nanodispersnymi vkl'yucheniymi [Mesomechanics of hardening materials with nanodisperse inclusions] *Applied Mechanics and Technical Physics*, 2010. No. 4, pp. 127-142. (rus).
14. Starchenko S.A., Poluektova V.A., Shapovalov N.A., Kozhanova E.P. Poluchenie kompleksnoj organomineral'noj dobavki na osnove floroglyucinfurfurol'nogo oligomera i nanochastic dioksida kremniya [Obtaining complex organomineral additives based on phloroglucinifurfural oligomer and silicon dioxide nanoparticles] *Nanotechnology in construction: scientific online journal*. 2024. Vol. 16. No. 5. pp. 447-462. (rus).
15. Pukharenko Yu.V., Aubakirova I.U., Hirkhasova V.I. Cellyuloza v betone: novoe napravlenie razvitiya stroitel'noj nanotekhnologii [Cellulose in concrete: a new direction in the development of construction nanotechnology] *Building materials*. 2020. No. 7. pp. 39-44. -DOI: 10.31659/0585-430X-2020-782-7-39-44(rus).
16. Korolev E.V., Grishina A.N., Danilov A.M., Aisenstadt A.M. Sistemnyj analiz evolyucii znanij o strukturoobrazovanii stroitel'nyh materialov [A systematic analysis of the evolution of knowledge about the structure formation of building materials] *Industrial and civil engineering*. 2024. No. 9. pp. 18-27. (rus).
17. Smirnov A.N. Opredelenie izoterm poverhnostnogo natyazheniya granic zeren na osnove adsorbcionnyh izmerenij [Determination of surface tension isotherms of grain boundaries based on adsorption measurements] *Surface. X-ray, synchrotron and Neutron Research*, 2005. No. 5. pp. 93-96. (rus).
18. Shchukin E.D., Pertsov A.V., Amelina E.A. Kolloidnaya himiya [Colloidal Chemistry]. Moscow: Moscow University Press, 1982. 348 p. (rus).
19. Deryagin B.V. Teoriya ustojchivosti kolloidov i tonkih plynok [Theory of stability of colloids and thin films]. Moscow: Nauka Publ., 1986 (rus).

Информация об авторах

Абдуллаев Абухан Магомедович

Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова Российской академии наук (КНИИ РАН), Грозный, Россия, научный сотрудник,
E-mail: han-100@mail.ru

Муртазаев Сайд-Альви Юсупович

Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова, Грозный, Россия, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Технология строительного производства», E-mail: s.murtazaev@mail.ru

Абдуллаев Магомед Абдул-Вахабович

Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова Российской академии наук (КНИИ РАН), Грозный, Россия, научный сотрудник,
E-mail: mgdaa@mail.ru

Сайдумов Магомед Саламович

Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова, Грозный, Россия, канд. техн. наук, доцент кафедры «Технология строительного производства», E-mail: saidumov_m@mail.ru

Абдуллаев Рамзан Магомедович

Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова Российской академии наук (КНИИ РАН), Грозный, Россия, аспирант,
E-mail: ramzan007abd@mail.ru

Information about authors

Abdullaev Abukhan M.

Integrated Research Institute named after Kh.I. Ibragimov of the Russian Academy of Sciences, Grozny, Russia
Researcher,
E-mail: han-100@mail.ru

Murtazaev Sayd-Alvi Y.

Millionshchikov Grozny State Oil Technical University, Grozny, Russia
Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department "Technology of Construction Production",
E-mail: s.murtazaev@mail.ru

Abdullaev Magomed Abdul-Vakhabovich

Integrated Research Institute named after Kh.I. Ibragimov of the Russian Academy of Sciences, Grozny, Russia
Researcher,
E-mail: mgdaa@mail.ru

Saidumov Magomed S.

Millionshchikov Grozny State Oil Technical University, Grozny, Russia
candidate in tech. sc., docent of the Department of "Technology of Construction Production",
E-mail: saidumov_m@mail.ru

Abdullaev Ramzan M.

Integrated Research Institute named after Kh.I. Ibragimov of the Russian Academy of Sciences, Grozny, Russia
postgraduate student,
E-mail: ramzan007abd@mail.ru

Статья поступила в редакцию 30.08.2025

Одобрена после рецензирования 23.09.2025

Принята к публикации 01.10.2025

The article was submitted 30.08.2025

Approved after reviewing 23.09.2025

Accepted for publication 01.10.2025

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.

Адрес издателя:

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»
302026, Орловская область, г. Орёл, 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. Орёл, ул. Московская, 77.
+79065704999
<http://oreluniver.ru/science/journal/sir>
E-mail: str_and_rek@mail.ru

Право использования произведений предоставлено авторами на основании
п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации

Технический редактор М.А. Амелина
Компьютерная верстка М.А. Амелина

Подписано в печать 18.10.2025 г.
Дата выхода в свет 31.10.2025 г.
Формат 70×108/16. Печ. л. 14,6
Цена свободная. Тираж 500 экз.
Заказ № 247

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