

Главный редактор:

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

Заместители главного редактора:

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

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

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

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

Редакция:

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

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

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

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

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

Емельянов С.Г., чл.-корр. РААСН, д-р техн. наук,
проф. (Россия)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Серпик И.Н., д-р техн. наук, проф. (Россия)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Исполнительный редактор:

Юрова О.В., (Россия)

Адрес редакции:

302030, Орловская обл., г. Орёл,

ул. Московская, д. 77.

Тел.: +79065704999

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

E-mail: str_and_rek@mail.ru

Зарегистрировано в Федеральной службе

по надзору в сфере связи, информационных

технологий и массовых коммуникаций.

Свидетельство: ПИ №ФС 77-67169

от 16 сентября 2016 г.

Подписной индекс **86294**

по объединённому каталогу «Пресса России»

на сайтах www.ppressa-ru.ru и www.akc.ru

© ОГУ имени И.С. Тургенева, 2023

Содержание

Теория инженерных сооружений. Строительные конструкции

- Курнафина С.О., Цацулин И.В.** Особенности деформирования сечений изгибаемых железобетонных элементов при действии нагрузок большой интенсивности 3
- Надольский В.В.** Статистические характеристики погрешности численных моделей несущей способности для стальных элементов 17
- Трошин М.Ю., Турков А.В.** Влияние шага поперечных слоев на деформативность и распределение напряжений в пятислойных плитах древесины перекрестно-клееной 35
- Шапошникова Ю.А., Кузнецов В.С.** Влияние конструктивных и технологических факторов на показатели поперечного армирования железобетонных балок 42

Безопасность зданий и сооружений

- Федоров В.С., Трекин Н.Н., Кодыш Э.Н., Терехов И.А.** Критерии для оценки категории технического состояния железобетонных колонн, ригелей, балок и ферм 58
- Федорова Н.В., Савин С.Ю., Колчунов В.И., Московцева В.С., Амелина М.А.** Конструктивная система быстровозводимого здания из индустриальных панельно-рамных элементов 70

Архитектура и градостроительство

- Бакаева Н.В., Романов Н.А.** Социально-диагностическое исследование проблемы формирования историко-культурных ландшафтов (на примере города Суздаль) 82
- Воличенко О.В., Литягина А.В.** Мультикомфортная среда в архитектуре быстровозводимых зданий 96
- Морозова Л.В., Енин А.Е.** Структура агломераций как онтологическая основа территориального планирования 111
- Шеина С.Г., Федоровская А.А.** Исследование влияния возобновляемых источников энергии на экологический потенциал территории субъекта РФ 122

Строительные материалы и технологии

- Крутских А.В., Петропавловская В.Б., Петропавловский К.С., Новиченкова Т.Б.** Модифицированные цементные бетоны с дискретным армированием 131

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

Editor-in-Chief Assistants:

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

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

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

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

Editorial Board

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

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

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

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

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

Emelyanov S.G., doc. sc. tech., prof. (Russia)

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

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

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

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

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

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

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)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Managing Editor:

Yurova O.V. (Russia)

The edition address:

302030, Oryol region., Oryol,

Moskovskaya Street, 77

+79065704999

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

E-mail: str_and_rek@mail.ru

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

technology and mass communications

The certificate of registration:

ПН №ФС 77-67169 from 16.09.2016 r.

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

© Orel State University, 2023

Contents

Theory of engineering structures.

Building units

- Kurnavina S.O., Tsatsulin I.V.** Features of sections deformation of bend reinforced concrete elements under loads of high intensity..... 3
- Nadolski V.V.** Statistical characteristics of the numerical model uncertainties for steel elements..... 17
- Troshin M.Y., Turkov A.V.** The effect of the step of transverse layers on the deformability and stress distribution in five-layer slabs of clt-panels..... 35
- Shaposhnikova Yu.A., Kuznetsov V.S.** Influence of structural and technological factors on indicators of transversal reinforcement of reinforced concrete beams..... 42

Building and structure safety

- Fedorov V.S., Trekin N.N., Kodysch E.N., Terekhov I.A.** Criteria for assessing the category of technical condition of reinforced concrete columns, crossbars, beams and trusses..... 58
- Fedorova N.V., Savin S.Yu., Kolchunov V.I., Moskovtseva V.S., Amelina M.A.** Building structural system made of industrial frame-panel elements..... 70

Architecture and town-planning

- Bakaeva N.V., Romanov N.A.** Socio-diagnostic research of the problem of the formation of historical and cultural landscapes (on the example of the city of Suzdal)..... 82
- Volichenko O.V., Lityagina A.V.** Multi-comfort environment in the architecture of pre-restructured buildings..... 96
- Morozova L.V., Enin A.E.** Structure of agglomerations as ontological basis of territorial planning..... 111
- Sheina S.G., Fedorovskaya A.A.** Study for the impact of renewable energy sources on the environmental potential of the territory of the russian federal subject..... 122

Construction materials and technologies

- Krutsikh A.V., Petropavlovskaya V.B., Petropavlovskii K.S., Novichenkova T.B.** Modified cement concrete with discrete reinforcement..... 131

С.О. КУРНАВИНА¹, И.В. ЦАЦУЛИН²

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

²ООО «Институт «Мосинжпроект», г. Москва, Россия

ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ СЕЧЕНИЙ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ДЕЙСТВИИ НАГРУЗОК БОЛЬШОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

Аннотация. Многие здания подвергаются особым нагрузкам большой интенсивности. При расчете железобетонных конструкций, как на особые нагрузки аварийного характера, так и на сейсмические воздействия, в них уже на стадии проектирования предполагается развитие пластических деформаций в арматуре. Проведены экспериментальные исследования влияния пластических деформаций арматуры на напряженно-деформированное состояние нормальных сечений изгибаемых железобетонных элементов. По результатам эксперимента установлено, что гипотеза плоских сечений соблюдается не во всех случаях. Более точной является аппроксимация эпюры деформаций по высоте сечения билинейной зависимостью, характер которой меняется в процессе нагружения, т.е. гипотеза билинейных сечений. Определена зависимость коэффициента A гипотезы билинейных сечений от коэффициента пластичности по деформациям арматуры для балок с одиночным и симметричным армированием по результатам численных расчетов в конечно-элементном программном комплексе Abaqus. Проведено сравнение полученных численных результатов с экспериментальными данными, которое показало их удовлетворительную сходимость. Максимальное отклонение не превышает 13 %. Дана оценка влияния коэффициента гипотезы билинейных сечений на величину предельного коэффициента пластичности по кривизне, соответствующего началу разрушения бетона сжатой зоны.

Ключевые слова: пластические деформации, геометрическая гипотеза, особые воздействия.

S.O. KURNAVINA¹, I.V. TSATSULIN²

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

²Mosinzhproekt Institute LLC, Moscow, Russia

FEATURES OF SECTIONS DEFORMATION OF BEND REINFORCED CONCRETE ELEMENTS UNDER LOADS OF HIGH INTENSITY

Abstract. Many buildings are exposed to special effects of high intensity. When calculating reinforced concrete constructions both for special emergency loads and for seismic loads, the development of plastic strains in reinforcement is supposed just at the design stage. The experimental investigation of plastic deformations influence of the stress-strain state of normal sections of bending reinforced concrete elements has been made. According to the results of experiments, it has been found, that the hypothesis of plane sections is not observed in all cases. The approximation of deformations graph along the cross-section height by the bilinear function, variable during the load process, i.e. hypothesis of bilinear sections, is more accurate. The dependence of coefficient A of the hypothesis of bilinear sections on the coefficient of plasticity for reinforcement deformations has been determined based on the results of numerical calculations of beams with symmetric reinforcement and beams without compressed reinforcement in a finite element software package Abaqus. The comparison of obtained numerical results with experimental data has been made, which has shown their satisfactory

convergence. The maximum deviation does not exceed 13 %. The assessment of influence of coefficient of hypothesis of bilinear sections on the limit value of coefficient of plasticity for curvature, corresponding to the beginning of the destruction of compressed area of concrete is given.

Keywords: *plastic strains, geometric hypothesis, special effects.*

Введение

Как показывает практика, многие здания и сооружения могут подвергаться особым воздействиям, вызванным как взрывами ядерных или обычных боеприпасов, если речь идет о защитных сооружениях, так и аварийными взрывами в химической, нефтяной промышленности и на других взрывоопасных производствах. Эти воздействия возникают достаточно редко, но вследствие большой интенсивности могут послужить причиной обрушения зданий или возникновения существенных повреждений, угрожающих сохранности оборудования и жизни людей. [1, 2]

При взрывных нагрузках аварийного характера или расчетных, действующих однократно, в конструкциях в большинстве случаев допускается развитие значительных пластических деформаций. В этом случае они могут быть доведены почти до разрушения и оказаться непригодными для дальнейшей эксплуатации без дополнительного ремонта и восстановления, но выполняют свою функцию, сохранив людей и оборудование.

Согласно действующим нормам при аварийных динамических воздействиях железобетонные конструкции рассчитываются по первому предельному состоянию, которое в свою очередь подразделяется на две группы [3, 4].

В предельном состоянии 1а предполагается условно упругая работа конструкции. В этом состоянии не допускается возникновение остаточных деформаций, требующих восстановления или замены поврежденных конструкций. Напряжения в бетоне и арматуре не должны превышать их динамическую прочность. Эта группа предельных состояний назначается для сооружений, в которых динамические нагрузки (взрывные или ударные) являются эксплуатационными.

В предельном состоянии 1б в конструкциях допускается развитие ограниченных пластических деформаций. Возможно наличие остаточных перемещений и остаточных несомкнутых трещин в растянутой зоне после разгрузки. Ограничение пластических деформаций может быть обусловлено различными факторами, например: для объектов атомной энергетики необходимо гарантировать отсутствие выбросов радиоактивных жидкостей и газов, а для специальных сооружений предотвратить проникновение радиации или отравляющих веществ внутрь помещения. При этом впоследствии для некоторых зданий и сооружений может потребоваться ремонт или замена поврежденных конструкций.

После начала текучести в растянутой арматуре усилия в расчетном сечении практически не меняются. В связи с этим в расчетах по первому предельному состоянию используются деформационные критерии: предельные значения прогибов, кривизн, деформаций, углов раскрытия в пластических шарнирах и др. [3, 5, 6, 7, 8, 9].

Согласно действующим нормам по расчету защитных сооружений гражданской обороны [10] в предельном состоянии 1б допускается развитие пластических деформаций в растянутой арматуре в наиболее растянутых сечениях и достижение предельных деформаций укорочения бетона сжатой зоны.

Расчет изгибаемых железобетонных элементов проводится с помощью нелинейной деформационной модели, основанной на гипотезе плоских сечений [11]. Однако как показали результаты экспериментов, с развитием пластических деформаций в бетоне и арматуре гипотеза плоских сечений соблюдается не во всех случаях [12, 13]. Этот факт не может не оказывать влияние на напряженно-деформированное состояние железобетонных конструкций в пластической стадии.

Также величина пластических деформаций арматуры имеет существенное значение при знакопеременных воздействиях большой интенсивности, например сейсмических [14, 15, 16, 17, 18, 19].

В связи с этим представляет интерес теоретическое и экспериментальное исследование влияния величины деформаций на напряженно-деформированное состояние изгибаемых железобетонных элементов, в том числе в пластической стадии работы арматуры, которое поможет уточнить предельные значения коэффициентов пластичности при расчете конструкций на динамические нагрузки большой интенсивности (взрывные или сейсмические).

Метод

На базе экспертно-диагностической испытательной лаборатории строительных конструкций (НИУ МГСУ) проведены испытания 15 одинаковых железобетонных балок пролетом 1500 мм на действие двух сосредоточенных сил. Размеры поперечного сечения балок 200×200 мм.

Армирование опытных образцов принято симметричным и одинаковым для всех образцов $\mu=0.426\%$. В качестве продольной растянутой арматуры приняты 4 стержня Ø10 А500С, к которым для обеспечения необходимой анкеровки по торцам приваривались поперечные пластины 150×150×4 мм. В качестве поперечной использовалась арматура Ø6А 500С с шагом 70 мм.

Перед началом эксперимента для определения физико-механических характеристик бетона произведены испытания на сжатие 6 бетонных кубов размером 100×100×100 мм и трех бетонных призм размером 100×100×400 мм. Согласно результатам испытаний призмная прочность бетона 21.3 МПа. Для определения физико-механических свойств арматуры проведены испытания 6 стержней длиной 400 мм. Средний предел текучести арматуры $R_s = 657$ МПа. Схема нагружения опытных железобетонных образцов представлена на рисунке 1.

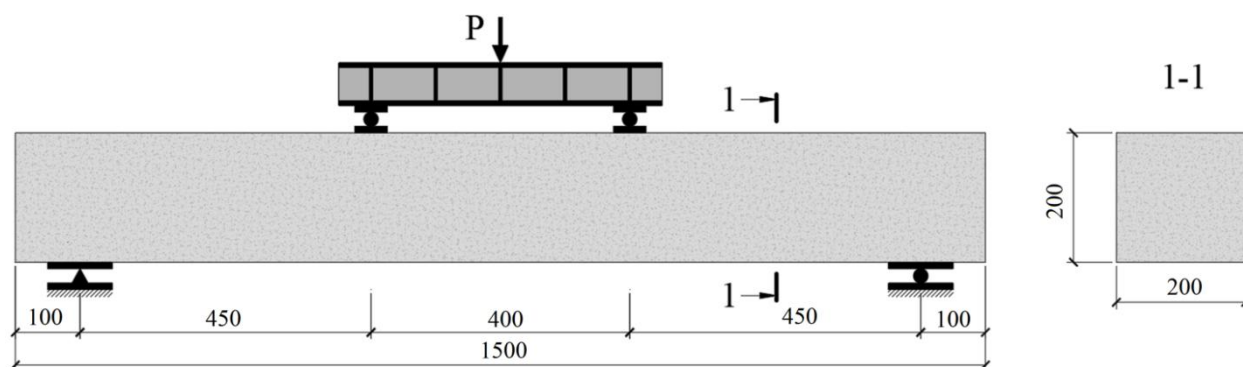


Рисунок 1 - Схема нагружения экспериментальных образцов

Испытано 7 серий образцов. Первая серия считалась эталонной и испытывалась монотонно возрастающей нагрузкой вплоть до разрушения. В процессе испытаний изучалось напряженно-деформированное состояние балки в процессе нагружения, в том числе после начала текучести растянутой арматуры и характер разрушения.

Для измерения линейных продольных деформаций на этапе изготовления каркаса на арматурные стержни производилась наклейка датчиков фирмы TML FLA-10-11 с базой 10 мм и сопротивлением 200 Ом. Для измерения деформаций бетона сжатой зоны под местом приложения нагрузки наклеивались цепочкой по высоте сечения тензорезисторы PL-90-11 с базой 90 мм и сопротивлением 120 Ом. Показания тензорезисторов дублировались показаниями цифровых индикаторов с базой 150 мм и ценой деления 0,001 мм.

Схема расположения тензодатчиков и индикаторов на эталонных балках представлена на рисунке 2.

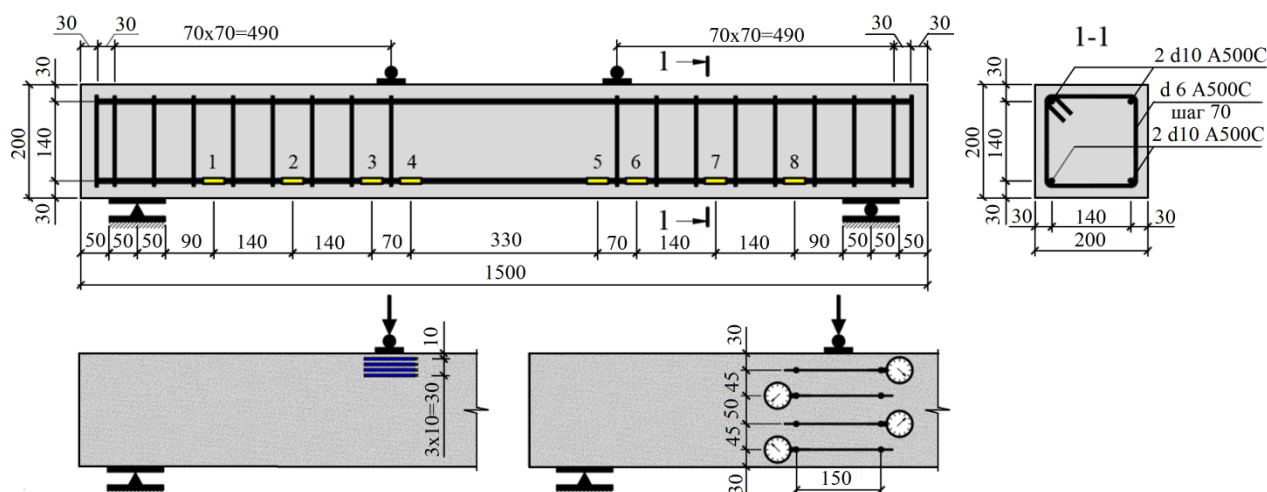


Рисунок 2 - Схема расположения цифровых индикаторов и тензодатчиков на бетоне и арматуре в эталонных балках

Балки остальных серий испытывались двумя полуциклами нагружения: прямого и обратного знака. Сначала балка нагружалась до достижения заданной величины коэффициента пластичности по деформациям арматуры, равного отношению максимальной деформации растянутой арматуры в первом полуцикле нагружения к деформации текучести $k_{\varepsilon,a} = \frac{\varepsilon_{a,max}}{\varepsilon_{тек}}$. Значение коэффициента пластичности варьировалось в пределах от 1.21 до 5.51. Затем производилась разгрузка, после которой определялись величины остаточных деформаций.

Затем балка переворачивалась, и производилась наклейка тензодатчиков цепочкой по берегам нормальных трещин, образовавшихся в первом полуцикле нагружения. После этого перевернутая балка нагружалась по той же схеме вплоть до разрушения.

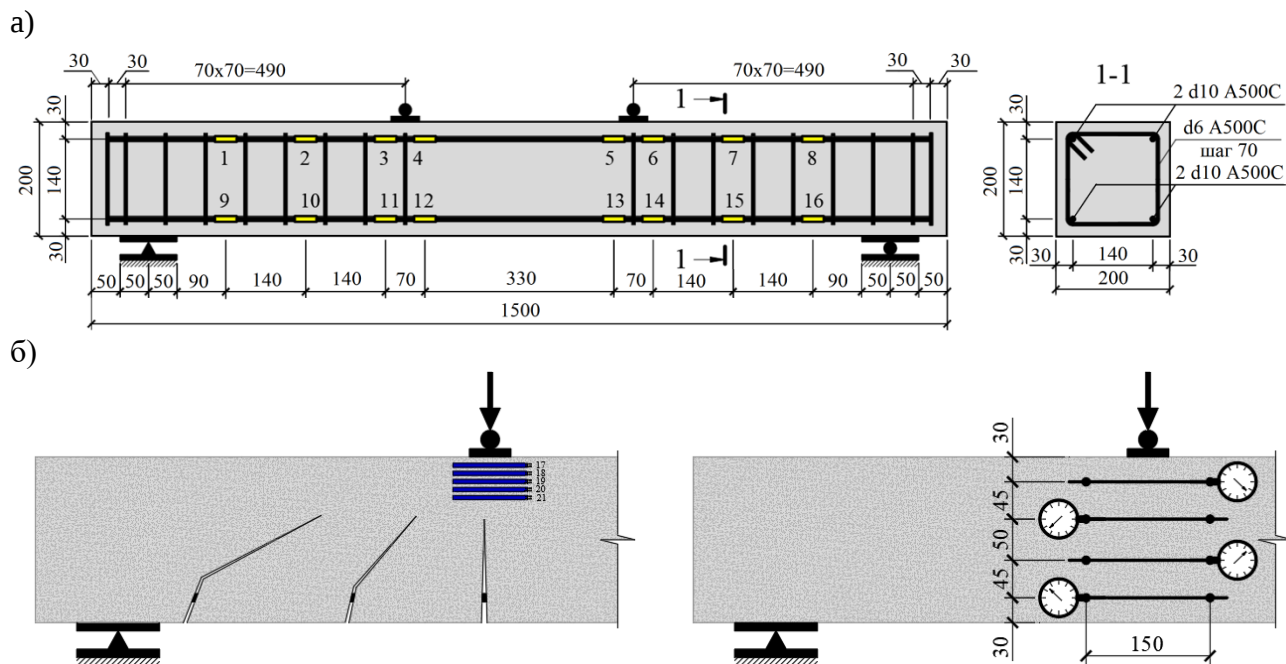


Рисунок 3 – Схема расположения (а) тензодатчиков на арматуре для балок серий II-V; (б) цифровых индикаторов и тензодатчиков на бетоне для балок серий II-V в первом полуцикле нагружения

Целью установки тензорезисторов по высоте поперечного сечения являлось изучение распределения деформаций по высоте сжатой зоны и определение ее высоты в первом полупериоде нагружения. После разгрузки тензорезисторы позволяли получить остаточные деформации бетона сжатой зоны. Схема расположения тензодатчиков и индикаторов часового типа на первом полупериоде нагружения представлена на рисунке 3.

Результаты и обсуждение

Результаты экспериментальных исследований

Как показали результаты испытаний эталонных балок и балок остальных серий на первом полупериоде нагружения, когда они загружались монотонно возрастающей нагрузкой до заданного значения коэффициента пластичности, эпюры деформаций в общем случае не соответствуют гипотезе плоских сечений (рисунок 4.)

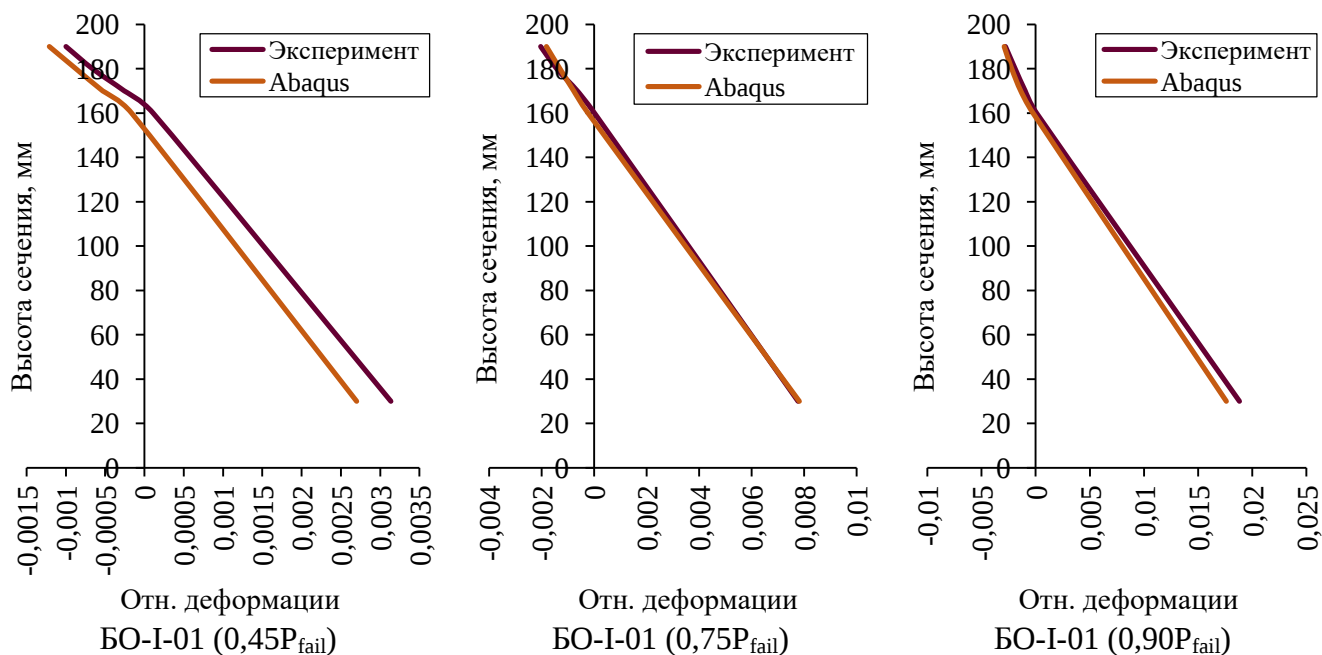


Рисунок 4 - Эпюры деформаций балок на различных этапах нагружения

Для аппроксимации распределения деформаций по высоте нормальных и наклонных сечений В.И. Жарницким в свое время была предложена гипотеза билинейных сечений [12]. Согласно этой гипотезе эпюру деформации по высоте нормального сечения можно задать следующей функцией (рисунок 5):

$$\begin{cases} \varepsilon_x(y) = A \cdot (y - h_b) \cdot \chi & (0 \leq y \leq h_b) \\ \varepsilon_x(y) = (y - h_b) \cdot \chi & (h_b \leq y \leq h) \end{cases} \quad (1)$$

где A – эмпирический коэффициент, h_b – высота сжатой зоны, χ – кривизна.

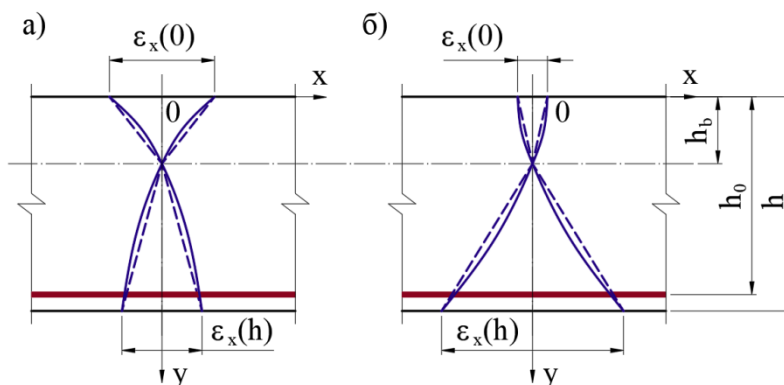


Рисунок 5 - Гипотеза билинейных сечений (для нормальных сечений) при различных очертаниях $\varepsilon_x(y)$: а) $-A > 1$; б) $-A < 1$;

Как показали результаты эксперимента, в общем случае распределение деформаций по высоте сечения может быть с достаточной точностью аппроксимировано билинейной зависимостью. Характер этой зависимости зависит от величины пластических деформаций в бетоне в арматуре.

На этапе нагружения, когда деформации арматуры близки к пределу текучести или меньше него, на эпюре деформаций возникает излом в вершине трещины. Коэффициент A гипотезы билинейных сечений больше единицы.

По мере развития пластических деформаций арматуры, относительные деформации арматуры начинают возрастать интенсивнее по сравнению с деформациями бетона сжатой зоны. Когда нагрузка составляет 70-80% от разрушающей, скорость деформирования выравнивается, и эпюра деформаций по высоте сечения близка к линейной, что соответствует гипотезе плоских сечений.

Когда нагрузка на балку близка к разрушающей, а коэффициент пластичности по деформациям арматуры превышает 3, на эпюре деформаций снова появляется излом, но коэффициент гипотезы билинейных сечений уже меньше единицы.

Согласно экспериментальным данным эпюры остаточных деформаций при полной разгрузке балок также не соответствуют гипотезе плоских сечений. Коэффициент A гипотезы билинейных сечений для остаточных деформаций также зависит от максимальной величины пластических деформаций (рисунок 6).

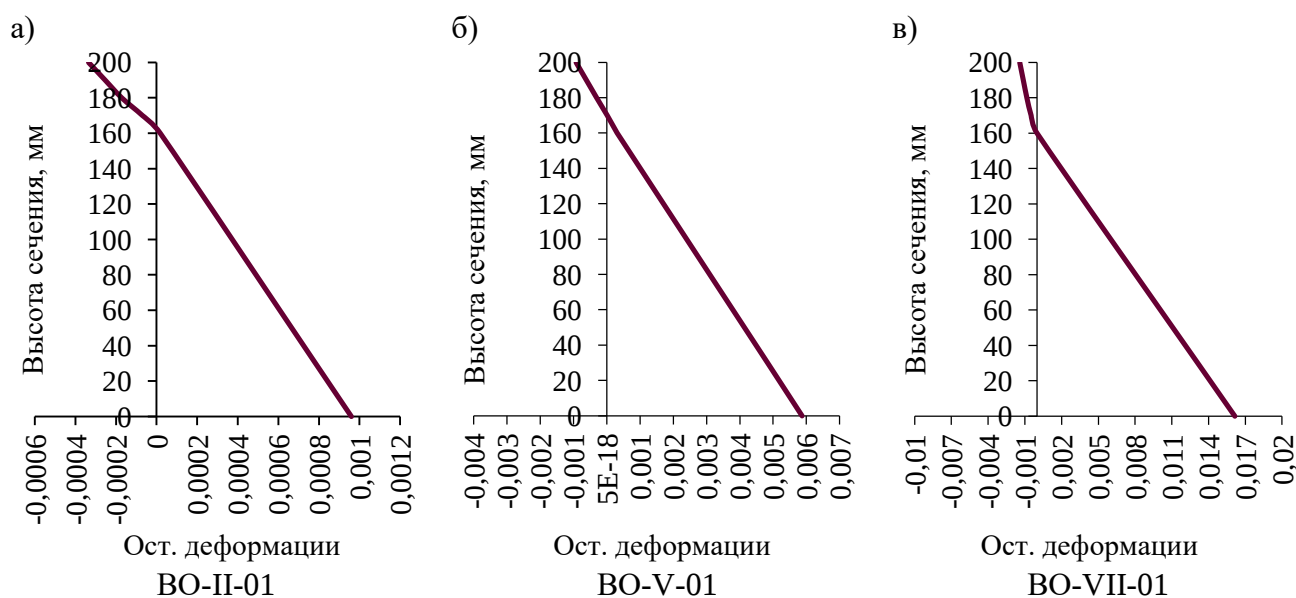


Рисунок 6 - Эпюры остаточных деформаций после разгрузки для балок серий II-VII

Как показали результаты испытаний балок II-VII серий, на эпюре остаточных деформаций также имеет место излом в вершине остаточных трещин (рисунок 6).

В таблице 1 представлены значения коэффициента A гипотезы билинейных сечений для остаточных деформаций балок серий II-VII. При величинах коэффициента пластичности меньше 2 величина коэффициента A больше единицы. С увеличением коэффициента пластичности величина A снижается и становится меньше 1.

Таблица 1 - Коэффициент А гипотезы билинейных сечений для остаточных деформаций

Серия	Шифр образца	Коэффициент А для остаточных деформаций при полной разгрузке	Максимальный коэффициент пластичности в первом полупериоде нагружения $k_{pl,1}$
II	БО-II-01	1,58	1,21
	БО-II-02	1,52	1,23
III	БО-III-01	1,09	1,49
	БО-III-02	1,21	1,52
IV	БО-IV-01	1,37	1,62
	БО-IV-02	1,12	2,14
V	БО-V-01	0,91	2,53
	БО-V-02	0,83	2,73
VI	БО-VI-01	0,67	4,64
	БО-VI-02	0,41	4,93
VII	БО-VII-01	0,42	5,36
	БО-VII-02	0,39	5,51

Численные исследования

Для изучения деформированного состояния железобетонных балок в процессе монотонного нагружения проведены расчеты моделей железобетонных балок в вычислительном комплексе Abaqus. Геометрические параметры расчетной модели, схема армирования, диаграммы бетона и арматуры и схема нагружения соответствовали экспериментальным образцам (рисунок 7).

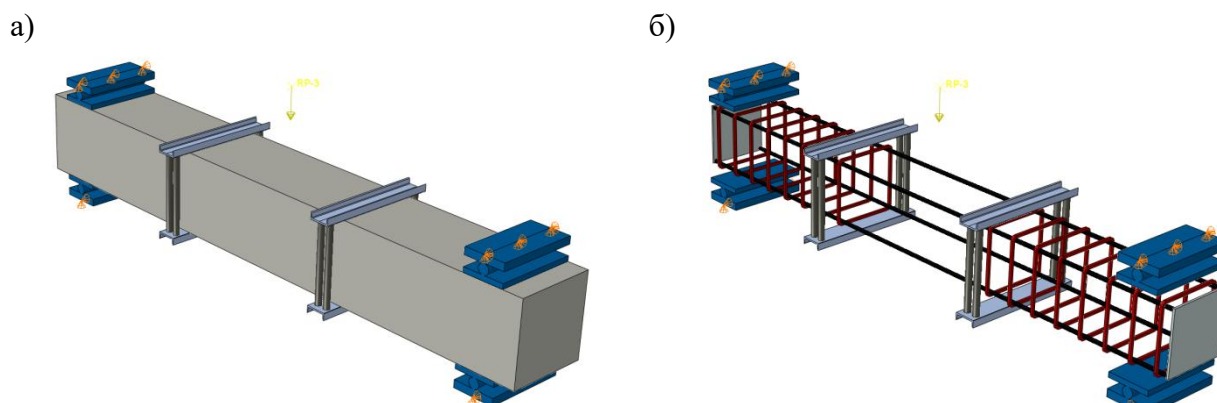


Рисунок 7 - Расчетная модель: а) схема нагружения, б) схема армирования

Бетон моделировался объемными конечными элементами. Моделирование бетона и арматуры осуществлялось с помощью КЭ C3D8(R) (brick mesh) или C3D4(R), в ряде случаев высокоточными КЭ C3D10M (tetra mesh). Нагружение моделировалось при помощи заданной контрольной точки (Tools – Reference point) монотонно возрастающей сосредоточенной силой (Concentrated force) на две грузораспределительные пластины 50×200 мм. Для моделирования работы бетона использовалась модель «concrete damaged plasticity» (CDP), позволяющая учесть образование и раскрытие трещин при растяжении, сжатии и срезе, а также теорию прочности бетона. Работа арматуры моделировалась билинейной диаграммой с незначительным возрастанием в пластической стадии.

Также проведены расчеты балки с одиночным армированием в виде 2-х стержней Ø10 А500С.

На рисунке 8 представлены зависимости коэффициента гипотезы билинейных сечений от коэффициента пластичности по деформациям арматуры при действии монотонно возрастающей нагрузки, полученные экспериментально и по результатам численных расчетов.

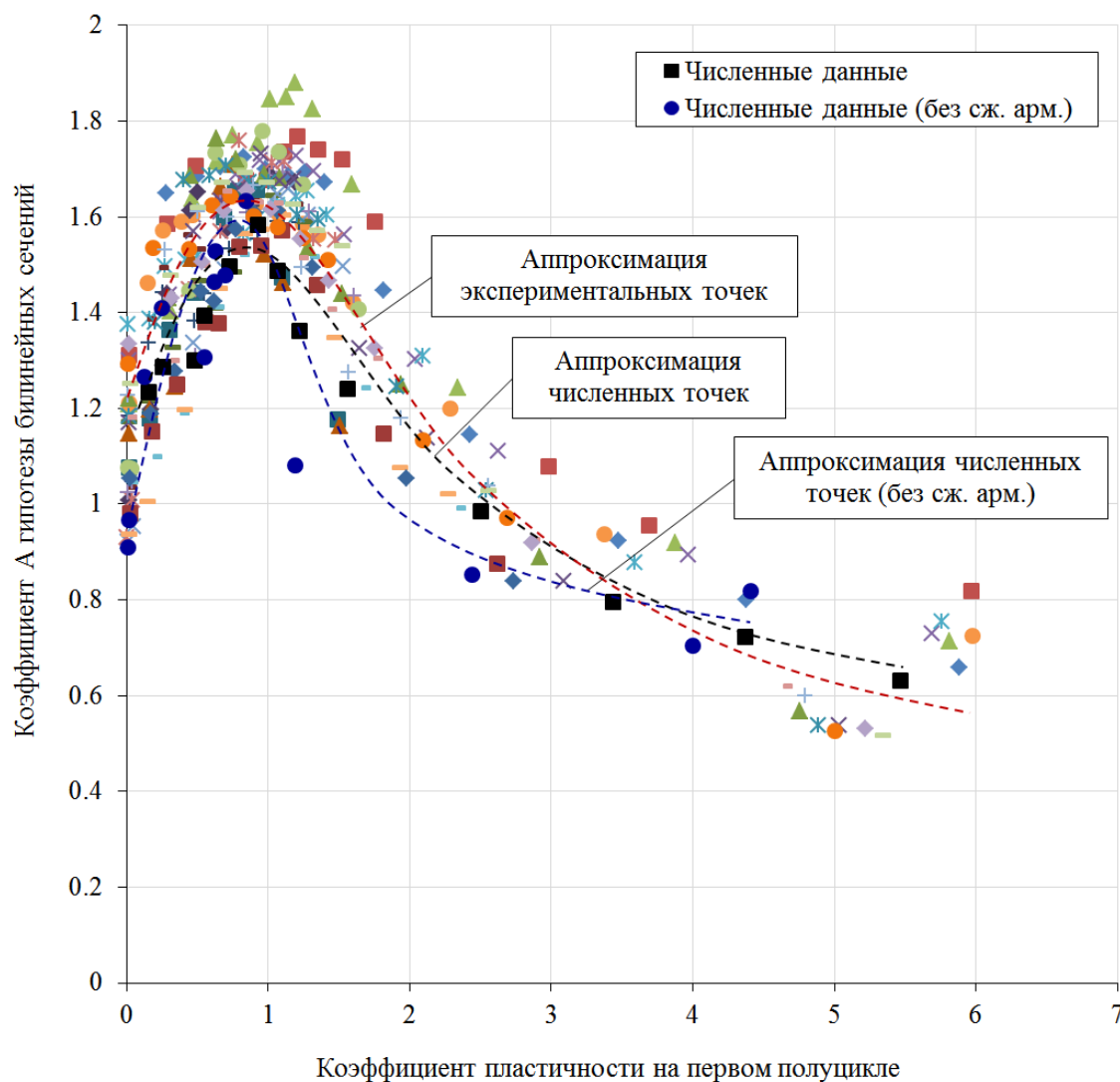


Рисунок 8 - Зависимость коэффициента A гипотезы билинейных сечений от коэффициента пластичности по деформациям арматуры: экспериментальная (красная линия), по результатам численных расчетов балки с симметричным армированием (черная линия) и балки без сжатой арматуры (синяя линия)

Как видно из графика, характер зависимости полученной по результатам численных расчетов балки с симметричным армированием сходен с экспериментальной кривой, а максимальное отклонение не превышает 13%.

Для балки без сжатой арматуры характер кривой аналогичен, но снижение коэффициента A по мере роста пластических деформаций в растянутой арматуре происходит интенсивнее, чем в балке с симметричным армированием, и уже после достижения коэффициента пластичности равного 2, характер излома на эпюре деформаций меняется.

Влияние коэффициента A гипотезы билинейных сечений на предельные значения коэффициента пластичности

Рассмотрим напряженно-деформированное состояние нормального сечения железобетонного изгибаемого элемента, под действием монотонно возрастающей нагрузки в момент достижения предельного прогиба, соответствующего началу разрушения бетона сжатой зоны. Для простоты вычислений работу растянутого бетона не учитываем.

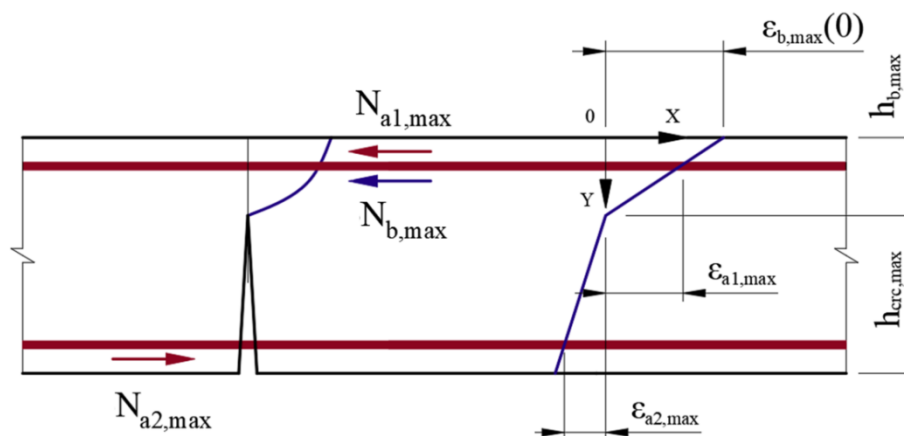


Рисунок 9 - Распределение деформаций по высоте сечения в момент достижения максимального прогиба

Предполагаем, что деформации подчиняются гипотезе билинейных сечений (рисунок 9). В этом случае деформация бетона сжатой зоны (2):

$$\varepsilon_{b,max}(y) = A(\chi_{max}) \cdot (h_{b,max} - y) \cdot \chi_{max}, \quad (2)$$

где $h_{b,max}$ - высота сжатой зоны в момент начала разрушения бетона в крайнем волокне.

Знак в формуле (2) изменен на противоположный по сравнению с формулой (1), чтобы деформации бетона были положительными. Максимальная деформация бетона в крайнем волокне равна предельному значению $\varepsilon_{b,ult}$ (3):

$$\varepsilon_{b,max}(0) = A(\chi_{max}) \cdot h_{b,max} \cdot \chi_{max} = \varepsilon_{b,ult} \quad (3)$$

Кривизна сечения в момент разрушения бетона сжатой зоны (4):

$$\chi_{max} = \frac{\varepsilon_{b,ult}}{A(\chi_{max}) \cdot h_{b,max}} \quad (4)$$

Тогда деформация растянутой арматуры (5):

$$\varepsilon_{a2,max} = \frac{\varepsilon_{b,ult}}{A(\chi_{max}) \cdot h_{b,max}} \cdot (h_{b,max} - h_0) \quad (5)$$

Деформация сжатой арматуры (6):

$$\varepsilon_{a1,max} = A(\chi_{max}) \cdot (h_{b,max} - a) \cdot \chi_{max} = \frac{\varepsilon_{b,ult}}{h_{b,max}} \cdot (h_{b,max} - a) \quad (6)$$

где h_0 – рабочая высота сечения, a – расстояние от сжатой грани до центра тяжести сжатой арматуры.

Высоту сжатой зоны $h_{b,max}$ можно найти из уравнения равновесия всех сил на продольную ось балки (7):

$$N_b + N_{a1,max} + N_{a2,max} = 0 \quad (7)$$

Предположим, что зависимость между напряжениями и деформациями арматуры можно описать диаграммой Прандтля, а зависимость между деформациями и напряжениями бетона квадратной параболой (8):

$$\sigma_b(y) = E_b \cdot \left(\varepsilon_b(y) - 0.5 \cdot \frac{\varepsilon_b(y)^2}{\varepsilon_R} \right) \quad (8)$$

Тогда усилие в бетоне сжатой зоны (9)

$$N_b = b \cdot \int_0^{h_{b,max}} \sigma_b(y) dy = b \cdot E_b \cdot \varepsilon_{b,ult} \cdot h_{b,max} \cdot \left[\frac{1}{2} - \frac{\varepsilon_{b,ult}}{6 \cdot \varepsilon_R} \right] \quad (9)$$

где ε_R – деформация сжатого бетона, соответствующая временному сопротивлению.

Усилие в растянутой арматуре (10):

$$N_{a2,max} = -R_{sn} \cdot A_{s2} \quad (10)$$

Усилие в сжатой арматуре (11):

$$N_{a1,max} = E_s \cdot A_{s1} \cdot \varepsilon_{a1,max} = E_s \cdot A_{s1} \cdot \frac{\varepsilon_{b,ult}}{h_{b,max}} \cdot (h_{b,max} - a) \quad (11)$$

Кивизна в момент начала текучести растянутой арматуры (12):

$$\chi_{\text{тек}} = \frac{R_{sn}}{E_s \cdot (h_0 - h_{b,\text{тек}})} \quad (12)$$

Высота сжатой зоны в момент начала текучести $h_{b,\text{тек}}$ также определяется из уравнения равновесия всех сил на продольную ось.

Как видно из формул (7-11), величина усилий в бетоне, сжатой и растянутой арматуре, а следовательно и высота сжатой зоны бетона не зависят от коэффициента A . Однако от него в значительной степени зависят деформации и соответствующие значения кривизны, что может быть важно, когда в предельное состояние определяется на основе деформационных критериев.

На рисунке 10 представлена зависимость предельного коэффициента пластичности по кривизне, $k_\chi = \frac{\chi_{\text{max}}}{\chi_{\text{тек}}}$, соответствующего началу разрушения бетона сжатой зоны, от коэффициента армирования для балки с симметричным армированием. Параметры балки, для которых проводились расчеты, соответствуют параметрам экспериментальных образцов. Величина предельной деформации бетона принята равной $\varepsilon_{b,\text{ult}} = 1.4 \cdot \varepsilon_R$.

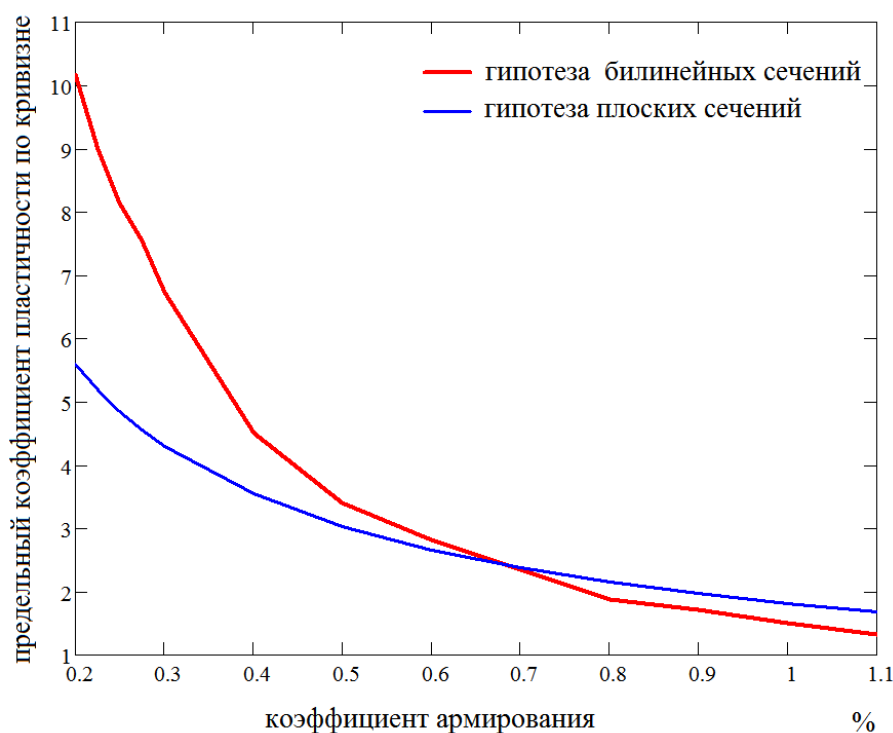


Рисунок 10 - Зависимость предельного коэффициента пластичности по кривизне, соответствующего разрушению бетона сжатой зоны от коэффициента армирования для балок с симметричным армированием

В первом случае предельный коэффициент пластичности по кривизне определялся с использованием общеизвестной гипотезы плоских сечений (синяя линия). Во втором случае (красная линия) расчет проводился на основе гипотезы билинейных сечений с использованием экспериментальных значений коэффициента A .

Как видно из графика, при коэффициенте армирования меньше 0.7 % гипотеза плоских сечений дает заниженное значение предельного коэффициента пластичности. С уменьшением коэффициента армирования разница может достигать 80 %. При больших значениях коэффициента армирования гипотеза плоских сечений дает завышенные значения предельного коэффициента пластичности.

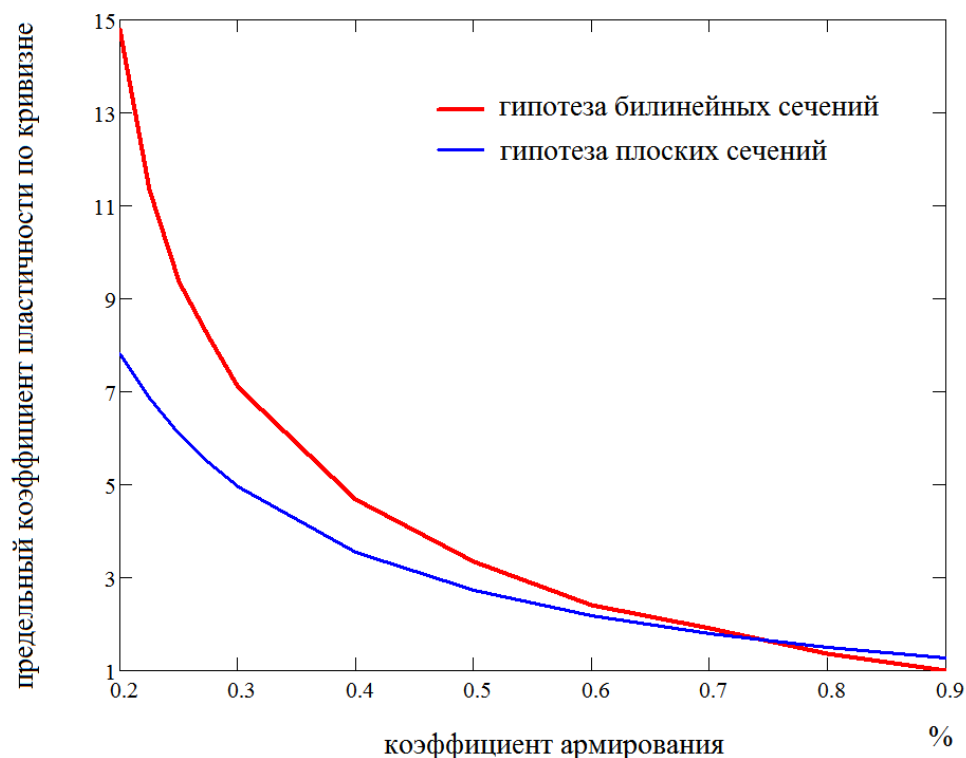


Рисунок 11 - Зависимость предельного коэффициента пластичности по кривизне, соответствующего разрушению бетона сжатой зоны, от коэффициента армирования для балок с одиночным армированием

На рисунке 11 представлена аналогичная зависимость предельного коэффициента пластичности по кривизне соответствующего началу разрушения бетона сжатой зоны, от коэффициента армирования для балки без сжатой арматуры. В первом случае, как и для балки с симметричным армированием, использовалась гипотеза плоских сечений (синяя линия), а во втором (красная линия) – гипотеза билинейных сечений. Значения коэффициента A определялись по результатам расчета балки в ПК Abaqus. Как видно из графика, характер зависимостей для балок с одиночным армированием и для балок с симметричным армированием аналогичен. В обоих случаях и гипотеза плоских сечений также дает заниженное значение предельных коэффициентов пластичности при коэффициенте армирования менее 0.7 - 0.75 %, и завышенное при больших значениях. Для заниженных значений разница возрастает с уменьшением коэффициента армирования.

Выводы

По результатам экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Анализ эпюр деформаций при монотонном нагружении балок в пластической стадии показал, что в процессе нагружения гипотеза плоских сечений соблюдается не во всех случаях. Эпюры деформаций с достаточной точностью можно аппроксимировать билинейной зависимостью. Коэффициент A гипотезы билинейных сечений больше единицы в упругой стадии работы арматуры и уменьшается в процессе нагружения по мере развития пластических деформаций в арматуре.

2. Эпюра остаточных деформаций в сечениях после разгрузки также соответствует гипотезе билинейных сечений.

3. Результаты расчета коэффициента гипотезы билинейных сечений при монотонном нагружении в ПК Abaqus для железобетонных балок с учетом упругопластических диаграмм бетона и арматуры близки к экспериментальным значениям. Максимальное отклонение не превышает 13%.

4. Гипотеза плоских сечений дает заниженные значения предельных коэффициентов пластичности по кривизне, соответствующих началу разрушения бетона сжатой зоны, при коэффициентах армирования менее 0.7%-0.75% как для балок с симметричным армированием, так и для балок с одиночной арматурой. Разница в значениях возрастает с уменьшением количества продольной арматуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bermejo M., Goicolea J.M., Gabaldon F., Santos A. Impact and explosive loads on concrete buildings using shell and beam type elements, COPDYN 2011, 3rd ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamic and Earthquake Engineering // Corfu, Greece, 2011. Pp. 1-14.
2. Невская Е. Основные методы оценки параметров взрывных волн при аварийных взрывах. Принципы проектирования взрывоустойчивых зданий и сооружений // Безопасность труда в промышленности. 2017. № 9. С. 20-29.
3. Попов Н.Н., Расторгуев Б.С., Забегаев А.В. Расчет конструкций на динамические специальные нагрузки. М: Высшая школа, 1992. 319 с.
4. Бирбрайер А.Н., Роледер А.Ю. Экстремальные воздействия на сооружения // Санкт-Петербург: Издательство Политехнического университета. 2009. 587 с.
5. Расторгуев Б.С., Плотников А.И., Хуснутдинов Д.З. Проектирование зданий и сооружений при аварийных взрывных воздействиях. Москва: АСВ, 2007. 152 с.
6. Anderson S., Karlsson H. Structural response of reinforced concrete beams subjected to explosions // Gothenburg, Sweden: Chalmers University of technology. 2012. 236 p.
7. Ванус Д.С. К оценке безопасности железобетонных плит, опертых по контуру при действии особой динамической нагрузки в виде мгновенного импульса // Технология текстильной промышленности. 2018. № 2. С. 233-238.
8. Расторгуев Б.С., Ванус Д.С. Оценка безопасности железобетонных конструкций при чрезвычайных ситуациях техногенного характера // Строительство и реконструкция. 2014. № 6. С. 83-89.
9. Шульгин В.Н., Ларионов В.И. Динамический расчет изгибаемых конструкций защитных сооружений в пластической стадии // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2007. № 4. С. 31-34.
10. СП 88.13330.2014 «Защитные сооружения гражданской обороны. Актуализированная редакция СНиП II-11-77*», ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ) и ОАО «ЦНИИПромзданий», Москва, 2014.
11. Радайкин О.В. Теоретические основы диаграммного метода расчета стержневых элементов из армированного бетона // Строительство и реконструкция. 2020. № 6. С. 26-42.
12. Жарницкий В.И., Беликов А.А., Курнавина С.О. Экспериментальные исследования сопротивления железобетонных балок перерезывающей силе // Промышленное и гражданское строительство. 2011. № 3. С. 18-20.
13. Крылов А.С. Прочность железобетонных балок с жесткой арматурой из высокопрочных бетонов: автореферат дис. кандидата технических наук: 05.23.01 / Крылов Алексей Сергеевич; [АО НИЦ «Строительство»]. Москва, 2019. 23 с.
14. Garnitsky V.I., Golda Yu.L., Kurnavina S.O. The evaluation of the seismic resistance of buildings and their constructions based on the dynamic calculation with regard to the elastic-plastic deformations of materials" in *Earthquake-resistant construction. Safety of structures* (Russian Association for Earthquake-Resistant Construction and Protection from Natural and Man-made Impacts (RUSS), Moscow: 1999). Vol. 4. Pp. 7-8.
15. Жарницкий В.И., Забегаев А.В. Развитие теории сейсмостойкости железобетонных конструкций // Бетон на рубеже третьего тысячелетия: сб. докладов 1-й Всероссийской конференции по проблемам бетона и железобетона. Т.2. М: 2001. С. 665-658.
16. Курнавина С.О., Цацулин И.В. Влияние пластических деформаций на высоту несомкнутой остаточной трещины в сжатой зоне бетона // Строительство и реконструкция. 2020. № 5(91). С. 13-21. doi:10.33979/2073-7416-2020-91-5-13-21
17. Kurnavina S.O., Tsatsulin I.V. The influence of open cracks in compressed area of concrete on behaviour of bending elements of frame buildings under special alternating loads// Journal of Physics: Conference Series : International Scientific Conference on Modelling and Methods of Structural Analysis 2019, MMSA 2019, Moscow, 13–15 ноября 2019 года. – Moscow: Institute of Physics Publishing, 2020. P. 012037. doi:10.1088/1742-6596/1425/1/012037
18. Kabanzev O., Mitrovic B. Deformation and power characteristics monolithic reinforced concrete systems in the mode of progressive collapse / MATEC Web of Conferences 251, 02047 (2018) IPICSE-2018-<https://doi.org/10.1051/mateconf/201825102047>
19. Кабанцев О.В., Усеинов Э.С., Шарипов Ш. О методике определения коэффициента допускаемых повреждений сейсмостойких конструкций // Вестник ТГАСУ. 2016. № 2. С. 117-129.

REFERENCES

1. Bermejo M., Goicolea J.M., Gabaldon F. A. Santos «Impact and explosive loads on concrete buildings using shell and beam type elements», COPDYN 2011, 3rd ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamic and Earthquake Engineering // Corfu, Greece, 2011. Pp. 1-14.
2. Nevskaya E. Osnovniye otsenki parametrov vzrивnich voln pri avariynikh vzrивakh // Bezopasnost truda v promyshlennosti. 2017. No. 9. Pp. 20-29.
3. Popov N.N., Ratoguyev B.S., Zabegayev A.V. «Raschet konstruktsiy na dinamicheskiye nagruzki». Moscow: Visshaya shkola, 1992. 319 p. (rus)
4. Birbrayer A.N., Roleder A.Iu. Tkstremal'niyy vozdeystviya na sooruzheniya. Saint Petersburg: Izdatel'stvo Politekhnikeskogo universiteta, 2009. 587 p. (rus)
5. Ratoguyev B.S., Plotnikov A.I., Husnutdinov D.Z. Proektirovaniye zdaniy I sooruzheniy pri avariynikh vzrивnich vozdeysviyakh. Moscow: ASV, 2007. 152 p. (rus)
6. Anderson S., Karlsson H. Structural response of reinforced concrete beams subjected to explosions. Gothenburg, Sweden: Chalmers University of technology, 2012. 236 p. (eng)
7. Vanus D.S. K otsenke bezopasnosti zhelezobetonnykh plit, opertykh po konturu pri deystvii osoboy dinamicheskoy nagruzki v vide mgnovennogo impul'sa // Textile industry technology. 2018. No. 2. Pp. 233-238.
8. Ratoguyev B.S., Vanus D.S. Otsenka bezopasnosti zhelezobetonnykh konstuktsiy pri chrezvychaynykh situatsiyakh tekhnogennogo kharaktera // Building and Reconstruction. 2014. No. 6. Pp. 83-89.
9. Shul'gin V.N., Larionov V.I. Dinamicheskiy raschet izgibaemikh konstruktsiy zashchitnykh sooruzheniy v plasticheskoy stadii // Construction mechanics of engineering structures and structures. 2007. No. 4. Pp. 31-34.
10. SP 88.13330.2014 «Zashchitniye sooruzheniya grazhdanskoy oborony. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIP II-11-77*». FGBU VNII GOCHS (FC), Moscow, 2014
11. Radaykin O.V. Teoreticheskiye osnovy diagrammnogo metoda rascheta sterzhnevnykh elementov iz armirovannogo betona // Stroitel'stvo i rekonstruktsiya. 2020. No. 6. Pp. 26-42.
12. Garnitsky V.I., Belikov A.A., Kurnavina S.O. Eksperimentalniye issledovaniya soprotivleniya gelezobetonnykh balok pererezivayushey sile // Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo. 2011. No. 3. Pp. 18-20.
13. Krylov A.S. Prochnost' zhelezobetonnykh balok s zhestkoy armaturoy iz vysokoprochnykh beronov: abstract of the dissertation of the Candidate of technical sciences: 05.23.01 / [AO NITS «Construction»]. Moscow, 2019. 23 p.
14. Garnitsky V.I., Golda Yu.L., Kurnavina S.O. The evaluation of the seismic resistance of buildings and their constructions based on the dynamic calculation with regard to the elastic-plastic deformations of materials" in *Earthquake-resistant construction. Safety of structures* (Russian Association for Earthquake-Resistant Construction and Protection from Natural and Man-made Impacts (RUSS), Moscow: 1999). Vol. 4. Pp. 7-8.
15. Garnitsky V.I., Zabegayev A.V. Razvitie teorii seismostoykosti gelezobetonnykh konstuktsiy // Proceedings of the I All Russian Conference on concrete and reinforced concrete. Moscow, 2001. Vol. 2. Pp. 655-658.
16. Kurnavina S.O., Tsatsulin I.V. Vliyaniye plasticheskikh deformatsiy na vysotu nesomknutoy ostatochnoy treshchiny v szhatoy zone betona // Building and Reconstruction. 2020. No. 5(91). Pp. 13-21. doi:10.33979/2073-7416-2020-91-5-13-21
17. Kurnavina S.O., Tsatsulin I.V. The influence of open cracks in compressed area of concrete on behaviour of bending elements of frame buildings under special alternating loads // Journal of Physics: Conference Series : International Scientific Conference on Modelling and Methods of Structural Analysis 2019, MMSA 2019, Moscow, 13–15 ноября 2019 года. – Moscow: Institute of Physics Publishing, 2020. P. 012037. doi:10.1088/1742-6596/1425/1/012037
18. Kabanzev O., Mitrovic B. Deformation and power characteristics monolithic reinforced concrete systems in the mode of progressive collapse / MATEC Web of Conferences 251, 02047 (2018) IPICSE-2018-<https://doi.org/10.1051/mateconf/201825102047>
19. Kabantsev O.V., Useinov E.S., Sharipov S. O metodike opredeleniya koefficienta dopuskayemikh povregdeniy seismostoykikh konstruktsiy [Determination of allowable damage factor of antiseismic structures] // Vestnik TGASU, 2016. No. 2. Pp. 117-126.

Информация об авторах:

Куравина Софья Олеговна

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

E-mail: sofyK@yandex.ru

Цацулин Илья Владимирович

ООО «Институт «Мосинжпроект», г. Москва, Россия, руководитель группы.

E-mail: ilya.vladimirovich.t@mail.ru

Information about authors:

Kurnavina Sofya Ol.

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

E-mail: sofyK@yandex.ru

Tsatsulin Ilya Vladimirovich

Mosinzhproekt Institute LLC, Moscow, Russia, team leader.

E-mail: ilya.vladimirovich.t@mail.ru

В.В. НАДОЛЬСКИЙ¹¹УО «Брестский государственный технический университет», г. Брест, Беларусь

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОГРЕШНОСТИ ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ДЛЯ СТАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Аннотация. Применение численных моделей для оценки несущей способности и эксплуатационной пригодности как новых, так и существующих строительных конструкций является одним из наиболее важных достижений последних десятилетий для инженеров-строителей. Численная модель, как и любая другая модель, обладает погрешностью, которую необходимо установить и учесть при обеспечении проектной (конструкционной) надёжности конструкций. При этом статистические характеристики погрешности численных моделей остаются наименее изученными. Целью исследования является развитие и научное обоснование проектирования на основе численных моделей несущей способности. Объектом исследования являются параметры численных моделей и статистические характеристики погрешности (неопределённости) численного результата. Основные задачи тематического исследования включают (i) анализ чувствительности несущей способности от вариаций параметров численных моделей, (ii) верификацию параметров численных моделей на основе экспериментальных данных и (iii) вычисление статистических характеристик погрешности численной модели, предполагаемых в дальнейшем к использованию при развитии формата безопасности и нормировании значений частных коэффициентов надёжности.

Ключевые слова: численная модель несущей способности, формат безопасности, надёжность, неопределённость, погрешность моделирования, метод конечных элементов.

V.V. NADOLSKI¹¹Brest State Technical University, Brest, Belarus

STATISTICAL CHARACTERISTICS OF THE NUMERICAL MODEL UNCERTAINTIES FOR STEEL ELEMENTS

Abstract. The use of numerical models to assess the resistance (load bearing capacity) and serviceability of new and existing structures is one of the most important achievements of recent decades for civil engineers. The numerical model, like any other model, has uncertainties that need to be established and taken into account when ensuring the structural reliability. At the same time, the statistical characteristics of the uncertainty of numerical models remain the least studied. The purpose of the study is to develop and scientifically substantiate the design based on numerical models of load-bearing capacity. The object of the study is the parameters of numerical models and statistical characteristics of the uncertainty of the numerical result. The main objectives of the case study include: (i) analysis of the sensitivity of the results from variations in the parameters of numerical models; (ii) verification of the parameters of numerical models based on experimental data; (iii) calculation of statistical characteristics of the uncertainty of the numerical model, which are expected to be used in the future in the development of the safety format and the normalization of the values of partial reliability factors.

Keywords: numerical model of load-bearing capacity, safety format, reliability, uncertainty, modeling error, finite element method.

Введение

Метод проектирования на основе численных моделей несущей способности, т.е. использование численного анализа для оценки несущей способности и эксплуатационной

© Надольский В.В., 2023

пригодности новых и существующих строительных конструкций, является одним из наиболее важных достижений последних десятилетий для инженеров-строителей [1 - 17]. С развитием компьютерных средств проектирования в ближайшем будущем все больше и больше конструкций, вероятно, будут проектироваться и оцениваться с помощью численного анализа. Однако ценность упрощенных зависимостей не снизится, по крайней мере, для проверки полученных численных результатов.

В силу упрощений в описании параметров численной модели (описание диаграммы деформирования материала, формы и значения несовершенств и т.д.) и изменчивости базисных переменных (таких как предел текучести, размеры сечения), численная модель, как и любая другая модель, обладает погрешностью, которую необходимо установить и учесть при обеспечении проектной (конструкционной) надёжности конструкций [18, 19]. Статистические характеристики погрешности численных моделей остаются наименее изученными, поэтому в большинстве случаев результаты, полученные с помощью численных моделей, считаются абсолютно точными, что не может быть истиной. Количественная оценка погрешности моделирования может быть выполнена посредством сравнения экспериментальных и численных результатов.

Целью исследования является развитие и научное обоснование метода проектирования на основе численных моделей несущей способности. Объектом исследования являются параметры численных моделей и статистические характеристики погрешности (неопределённости) численного результата. Основные задачи тематического исследования включают (i) анализ чувствительности результатов численных моделей от вариаций назначаемого параметра, (ii) верификацию параметров численных моделей на основе экспериментальных данных и (iii) вычисление статистических характеристик погрешности численной модели, предполагаемых в дальнейшем к использованию при развитии формата безопасности и нормировании значений частных коэффициентов надёжности [20].

Метод

Для решения поставленных задач составлена база экспериментальных испытаний стальных элементов. Для пилотной разработки и верификации параметров численных моделей рассмотрены проверки несущей способности стальных элементов, сопровождающейся потерей устойчивости частей сечения. Есть несколько обстоятельств, мотивирующих на использование именно этих испытаний. Первое обстоятельство связано с тем, что для таких проверок характерно выраженное нелинейное поведение в результате физической и геометрической нелинейности, по причине чего классические модели не позволяют отразить физику процесса деформирования. Второе обстоятельство заключается в том, что эти виды проверок позволяют учесть наиболее широкую специфику возможных случаев поведения стальных элементов с позиции графика зависимости отклика конструкции, например перемещения, от уровня нагружения. Большинство других проверок представляют собой частные случаи такого общего поведения стального элемента. Третье обстоятельство связано с тем, что работа элемента с учётом закритической стадии работы отсека представляет собой работу системы: на первом этапе элемент работает упруго с жесткими характеристиками «полного» сечения; потом происходит потеря устойчивости части стенки, и образуется поле растягивающих напряжений, которое воспримет нагрузку; на последующих этапах возрастание несущей способности обеспечивается за счет работы поясов балки, также см. [21]. Четвёртое обстоятельство – то, что для рассматриваемых проверок классические модели являются наиболее сложными и консервативными [22], поэтому использование численных моделей позволит улучшить оценку несущей способности.

Результаты экспериментов с точки зрения максимальной нагрузки сопоставлены с результатами, полученными с помощью соответствующих численных моделей, в частности, метода конечных элементов. База данных сформирована на основании экспериментальных исследований, представленных в [23-29]. Эти испытания являются классическими в области исследования работы стальных элементов с учётом потери местной устойчивости, и их

результаты были положены в основу моделей несущей способности многих нормативных документов, в том числе [30-33]. Для краткости изложения в статье из всей экспериментальной программы представлены только основные размеры испытываемых элементов (a – размер отсека, h_w и t_w – высота и толщина стенки, b_f и t_f – ширина и толщина полок) и прочностные свойства стали (f_y и f_u – предел текучести и предел прочности) (см. таблицу 1).

Таблица 1 – Геометрические параметры и механические свойства стали для испытанных стальных элементов

Обозначение, источник	a , мм	h_w , мм	t_w , мм	b_f , мм	t_f , мм	f_{yw} , МПа	f_{uw} , МПа	f_{yf} , МПа	f_{uf} , МПа
SP600 [23]	2390	600	6	450	20	383	543	354	519
SP1200 [23]	2390	1200	6	450	20	383	543	354	519
G1 [25]	2000	500	2	200	10	280	393	293	422
G2 [25]	1000	500	2	200	10	238	373	293	422
G3 [25]	665	500	2	200	10	247	375	293	422
G4 [25]	500	500	2	200	10	250	369	293	422
G5 [25]	400	500	2	200	10	239	373	293	422
G6 [25]	330	500	2	200	10	256	373	293	422
1VPL2500 [26]	2500	500	4.10	200.0	20.65	325	443	454	595
1VPL1500 [26]	1500	500	4.10	200	20.65	325	443	454	595
1VPL750 [26]	750	500	4.10	200	20.65	325	443	454	595
1VPL450 [26]	450	500	4.10	200	20.65	325	443	454	595
2VPL2500 [26]	2500	500	3.90	200	20.78	210	309	449	591
2VPL1500 [26]	1500	500	3.90	200	20.78	210	309	449	591
2VPL750 [26]	750	500	3.90	200	20.78	210	309	449	591
2VPL450 [26]	450	500	3.90	200	20.78	210	309	449	591
P200 [24]	2400	1200	6	450	20	371	542	354	519
P700 [24]	2400	1200	6	450	20	371	542	354	519
P1440 [24]	2400	1200	6	450	20	371	542	354	519
G6 T1 [27]	1905	1270	4.9	308.1	19.76	253.0	-	261.3	-
G6 T2 [27]	952.5	1270	4.9	308.1	19.76	253.0	-	261.3	-
G6 T3 [27]	635	1270	4.9	308.1	19.76	253.0	-	261.3	-
G7 T1 [27]	1270	1270	4.98	309.6	19.76	253.0	-	259.2	-
G7 T2 [27]	1270	1270	4.98	309.6	19.76	253.0	-	259.2	-
G1 [28]	400	400	4	130	15	318.5	-	303.8	-
G2 [28]	600	600	4	200	10	318.5	-	303.8	-
G3 [28]	600	600	4	200	15	318.5	-	303.8	-
G4 [28]	600	400	4	130	15	318.5	-	303.8	-
G5 [28]	900	600	4	200	10	318.5	-	303.8	-
G6 [28]	900	600	4	200	20	318.5	-	303.8	-
G7 [28]	1200	600	4	200	10	285.2	-	303.8	-
G8 [28]	1200	600	4	200	15	285.2	-	303.8	-
G9 [28]	1200	400	4	130	10	293	-	303.8	-
G10 [28]	1200	400	4	130	15	293	-	303.8	-
PG1-1 [29]	600	600	4.1	200	12.5	343	-	257	-
PG1-2 [29]	600	600	4.1	200	12.3	339	-	250	-
PG1-3 [29]	600	600	4.1	200	12.5	338	-	251	-
PG2-1 [29]	900	900	3.1	300	10.2	285	-	254	-
PG2-2 [29]	900	900	3.1	300	10.2	284	-	256	-
PG2-3 [29]	900	900	3.1	300	10.2	282	-	253	-
PG3-1 [29]	900	600	3.2	200	10.1	282	-	264	-
PG3-2 [29]	900	600	3.2	200	10.2	273	-	263	-
PG3-3 [29]	900	600	3.2	200	10.2	275	-	258	-
PG4-1 [29]	1000	500	1.9	200	9.9	250	-	293	-
PG4-2 [29]	1000	500	1.9	200	9.8	247	-	313	-
PG4-3 [29]	1000	500	1.9	200	10,0	236	-	294	-

В настоящем исследовании численное моделирование выполнено в расчётном комплексе Abaqus, относящемся к наиболее распространённым мощным пакетам [34]. Анализ выполнен с учётом геометрической и физической нелинейности. В качестве итерационного метода расчёта выбран метод Ньютона-Рафсона в сочетании с техникой корректирующих дуг Рикса (инкрементальная процедура) [35]. Нагрузочные штампы моделировали жесткими пластинами типа «дискретное твердое тело, элемент R3D4». Нагружение штампов выполнено сосредоточенной нагрузкой через референтную точку. Взаимодействие между штампами и верхней полкой элемента осуществлено через контакт типа «поверхность с поверхностью» с наличием силы трения. Для описания стали была принята теория пластичности фон-Мизеса и правило изотропного упрочнения. Для образцов, в которых отсутствовали данные для модуля упругости и коэффициент Пуассона, их значения были приняты равными общепринятым значениям $E=210$ ГПа и $\nu=0.3$ соответственно.

Обзор и рекомендации по назначению параметров численных моделей представлены в статьях [36, 37]. Далее представлены основные параметры численных моделей, для которых выполнена верификация на основании экспериментальных данных.

Выбор типа КЭ элементов. Для элементов стальных конструкций целесообразным является применение оболочечных конечных элементов. В качестве базового элемента построения сечения балок был выбран конечный элемент S4 - универсальный оболочечный элемент с конечными мембранными деформациями и с полным интегрированием. Альтернативно выполнен анализ для конечного элемента S4R - универсального оболочечного элемента с редуцированной схемой интегрирования. Также для сравнительного анализа были выбраны трехмерные твердотельные двадцатиузловые элементы C3D20 (с полным интегрированием) и C3D20R (с редуцированной схемой интегрирования). Расхождение значений предельной нагрузки между КЭ моделями составило порядка 2%, однако создание и расчёт моделей с объемными конечными элементами значительно усложняется. Аналогичные результаты представлены в работах [24, 36-38].

Модели материала. Прочностные характеристики, в первую очередь предел текучести - один из наиболее важных параметров, влияющих на поведение элемента и его несущую способность. Помимо значения прочностных характеристик, важную роль выполняет диаграмма деформирования стали и, как следствие, модель материала, используемая в КЭ модели. Для анализа рассмотрены следующие варианты модели материала:

- билинейная без деформационного упрочнения;
- билинейная с деформационным упрочнением с уклоном $E/100$;
- четырехлинейная модель материала в соответствии со Шведским нормативным документом BSK 07 [39];
- четырехлинейная модель материала согласно источнику Yun X. [40];
- на основании результатов испытания.

На рисунке 1 показаны характерные виды зависимостей «нагрузка-перемещение» для разных моделей материала.

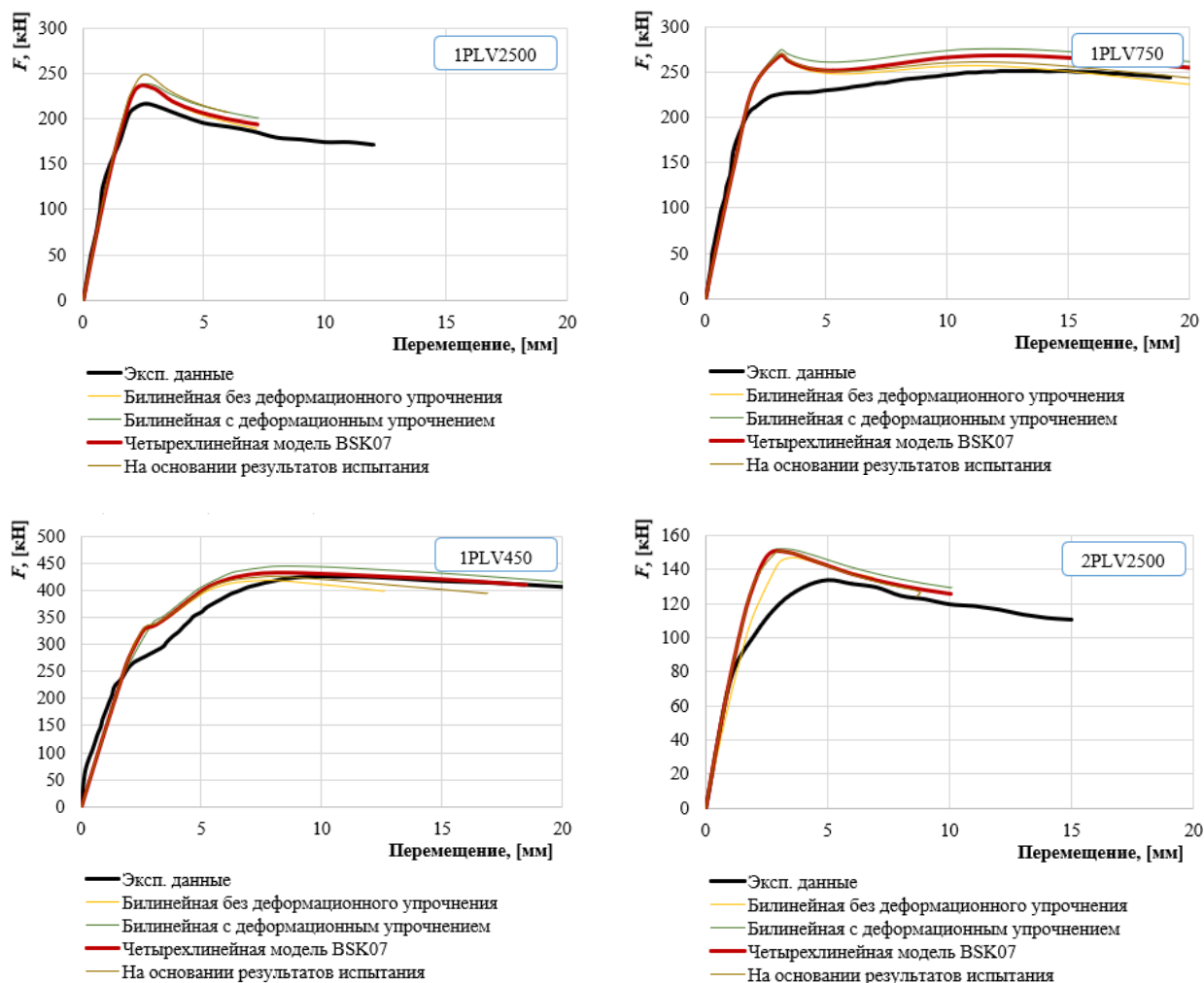


Рисунок 1 – Зависимости «нагрузка-перемещение» для разных моделей стали

Размер конечного элемента. Исследование плотности сетки следует использовать, чтобы показать, что выбранный размер сетки и тип элемента являются точными для анализируемой задачи, и дискретизация существенно не влияет на результаты расчета. Обычно ожидается, что плотность сетки, соответствующая разнице в 5% с конвергентным значением величины отклика системы, обеспечит хорошее приближение. Для анализа влияния размера конечного элемента на результаты расчета и разработки рекомендаций по назначению размеров КЭ выполнены расчеты моделей при разных размерах конечного элемента. Анализ выполнен в графическом виде путем сравнения влияния размера конечного элемента на значение критической силы потери устойчивости и на предельную силу с учетом геометрической и физической нелинейности. Выборочные результаты выполненного исследования чувствительности сетки представлены на рисунке 2. Применяемый размер сетки представлен на горизонтальной оси, на вертикальной оси представлены значения предельной нагрузки (наибольшее значение на графике деформирования) и критической нагрузки. Результаты обеих величин отклика системы показывают, что уменьшение размера сетки приводит к уменьшению предельной или критической нагрузки.

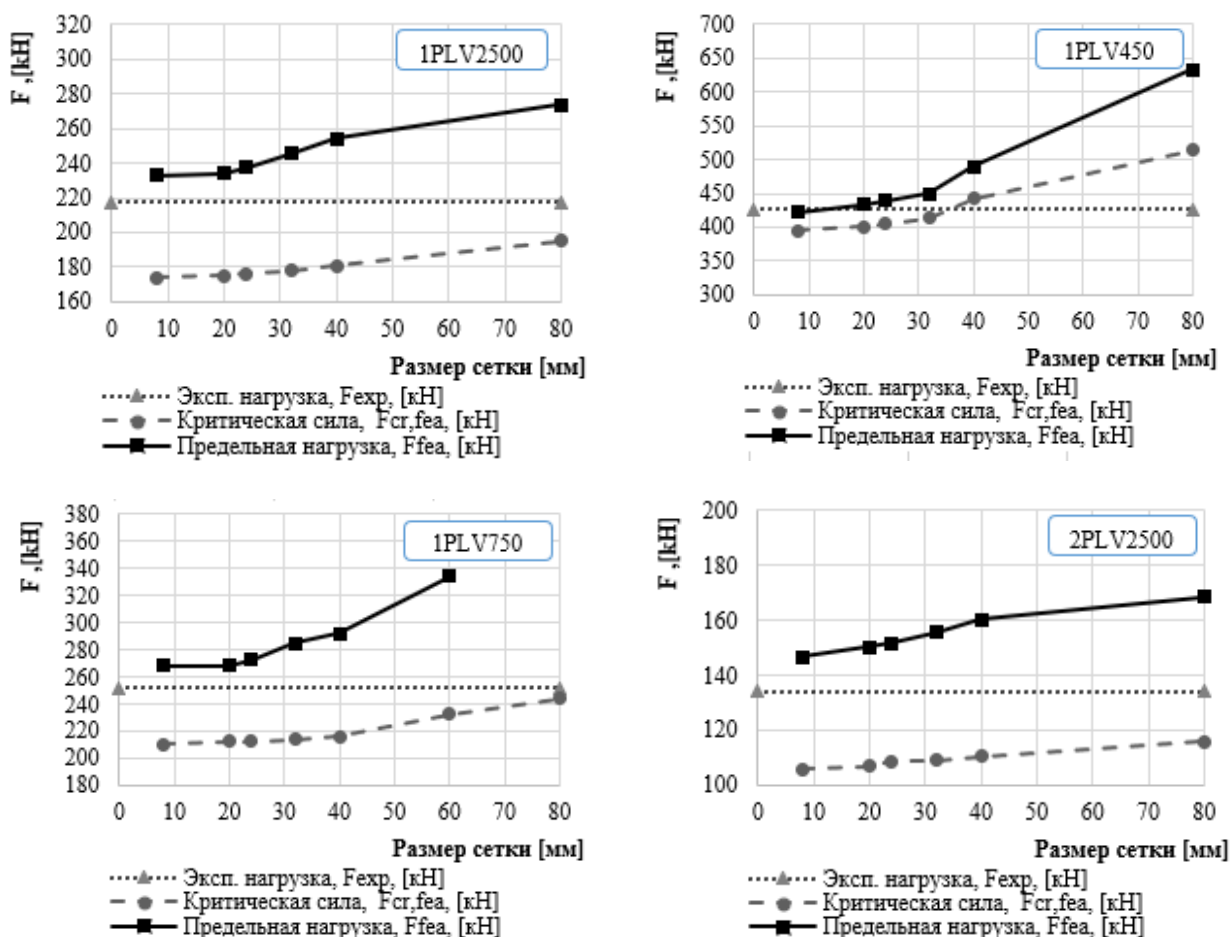


Рисунок 2 – Влияние размера конечного элемента на значение критической и предельной нагрузки

Форма несовершенства. Выполнены расчеты для разных форм упругой потери устойчивости (см. рисунок 3) и их анализ показал, что в качестве базовой модели можно использовать несовершенства по первой форме потери устойчивости. Однако в процессе анализа выяснено несколько интересных особенностей:

а) в первую очередь важна не сама форма и значение несовершенства (хотя они тоже важны), а собственно наличие несовершенств, т.е. наиболее важно их задать. В большинстве случаев несовершенство выступает инициатором начала искривления, потери устойчивости стенки (на рисунке 3 видно, что поведение элемента и значение несущей способности без несовершенства очень сильно отличается от экспериментального);

б) интересная ситуация отмечена для нескольких элементов, нагруженных локальной нагрузкой. В процессе нагружения происходило изменение формы деформирования стенки с С-образной на S-образную. Для такой формы отказа лучше подходит задание несовершенства по S-образной форме. Например, для балки 1VLP750 при задании несовершенств по С-образной форме (первая форма потери устойчивости) на графике деформирования четко заметен «перещелк» формы деформирования стенки (острие на графике). При задании несовершенств в S-образной форме (вторая форма) график более пологий и ближе соответствует экспериментальному. Следует также отметить, что фактически замеренные искривления стенки были по S-образной форме;

в) комбинация форм потери устойчивости позволяет более точно достичь соответствия экспериментальному поведению элемента. Например, для балки 1VPL450 несовершенства, заданные по комбинации форм, позволили получить более точное соответствие экспериментальному поведению элемента. Формы комбинировали таким

образом, чтобы несовершенства были во всех отсеках. Задание несовершенств во всех отсеках представляет собой консервативный подход в оценке несущей способности.

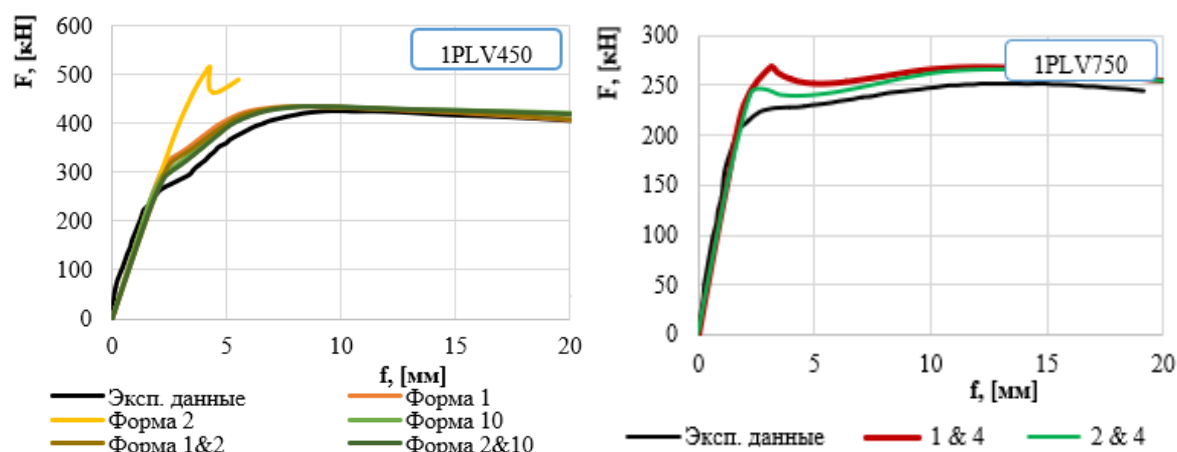


Рисунок 3 – Влияние форм несовершенств

Амплитуда эквивалентных (условных) геометрических несовершенств. Для рассматриваемых моделей несущей способности доминирующим несовершенством является отклонение стенки отсека из плоскости. Для анализа влияния значения несовершенств (значения выгиба стенки балки) были рассмотрены несколько значений (0, 1/500, 1/300, 1/200, 1/150, 1/100). Результаты представлены на рисунке 4.

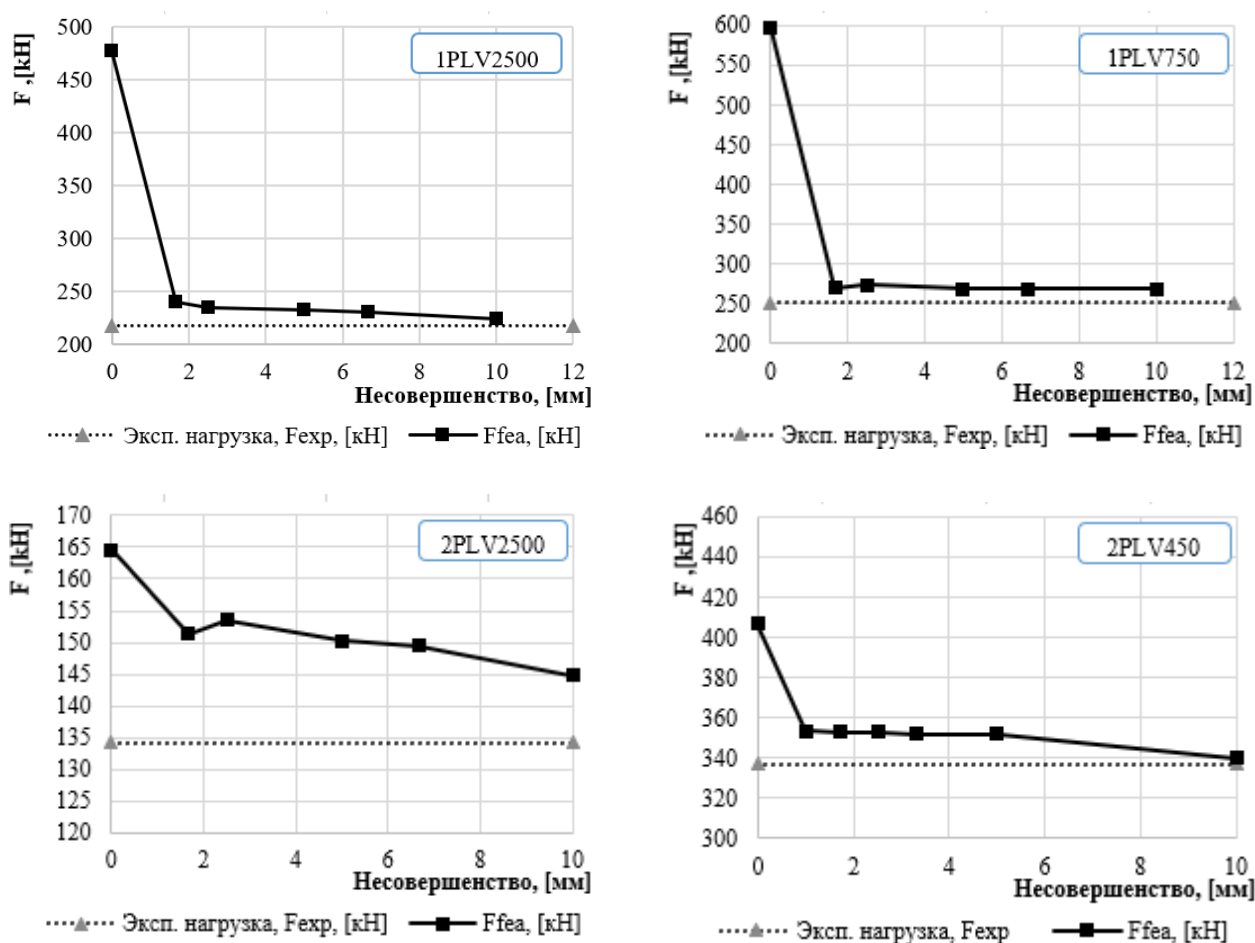


Рисунок 4 – Влияние значения несовершенства

Для рассматриваемых случаев анализ влияния направления несовершенств показал, что направление несовершенства не влияет на поведение и значение отклика, что является ожидаемым для симметричных условий. Однако для общих случаев следует проверять влияние направления несовершенства.

Результаты исследования

На основе выполненного анализа влияния основных параметров численной модели на результаты установлены общие тренды и взаимосвязи, однако для развития указаний по формату проверки безопасности необходимо оценить статистические характеристики погрешности результата численного моделирования и в дальнейшем учесть их при калибровке частных коэффициентов надёжности [20]. Для анализа было выделено 14 различных наборов параметров моделирования, чтобы охарактеризовать всеобъемлющую вероятностную модель для случайной величины погрешности численного моделирования несущей способности. Конкретный набор параметров для численной модели собирает варианты, связанные с видом диаграммы деформирования стали, размером конечного элемента, значением несовершенства. Для базовой модели (обозначена под №1) были назначены следующие параметры: Модель материала: мультилинейная зависимость с площадкой текучести и стадией самоупрочнения [39]; Несовершенства: форма несовершенства назначена на основании форм потери устойчивости, и значение выгиба в максимальной точке принято равным $h_w/100$; Размер и тип КЭ: размер конечного элемента принят равным пяти толщинам стенки сечения ($5t_w$). Тип КЭ – универсальный оболочечный элемент с конечными мембранными деформациями и с полным интегрированием - S4, пять точек интегрирования по толщине оболочки; нелинейный анализ: полный метод Ньютона-Рафсона, метод длины дуги.

Для других анализируемых моделей изменяли только один параметр по отношению к базовой модели № 1: для модели № 2 – билинейная зависимость без стадии самоупрочнения; для модели № 3 – мультилинейная зависимость с площадкой текучести и стадией самоупрочнения [40]; для модели № 4 – билинейная зависимость со стадией самоупрочнения с уклоном $E/100$; для модели № 5 – размер КЭ равен $2t_w$; для модели № 6 – размер КЭ равен $6t_w$; для модели № 7 – размер КЭ равен $8t_w$; для модели № 8 – размер КЭ равен $10t_w$; для модели № 9 – размер КЭ равен $20t_w$; для модели № 10 – значение несовершенства 0; для модели № 11 – значение несовершенства $h_w/300$; для модели № 12 – значение несовершенства $h_w/200$; для модели № 13 – значение несовершенства $h_w/75$; для модели № 14 – значение несовершенства $h_w/50$.

Погрешность моделирования оценена как отношение экспериментального значения F_{exp} к значению, вычисленному с помощью численной модели F_{fea} , т.е. $\theta_{i,j} = F_{exp,j} / F_{fea,i,j}$, (индекс i – номер численной модели, индекс j – номер эксперимента). Далее для вектора значений погрешности моделирования вычислены среднее значение μ и коэффициент вариации V (значения представлены в последних двух строках таблицы 2).

Полученные статистические характеристики подтверждают вышеотмеченные закономерности и дополняют их в следующем:

- среднее значение и коэффициент вариации погрешности моделирования находятся в диапазоне значений 0.89-1.03 и 6.5-8.5%. Среднее значение и коэффициент вариации, вычисленные по всем моделям, равны 0.95 и 10% соответственно.

- модель № 10 (отсутствие несовершенства) не может быть использована для оценки несущей способности, так как не отражает поведение испытанных образцов;

- при увеличении размера конечного элемента от $2t_w$ до $10t_w$ среднее значение уменьшается, однако стоит отметить, что коэффициент вариации изменяется не существенно, поэтому в этих пределах размеров КЭ можно учесть изменчивость за счет частного коэффициента. Однако при замерах КЭ $20t_w$ (модели № 9) результаты расчётов становятся сильно не предсказуемыми (среднее значение 0.81, коэффициент вариации 8.6%).

Таблица 2 – Погрешность (неопределенность) моделирования для разных наборов параметров численных моделей несущей способности

Шифр	F _{exp} , кН	№1, $\theta_{1,j}$	№2, $\theta_{2,j}$	№3, $\theta_{3,j}$	№4, $\theta_{4,j}$	№5, $\theta_{5,j}$	№6, $\theta_{6,j}$	№7, $\theta_{7,j}$	№8, $\theta_{8,j}$	№11, $\theta_{11,j}$	№12, $\theta_{12,j}$	№13, $\theta_{13,j}$	№14, $\theta_{14,j}$
SP600	846.0	1.00	1.00	1.00	0.99	1.01	0.99	0.97	0.94	0.98	0.98	1.03	1.08
SP1200	1030	0.99	1.03	0.98	0.90	1.01	0.98	0.97	0.89	0.96	0.99	1.01	0.97
G1	132.2	0.99	1.03	1.02	0.94	1.01	0.98	0.97	0.90	0.99	0.96	1.03	1.04
G2	158.9	0.86	0.87	0.85	0.85	0.88	0.85	0.84	0.77	0.83	0.84	0.89	0.87
G3	206.3	0.98	1.07	1.05	0.96	1.00	0.97	0.96	0.86	0.96	0.96	1.02	1.02
G4	249.2	1.00	1.14	1.00	0.99	1.02	0.99	0.98	0.91	0.97	0.98	1.04	1.00
G5	274.2	0.95	1.00	0.98	0.88	0.97	0.95	0.94	0.87	0.94	0.94	0.97	1.01
G6	301.4	0.95	1.03	0.99	0.91	0.97	0.95	0.94	0.91	0.93	0.96	0.98	0.96
1VPL2500	217.2	0.93	0.93	0.93	0.91	0.93	0.91	0.88	0.85	0.91	0.93	0.94	0.97
1VPL1500	195.7	1.03	1.06	1.04	1.03	1.05	1.02	1.00	0.95	1.01	1.03	1.03	1.09
1VPL750	251.8	0.90	0.97	0.90	0.87	0.92	0.90	0.89	0.82	0.88	0.89	0.92	0.92
1VPL450	426.0	0.98	1.02	0.99	0.96	1.01	0.97	0.95	0.87	0.98	0.98	0.98	0.98
2VPL2500	134.3	0.89	0.91	0.89	0.88	0.91	0.88	0.86	0.84	0.89	0.87	0.90	0.93
2VPL1500	126.2	0.94	0.96	0.94	0.89	0.96	0.93	0.92	0.86	0.93	0.91	0.96	0.97
2VPL750	190.9	0.98	1.01	0.99	0.93	1.00	0.97	0.96	0.86	0.95	0.96	0.99	0.98
2VPL450	337.0	0.96	0.98	0.95	0.91	0.98	0.95	0.92	0.90	0.95	0.96	0.96	0.99
P200	544.0	1.01	1.08	1.05	0.95	1.03	1.00	0.99	0.92	1.00	1.00	1.04	1.00
P700	660.0	0.97	1.01	1.00	0.94	0.99	0.96	0.95	0.91	0.96	0.97	0.99	0.96
P1440	808.0	0.90	0.91	0.88	0.81	0.90	0.87	0.87	0.81	0.87	0.88	0.90	0.90
G6 T1	515.0	0.92	0.98	0.96	0.92	0.94	0.91	0.90	0.84	0.90	0.91	0.96	0.97
G6 T2	666.0	0.99	1.05	0.99	0.94	1.00	0.97	0.97	0.92	0.96	0.99	0.99	1.08
G6 T3	785.9	1.05	1.06	1.05	1.03	1.07	1.04	1.03	0.93	1.03	1.04	1.09	1.16
G7 T1	621.6	0.90	0.93	0.91	0.88	0.92	0.90	0.88	0.84	0.88	0.90	0.93	0.94
G1	282.4	1.06	1.20	1.06	1.08	1.09	1.06	1.04	0.98	1.04	1.04	1.10	1.12
G2	332.5	1.14	1.18	1.14	1.05	1.16	1.13	1.12	1.06	1.11	1.12	1.16	1.21
G3	337.4	0.90	1.00	0.90	0.81	0.91	0.89	0.88	0.79	0.87	0.89	0.91	0.94
G4	268.8	0.91	1.00	0.93	0.78	0.92	0.90	0.89	0.83	0.89	0.91	0.92	0.99
G5	286.4	0.90	0.91	0.90	0.83	0.92	0.89	0.88	0.81	0.88	0.89	0.92	0.97
G6	312.8	0.90	0.99	0.91	0.84	0.92	0.90	0.88	0.79	0.88	0.90	0.93	0.94
G7	258.9	0.97	0.98	0.97	0.98	0.99	0.96	0.95	0.86	0.96	0.96	0.98	1.02
G8	276.5	0.94	1.02	0.95	0.95	0.96	0.93	0.92	0.84	0.92	0.94	0.96	1.00
G9	161.8	1.05	1.16	1.06	0.91	1.07	1.04	1.03	0.95	1.02	1.02	1.08	1.00
G10	194.6	0.96	1.01	0.92	0.97	0.98	0.94	0.94	0.89	0.94	0.96	0.97	1.01
PG1-1S	373.0	0.89	0.92	0.88	0.86	0.90	0.88	0.87	0.78	0.86	0.88	0.91	0.94
PG1-1P	220.0	0.97	1.07	0.98	0.95	0.99	0.96	0.95	0.91	0.93	0.96	1.00	1.05
PG1-2SP1	205.0	0.95	0.96	0.95	0.93	1.00	0.94	0.94	0.92	0.92	0.91	0.96	0.99
PG1-2SP2	208.0	0.94	0.97	0.94	0.85	0.96	0.93	0.92	0.84	0.92	0.92	0.94	0.95
PG1-3SP1	175.0	0.96	0.98	0.96	0.91	0.98	0.95	0.94	0.90	0.95	0.96	0.98	0.99
PG1-3SP2	186.0	1.02	1.10	1.02	1.01	1.04	1.01	1.00	0.90	1.01	1.01	1.05	1.06
PG2-1S	271.0	0.93	1.00	0.95	0.94	0.95	0.92	0.91	0.87	0.90	0.93	0.95	0.94
PG2-1P	113.0	1.02	1.28	1.01	0.95	1.04	1.01	1.00	0.97	0.99	1.02	1.03	1.07
PG2-2SP1	51.0	1.02	1.15	1.01	1.09	1.04	1.01	1.00	0.96	1.01	1.02	1.06	1.05
PG2-2SP2	25.0	0.91	0.94	0.91	0.82	0.92	0.90	0.89	0.82	0.89	0.90	0.93	0.91
PG2-3SP1	74.0	0.87	0.93	0.86	0.80	0.89	0.86	0.85	0.82	0.85	0.88	0.91	0.89
PG2-3SP2	16.0	0.94	0.99	0.99	0.95	0.97	0.93	0.93	0.85	0.92	0.92	0.96	1.00
PG3-1S	202.0	1.05	1.22	1.06	0.94	1.06	1.04	1.03	0.94	1.05	1.03	1.05	1.08
PG3-1P	120.0	1.01	1.12	1.01	0.91	1.04	1.01	0.99	0.91	0.99	1.00	1.02	1.03
PG3-2SP1	36.0	1.10	1.11	1.09	1.08	1.12	1.09	1.08	1.02	1.10	1.07	1.12	1.14
PG3-2SP2	110.0	0.98	1.07	1.01	0.94	1.00	0.97	0.96	0.89	0.96	0.98	1.01	1.01
PG3-3SP1	60.0	1.03	1.05	1.01	0.96	1.05	1.02	1.01	0.93	1.01	1.03	1.05	1.03
PG3-3SP2	106.0	1.00	1.03	1.02	0.99	1.03	0.99	0.98	0.89	0.99	0.99	1.03	1.10
		0.97	1.03	0.98	0.93	0.99	0.96	0.95	0.89	0.95	0.96	0.99	1.00
	V, %	6.4	8.4	6.6	7.9	6.4	6.5	6.6	6.8	6.8	6.4	6.6	7.3

В результате выполненного анализа можно дать следующие рекомендации по назначению параметров численных моделей несущей способности:

- для диаграммы деформирования стали рекомендуется использовать билинейную зависимость без деформационного упрочнения как консервативную оценку или мультилинейную зависимость с площадкой текучести и со стадией самоупрочнения как наиболее точно отражающую поведение и значение несущей способности. Расхождение результатов численных моделей с использованием разных четырехлинейных зависимостей составило порядка 2%, что свидетельствует о том, что все рассмотренные четырехлинейные модели материала являются применимыми для решения данной задачи. Билинейная зависимость без площадки текучести и со стадией упрочнения приводит к завышению несущей способности, поэтому ее не рекомендуется использовать;

- результаты работы доказывают важность проверки ошибок дискретизации, поскольку значения как предельных, так и критических нагрузок являются небезопасными при применении слишком больших размеров сетки КЭ, поэтому во всех случаях рекомендуется выполнять проверку сеточной сходимости по критерию значения предельной или критической силы. Показано, что для снижения трудозатрат анализ сеточной сходимости можно выполнять по критерию «упругая критическая сила»;

- оптимальный размер конечного элемента зависит, в том числе, от используемого расчётного комплекса, т.е. от особенностей реализации типа конечного элемента, поэтому в этом вопросе трудно дать какие-либо универсальные численные указания. На основании выполненного анализа можно утверждать, что для мощных расчётных комплексов, таких как Abaqus и Ansys, оптимальный размер конечного элемента составляет 5-10 толщин стенки, и во всех случаях увеличение размера конечного элемента влияет в неблагоприятную сторону, т.е. происходит завышение значения предельной нагрузки. Интересным фактом является то, что до определённого размера КЭ, ориентировочно до $10t_w$, результаты сохраняют стабильность, т.е. коэффициент вариации практически не изменяется. Для практического применения данное обстоятельство означает, что повышенное значение предельной нагрузки можно понизить с помощью постоянного числа (в рассматриваемых случаях при $10t_w$ равно 1.1) и при этом не произойдёт искажений в поведении элемента. Однако, при очень больших размерах конечных элементов, более $20t_w$, погрешность моделирования существенно увеличивается, а в некоторых случаях изменяются поведение элемента и форма отказа. Применение объёмных элементов не приводит к существенному увеличению точности модели. Выбор размера конечного элемента может также быть основан на длине зоны выпучивания при потере устойчивости, для сходимости результатов необходимо порядка 10 и более размеров на волну потери устойчивости, однако такой способ трудно автоматизировать, поэтому его рекомендуется использовать в качестве дополнительного. В ряде случаев может быть полезно использовать сгущение сетки в зоне локализации наибольших напряжений (деформаций), однако такой способ более трудоемкий и требует итерационного процесса;

- анализ влияния форм и значений несовершенств на поведение и значения несущей способности показал, что важно само наличие (задание) несовершенства, данное несовершенство выступает инициатором потери устойчивости стенки. Выполненное исследование показало ограниченную чувствительность поведения стальных элементов к значению несовершенства (необходимо само наличие несовершенства). Для большинства случаев верифицированных расчётов влияние формы и значения несовершенств составляет до 5%, в отдельных случаях наблюдается увеличение разброса до 10%, характерное для элементов с гибкими стенками, подверженных преобладающему воздействию локальной нагрузки.

- целесообразно задавать несовершенство со значением в диапазоне $b/200 \dots b/100$, где b – расчетный размер отсека. В качестве базового значения рекомендуется использовать $b/100$ (это значение позволяет получить чуть более консервативные результаты). При малых величинах (меньше $a/250$) в ряде случаев решение становится не стабильным. При больших значениях несовершенств несущая способность занижается, при этом несовершенства более $b/100$ не соответствуют требованиям к точности изготовления, поэтому такие значения

следует считать маловероятными. Направление несовершенства следует применять с целью достижения минимального значения несущей способности.

– что касается формы несовершенства, то наиболее универсальным является задавать несовершенства на основе первой формы потери устойчивости. В ряде случаев более точным является учет последующих форм и нескольких форм потери устойчивости (чтобы несовершенства присутствовали во всех отсеках балки), однако следует избегать сильно нереалистичных сценариев. При этом формы потери устойчивости не должны комбинироваться, если они значительно увеличивают выгиб в конкретном одном локальном месте. В качестве базового способа задания несовершенства рекомендуется метод, основанный на собственных формах потери устойчивости. Анализ других способов задания несовершенств представлен в статьях [9, 36] (расхождение результатов предельной нагрузки между КЭ моделями составило порядка 3%), выбранный способ более перспективен также с позиции автоматизации расчётов;

– в качестве итерационного метода анализа рекомендуется применять метод Ньютона-Рафсона в сочетании с техникой длин дуг, в частности, рекомендуется использовать технику корректирующих дуг Рикса (итерационная и инкрементальная процедура решения нелинейной задачи).

Для более всестороннего изучения погрешности численной модели была расширена база данных за счёт результатов исследований, представленных в литературных источниках. Далее представлено краткое описание моделей, используемых в источниках:

– источник [23]. **Модель материала:** четырёхлинейная на основании [39]; **Несовершенства:** измеренные форма и значения; **Размер КЭ:** в качестве критерия для выбора размера конечного элемента принят размер полутолщины потери устойчивости. Шесть КЭ для линейной функции формы (Shell 181) на длине полутолщины потери устойчивости и четыре КЭ в случае использования квадратичной функции формы (Shell 281). **Тип КЭ:** анализировались два типа оболоченных элементов Shell 181 и Shell 281; **Другое:** Ansys, полный метод Ньютона-Рафсона, метод длины дуги. Сварочные напряжения не учитывались. Назначено пять точек интегрирования по толщине листа.

– источник [24]. **Модель материала:** критерий текучести Мизеса, правило изотропного упрочнения; **Несовершенства:** по первой форме потери устойчивости с измеренными значениями; **Размер КЭ:** на основании анализа сходимости, около 25 мм (соответствует 4 толщинам стенки); **Тип КЭ:** S4R; **Другое:** Abaqus, сварные напряжения были учтены.

– источник [1]. **Модель материала:** идеально упруго-пластичный материал; **Несовершенства:** первая форма потери устойчивости с амплитудой $h_w / 200$; **Размер КЭ:** нет критерия, около 10 мм (локальная нагрузка), около 50 мм (сдвиг, изгиб); **Тип КЭ:** Shell 181; **Другое:** Ansys, модифицированный метод Рикса, сварочные напряжения не учитывались.

– источник [2]. **Модель материала:** критерий текучести Мизеса, правило изотропного упрочнения, диаграмма деформирования включала три линейных участка (i) до предела текучести с модулем упругости равным 210 ГПа, (ii) до предела прочности (соответствует деформации 10%) с пониженным модулем упругости, (iii) идеально пластичный после достижения предельного напряжения; **Несовершенства:** три разных способа. Первый принят по синусоиде с амплитудой $h_w / 200$, второй – по первой форме потери устойчивости с амплитудой $h_w / 200$, третий – по фактически замеренным несовершенствам. Также выполнено сравнение двух значений несовершенств $h_w / 500$ и $h_w / 200$; **Размер КЭ:** критерия нет, около 20...25 мм; **Тип КЭ:** Shell 181; **Другое:** Ansys, метод решения Ньютона-Рафсона, сварочные напряжения не учитывались.

– источник [3]. **Модель материала:** идеально упруго-пластичный материал с использованием критерия текучести Мизеса; **Несовершенства:** выполнено сравнение трех разных способов. Первый – по синусоиде с амплитудой $h_w / 200$, второй – по первой форме потери устойчивости с амплитудой $h_w / 200$, третий – по фактически замеренным несовершенствам. Также были учтены несовершенства продольного ребра жесткости с

амплитудой $L / 400$; **Размер КЭ**: критерия нет, около 20 мм; **Тип КЭ**: Shell 181; **Другое**: Ansys, метод решения Ньютона-Рафсона, сварочные напряжения не учитывались.

– источник [4]. **Модель материала**: мультилинейная модель упругопластического материала с использованием критерия текучести фон Мизеса. Диаграмма деформирования включала четыре линейных участка (i) до предела текучести с модулем упругости, равным 210 ГПа, (ii) площадка текучести протяжённостью 1% (iii) до предела прочности (соответствует деформации 15%) с пониженным модулем упругости, (iiii) идеально пластичный после достижения предельного напряжения; **Несовершенства**: выполнено сравнение трех разных способов. Первый – по синусоиде с амплитудой $h_w / 200$, второй – по первой форме потери устойчивости с амплитудой $h_w / 200$, третий – по фактически замеренным несовершенствам. Также были учтены несовершенства продольного ребра жесткости с амплитудой $L / 400$; **Размер КЭ**: критерия нет, около 20 мм; **Тип КЭ**: Shell 181; **Другое**: Ansys, методы решения Ньютона-Рафсона, сварочные напряжения не учитывались.

– источник [5]. **Модель материала**: четырехлинейная на основании [39]; **Несовершенства**: измеренные, по полуволне и волне синусоиды, на основании первой формы потери устойчивости, учтены несовершенства элементов рёбер жёсткости; **Размер КЭ**: критерия нет, около 20 мм; **Тип КЭ**: Shell 181; **Другое**: Ansys, метод решения Ньютона-Рафсона, сварочные напряжения не учитывались.

– источник [6]. **Модель материала**: кривая испытания образцов, преобразованная в истинные напряжения и деформации; **Несовершенства**: на основании замеров формы и амплитуды; **Размер КЭ**: 5 мм (около толщины стенки), на основании анализа сходимости; **Тип КЭ**: S4; **Другое**: Abaqus, модифицированный метод Рикса, сварочные напряжения не учитывались.

– источник [7]. **Модель материала**: линейная зависимость напряжения от деформации предполагалась до предела текучести (f_{yw}), после чего материал переходит в идеально-пластическое поведение вплоть до начала деформационного упрочнения, связанного с деформацией 1%. Деформационное упрочнение до предела прочности, соответствующего деформации 10%; **Несовершенства**: на основании форм потери устойчивости со значениями, подогнанными по эксперименту; **Размер КЭ**: 5 мм (около 1-2 толщин стенки), на основании анализа сходимости; **Тип КЭ**: S4R; **Другое**: Abaqus, модифицированный метод Рикса, сварочные напряжения не учитывались.

– источник [8]. **Модель материала**: на основании испытания образцов; **Несовершенства**: измеренные форма и значение; **Размер КЭ**: критерия нет, анализ выполнен для двух размеров 40 мм (около 6.5 толщин стенки) и 25 мм (около 4.1 толщин стенки). Оба размера показали хорошую сходимость с экспериментом; **Тип КЭ**: S4R; **Другое**: Abaqus, сварочные напряжения не учитывались.

– источник [10]. **Модель материала**: измеренная диаграмма напряжений–деформаций была преобразована в виде истинных напряжений и логарифмических деформаций; **Несовершенства**: $\min(h_w / 400, a / 400)$; **Размер КЭ**: $h_w / 40$ (около 37 мм, около $5 \dots 7 t_w$); **Тип КЭ**: S4R; **Другое**: Abaqus, сварочные напряжения не учитывались.

– источник [11]. **Модель материала**: билинейная зависимость со стадией самоупрочнения $E/100$, как материал Мизеса с правилом изотропного упрочнения; **Несовершенства**: по первой форме потери устойчивости, со значениями, измеренными в экспериментальных образцах; **Размер КЭ**: на основании анализа сходимости, 4 КЭ на ширину гофры (от 30 до 50 мм, от $6 t_w$ до $15 t_w$), 6 КЭ на ширину полки (от 40 мм до 60 мм, от 3.5 до $3.5 t_f$); **Тип КЭ**: S8R5; **Другое**: Abaqus, сварочные напряжения не учитывались, модифицированный метод Рикса.

– источник [12]. Описание КЭ модели представлено в ограниченном виде, сделана ссылка на источник [41], который автору статьи не удалось найти в свободном доступе и изучить.

Статистический анализ данных, представленных в таблице 3, показал, что среднее значение и коэффициент вариации погрешности моделирования равны 1.0 и 4.5%, соответственно. Следует отметить, что данные работы, как правило, были направлены на подгонку численных моделей по экспериментальным данным для дальнейших параметрических исследований.

Таблица 3 – Погрешность моделирования на основе литературных источников

№ п/п	Источник	На основе	Шифр	F_{exp} , кН	F_{fea} , кН	$F_{\text{exp}} / F_{\text{fea}}$	№ п/п	Источник	На основе	Шифр	F_{exp} , кН	F_{fea} , кН	$F_{\text{exp}} / F_{\text{fea}}$
1	[1]	[42]	B3-3	70.5	77.1	0.915	58	[8]	[8]	G3	1412	1412	1.000
2	[1]	[42]	B3-7	90.7	88.7	1.022	59	[8]	[8]	G4	1591	1500	1.061
3	[1]	[42]	B3-12	111.3	115.9	0.961	60	[4]	[4]	1	754.2	748.7	1.007
4	[1]	[42]	B3-20	130.6	135.2	0.966	61	[4]	[4]	2	956.5	915.7	1.045
5	[1]	[43]	LS1	808	811	0.996	62	[4]	[4]	3	764.8	756.6	1.011
6	[1]	[44]	H1-T1	2542	2413	1.053	63	[4]	[4]	4	949	941.9	1.008
7	[1]	[45]	G8	996	973	1.024	64	[4]	[4]	5	1192	1131	1.054
8	[1]	[46]	T01-4	535	515.8	1.037	65	[4]	[4]	6	1119	1079	1.037
9	[1]	[46]	T02-4	480	456.3	1.052	66	[4]	[4]	7	1077	1047	1.029
10	[1]	[46]	T03-4	500	488.3	1.024	67	[4]	[4]	8	1263	1239	1.019
11	[1]	[46]	VT03-4	715	649.8	1.100	68	[4]	[4]	9	1220	1193	1.023
12	[1]	[46]	VT05-4	410	404.7	1.013	69	[4]	[4]	10	1090	1074	1.014
13	[1]	[47]	PG1-2SP1	205	204.4	1.003	70	[4]	[4]	11	1281	1245	1.029
14	[1]	[47]	PG1-2SP2	208	206.5	1.007	71	[4]	[4]	12	772.4	732.1	1.055
15	[1]	[47]	PG3-3SP2	106	109.7	0.966	72	[25]	[25]	G1	132.2	143.1	0.924
16	[1]	[47]	PG4-3SP2	44	43.6	1.009	73	[25]	[25]	G2	158.9	162.1	0.980
17	[1]	[47]	PG5-1BSP	79	83.7	0.944	74	[25]	[25]	G3	206.3	201.2	1.025
18	[2]	[23]	SP1200	1030	1013	1.017	75	[25]	[25]	G4	249.2	254.6	0.979
19	[23]	[23]	SP1200	1030	1027	1.003	76	[25]	[25]	G5	274.2	264.5	1.037
20	[23]	[23]	SP600	846	892	0.948	77	[25]	[25]	G6	301.4	300.2	1.004
21	[3]	[5]	I	659	636.8	1.035	78	[24]	[24]	P200	544	540	1.007
22	[3]	[5]	II	1034	1075	0.962	79	[24]	[24]	P660	660	678	0.973
23	[3]	[5]	III	949	909.7	1.043	80	[24]	[24]	P808	808	833	0.970
24	[5]	[5]	I	659	657	1.003	81	[48]	[48]	1a	727	710	1.024
25	[5]	[5]	II	1034	1010	1.024	82	[48]	[48]	1b	790	778	1.015
26	[5]	[5]	III	949	914	1.038	83	[48]	[48]	2a	1209	1298	0.931
27	[6]	[6]	A15	143.3	142.7	1.004	84	[48]	[48]	2b	1250	1300	0.962
28	[6]	[6]	A12	154.6	144.3	1.071	85	[48]	[8]	G1	1453	1494	0.973
29	[6]	[6]	A1	165	166.0	0.994	86	[48]	[8]	G2	1569	1524	1.030
30	[6]	[6]	A11	199	204.1	0.975	87	[48]	[8]	G3	1412	1428	0.989
31	[6]	[6]	A2	215	224.5	0.958	88	[48]	[8]	G4	1591	1468	1.084
32	[6]	[6]	A13	230	242.3	0.949	89	[48]	[8]	G1	1453	1408	1.032
33	[6]	[6]	A14	165.9	148.0	1.120	90	[48]	[8]	G2	1569	1446	1.085
34	[6]	[6]	A4	180	156.8	1.147	91	[48]	[8]	G3	1412	1355	1.042
35	[6]	[6]	A3	183	174.5	1.048	92	[48]	[8]	G4	1591	1408	1.130
36	[6]	[6]	A17	194.3	193.0	1.006	93	[10]	[10]	SO	1934	1991	0.971
37	[6]	[6]	A5	225	227.1	0.991	94	[10]	[10]	SC	2049	2134	0.960
38	[6]	[6]	A6	259	251.7	1.029	95	[10]	[10]	UO	2173	2186	0.994
39	[6]	[6]	A7	255	281.2	0.907	96	[10]	[10]	UC	2087	2125	0.982
40	[6]	[6]	A16	244.6	254.7	0.960	97	[49]	[27]	G6-T1	516	542	0.952
41	[7]	[7]	C-3-0	85.9	86.8	0.990	98	[49]	[27]	G7-T1	623	649	0.960
42	[7]	[7]	C-3-50	107.6	104.2	1.033	99	[49]	[27]	G7-T2	645	649	0.994
43	[7]	[7]	C-3-100	102.9	102.9	1.000	100	[49]	[27]	G8-T1	378	403	0.938
44	[7]	[7]	C-6-150	360.2	358.3	1.005	101	[49]	[27]	G8-T2	445	562	0.792
45	[7]	[7]	C-6-0	239.9	236.3	1.015	102	[49]	[27]	G8-T3	516	562	0.918
46	[7]	[7]	C-6-50	275.9	274.4	1.005	103	[49]	[50]	2.2	75	75	1.000
47	[7]	[7]	C-6-100	300.3	293.5	1.023	104	[49]	[51]	US3/5	90	99	0.909
48	[12]	[12]	nr700ad15	309.2	319.2	0.969	105	[49]	[52]	STG1	60	53	1.132
49	[12]	[12]	r700ad15	327.1	354.6	0.923	106	[49]	[52]	STG4	35	25	1.400
50	[12]	[12]	nr600ad2	260.6	270.8	0.962	107	[49]	[52]	RTG1	40	40	1.000
51	[12]	[12]	r600ad2	262.9	287.8	0.913	108	[49]	[52]	RTG2	41	40	1.025
52	[12]	[12]	nr500ad25	228.0	231.3	0.986	109	[49]	[53]	MSO	94	100	0.940
53	[12]	[12]	r500ad25	236.5	232.5	1.017	110	[49]	[54]	CP1/1	88	88	1.000
54	[12]	[12]	nr400ad32	217.9	210.4	1.036	111	[49]	[55]	S-2	161	158	1.019
55	[12]	[12]	r400ad325	215.3	210.5	1.023	112	[49]	[55]	S-3	198	208	0.952
56	[8]	[8]	G1	1453	1466	0.991	113	[11]	[56]	M12	109.2	112.5	0.971
57	[8]	[8]	G2	1569	1552	1.011	114	[11]	[57]	G7A	242.3	243.8	0.994

Выводы

В статье представлены основные параметры построения численных моделей, верифицированные на основании экспериментальных данных испытаний стальных элементов, включающих, в том числе, механизмы отказа, сопровождающиеся потерей местной устойчивости и изменением стадии работы отсека.

В большинстве случаев погрешностью численной модели пренебрегают, считая численную модель абсолютно точной. Однако, как показал анализ, данная предпосылка в определённой степени справедлива для хорошо подогнанных по экспериментальным данным моделей несущей способности, так как погрешность моделирования по сравнению с неопределённостями, вносимыми другими переменными, мала. Погрешность моделирования, оценённая на основании хорошо подогнанных численных моделей, имеет среднее значение 1.0 и коэффициент вариации 4.5%.

Однако для применения в повседневном проектировании необходимо учитывать погрешность для набора наиболее универсальных параметров [20]. Оценка значений статистических характеристик погрешности КЭ модели при использовании рекомендованных параметров показала, что среднее значение и коэффициент вариации находятся в диапазоне значений 0.9-1.0 и 6.5-8.5%. Анализ также показал ограниченную чувствительность погрешности КЭ модели при задании параметров в диапазонах рекомендуемых значений, что свидетельствует о возможности применения численных моделей для более широкого спектра параметров исполнения конструктивных элементов, нежели чем только верифицированных.

Безусловно статистические характеристики погрешности численной модели зависят от специфики применяемого программного комплекса (типов конечных элементов, методов решения нелинейных задач и т.д.) и рассматриваемого вида напряжённо-деформируемого состояния. Поэтому нужно чётко понимать, что применение принципа проектирования на основе численных моделей несущей способности без должной верификации принципов построения численных моделей и верификации программы конечно-элементного анализа не может быть реализован для применения как в научно-исследовательских задачах, так и в повсеместном проектировании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Graciano C., Ayestará, A. Steel plate girder webs under combined patch loading, bending and shear. *Journal of Constructional Steel Research*. 2013. Vol. 80. Pp. 202-212. doi:10.1016/j.jcsr.2012.09.018.
2. Kövesdi B., Alcaine J., Dunai L., Braun B. Interaction behaviour of steel I-girders Part I: Longitudinally unstiffened girders. *Journal of Constructional Steel Research*. 2014. Vol. 103. Pp. 327-343. doi:10.1016/j.jcsr.2014.06.018.
3. Kövesdi B., Alcaine J., Dunai L., Braun B. Interaction behaviour of steel I-girders; part II: Longitudinally stiffened girders. *Journal of Constructional Steel Research*. 2014. Vol. 103. Pp. 344-353. doi:10.1016/j.jcsr.2014.06.017.
4. Kövesdi B., Kuhlmann U., Dunai L. Combined shear and patch loading of girders with corrugated webs. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2010. Vol. 54(2). Pp. 79-88.
5. Seitz M. Tragverhalten längsversteifter Blechträger unter quergerichteter Krafteinleitung (Longitudinally stiffened girder webs subjected to patch loading). Institute for Structural Design. Universität Stuttgart. 2005.
6. Kovacevic S., Markovic N., Sumarac D., Salatic R. Influence of patch load length on plate girders. Part II: Numerical research. *Journal of Constructional Steel Research*. 2019. Vol. 158. P. 213-229. doi:10.1016/j.jcsr.2019.03.025.
7. Rogač M., Aleksić S., Lučić D. Influence of patch load length on resistance of I-girders. Part-II: Numerical research. *Journal of Constructional Steel Research*. 2021. Vol. 176. Pp. 106-138. doi:10.1016/j.jcsr.2020.106369.
8. Pavlovčič L., Detzel A., Kuhlmann U., Beg D. Shear resistance of longitudinally stiffened panels. Part 1: Tests and numerical analysis of imperfections. *Journal of Constructional Steel Research*. 2007. Vol. 63(3). Pp. 337-350.
9. Nadolski V., Marková J., Podymako V., Sykora M. Pilot numerical analysis of resistance of steel beams under combined shear and patch loading. *Proceedings of conference Modelling in Mechanics 2022*, Technical University of Ostrava. 2021. Pp. 21-29.
10. Sinur F., Beg D. Moment-shear interaction of stiffened plate girders. Tests and numerical model verification. *Journal of Constructional Steel Research*. 2013. Vol. 85. Pp. 116-129. doi:10.1016/j.jcsr.2013.03.007.
11. Riahi F., Behraves A., Fard M. Y., Armaghani A. Shear Buckling Analysis of Steel Flat and Corrugated Web I-girders. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2018. Vol. 22(12). Pp. 5058-5073.
12. Estrada I., Real E., Mirambell E. General behaviour and effect of rigid and non-rigid end post in stainless steel plate girders loaded in shear. Part II: Extended numerical study and design proposal. *Journal of Constructional Steel Research*. 2007. Vol. 63. Pp. 985-996. doi:10.1016/j.jcsr.2006.08.0.

13. Ботян С.С., Жамойдик С.М., Кудряшов В.А., Олесьюк Н.М., Писченков И.А. Оценка огнестойкости стальных строительных конструкций с учетом влияния теплообмена с примыкающими смежными конструкциями // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. 2021. Т. 5. № 3. С. 278-288. doi:10.33408/2519-237X.2021.5-3.278.
14. Надольский В.В. Расчет и конструирование фланцевого соединения элементов прямоугольного сечения, подверженных центральному растяжению. Вестник Полоцкого государственного университета. 2018. № 16. С. 121–130.
15. Саиян С.Г., Паушкин А.Г. Численное параметрическое исследование напряженно-деформированного состояния двутавровых балок с различными типами гофрированных стенок // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 6. С. 676-687.
16. Мартынов Ю.С., Надольский В.В., Верева Ф.А. Стеновые панели на основе кассетных профилей. Часть 1. Теоретические исследования // Строительство и реконструкция. 2019. № 4 (84). С. 26-37.
17. Афенченко Д. С., Петрова Ю. Н., Устинова М. Э., Олейникова Р.Е. Верификация аналитического расчёта несущей способности перфорированного стержня средствами конечно-элементного комплекса // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. 2019. № 4. С. 118-129.
18. Надольский В.В. Неопределенности расчетных моделей сопротивления стальных конструкций // Вестник Полоцкого государственного университета. 2016. № 8. С. 66–72.
19. Sýkora M., Marková J., Nadolski V. Application of Semi-Probabilistic Methods to Verification of Series System. Transactions of the Technical University of Ostrava, Civil Engineering Series. 2021. Vol. 21/2. Pp. 80–85. doi:10.35181/tces-2021-0018.
20. Тур В.В., Надольский В.В. Концепция проектирования строительных конструкций на основе численных моделей сопротивления // Строительство и реконструкция. 2022. № 6 (104). С. 78-90. doi:10.33979/2073-7416-2022-104-6-78-90.
21. Надольский В.В. Анализ расчетных моделей сопротивления локальной нагрузке стальных элементов // Вестник БрГТУ. 2016. № 1(97). С. 167–171.
22. Надольский В.В. Надежность стального элемента при потере местной устойчивости стенки // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 5. С. 569–579. doi:10.22227/1997-0935.2022.5.569-579.
23. Braun B. Stability of steel plates under combined loading. Mitteilungen. Institut für Konstruktion und Entwurf der Universität Stuttgart. 2010. 226 p.
24. Gozzi J. Patch loading resistance of plated girders - ultimate and serviceability limit state : Doctoral Thesis. Sweden, Luleå University of Technology. 2007.
25. Hansen T. Theory of Plasticity for Steel Structures - Solutions for Fillet Welds, Plate Girders and Thin Plates. Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark, Report No. R-146. 2006. 239 p.
26. Flores R. Resistance of Transversally Stiffened Hybrid Steel Plate Girders to Concentrated Loads: Doctoral Thesis. Barcelona, Polytechnic University of Catalonia. 2009. 221 p.
27. Basler K., Yen B. T., Mueller J. A. Web buckling tests on welded plate girders, Part 3: Tests on plate girders subjected to shear. WRC Bulletin 64, No. 165 (60-5), Paper 1689. 1960.
28. Lee S.C., Yoo C.H. Experimental Study on Ultimate Shear Strength of Web Panels. Journal of Structural Engineering. 1999. Vol. 125(8). Pp. 838–846. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(1999)125:8(838)
29. Roberts T.M. Combined Shear and Patch Loading of Plate Girders. J. Struct. Engrg, ASCE. 2000. Vol. 126. Pp. 316–321.
30. ТКП EN 1993-1-5:2009 (02250). Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-5. Пластинчатые элементы конструкций. Минск : МАИС, 2014. 51 с.
31. СНиП II-23-81* Стальные конструкции. Госстрой СССР. Москва: ЦИТП Госстроя СССР, 1991. 96 с.
32. ANSI/AISC-360-05. Specification for Structural Steel Buildings. Chicago, Illinois: American Institute of Steel Construction, 2005. 256 p.
33. CAN/CSA-S16-01. Limit States Design of Steel Structures, Includes Update No. 1 (2010), Update No. 2 (2001). Mississauga, Ontario: Canadian Standards Association, 2009. 198 p.
34. Барышников М.П., Чукин М.В., Бойко А.Б. Анализ программных комплексов для расчета напряженно-деформированного состояния композиционных материалов в процессах обработки давлением // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. ГИ Носова. 2012. №. 4. С. 72–74.
35. Riks E. An incremental approach to the solution of snapping and buckling problems. International Journal of Solids Structures. 1979. No. 15. Pp. 529–551.
36. Надольский В.В., Вихляев А.И. Оценка несущей способности балок с гофрированной стенкой методом конечных элементов при действии локальной нагрузки // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 6. С. 693-706. doi:10.22227/1997-0935.2022.
37. Надольский В.В., Подымако В.И. Оценка несущей способности стальной балки методом конечных элементов при совместном действии локальных и сдвиговых усилий // Строительство и реконструкция. 2022. № 2 (100). С. 26–43.
38. Tryland T. Steel girders subjected to concentrated loading – validation of numerical simulations. J. Constr. Steel Res. 1999. Vol. 50. Pp. 199–216.
39. BSK. Boverkets Handbok om Stålkonstruktioner, BSK 07, November 2007.
40. Yun X., Gardner L. Stress-strain curves for hot-rolled steels. J. Construct. Steel Res. 2017. Vol. 133. Pp. 36–46.

41. Estrada I. Shear design of stainless steel plate girders. Doctoral thesis. Barcelona (Spain). Department of Construction Engineering, Universitat Politècnica de Catalunya; 2005.
42. Roberts T.M. Slender plate girders subjected to edge loading. *Proc Inst Civ Eng.* 1981. Vol. 2(71). P. 805-819.
43. D'apice M., Fielding D., Cooper P. Statics tests on longitudinally stiffened plate girders. *Welding Research Council. (Bulletin No. 117).* 1966.
44. Cooper P., Lew B., Yen B. Welded constructional alloy steel plate girder. *Journal of the Structural Division-ASCE.* 1964. Vol. 90(1). Pp. 1–36.
45. Nishino F., Okumura T. Experimental investigation of strength of plate girders in shear. *Congress AIPC New York.* 1968. Pp. 451–463.
46. Dubas P., Tschamper H. Stabilité des âmes soumises a une charge concentrée et a une flexion globale. *Construction Metallique.* 1990. Vol. 27(2). Pp. 25–39.
47. Roberts T.M., Shahabian F. Ultimate resistance of slender web panels to combined bending shear and patch loading. *Journal of Constructional Steel Research.* 2001. Vol. 57(7). Pp. 779-790.
48. COMBRI. Competitive Steel and Composite Bridges by Improved Steel Plated Structures. Final Report, RFCS research project RFS-CR-03018, 2007.
49. Glassman D. A compression model for ultimate postbuckling shear strength. *Thin-Walled Structures.* 2016. Vol. 102. Pp. 258-272. doi:10.1016/j.tws.2016.01.016.
50. Bergfelt A., Hovik J. Thin-walled deep plate girders under static loads. *Proceedings of the IABSE Colloquium, New York.* 1968. Vol. 8. Pp. 465-478.
51. Kamtekar A.G. Tests on Hybrid Plate Girders. Report No. CUED/C-Struct/TR28, Cambridge University, Cambridge, 1972.
52. Rockey K.C. The ultimate load behaviour of plate girders loaded in shear. *Structural Engineers.* 1972. Vol. 50(1). Pp. 29-48.
53. Evans H.R., Rockey K.C., Porter D.M. Tests on longitudinally reinforced plate girders subjected to shear. *Proceedings of Conference on Structural Stability, Liege.* 1977.
54. Narayanan R., Rockey K.C. Ultimate load capacity of plate girders with webs containing circular cut-outs. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers.* 1981. Vol. 71. Pp. 845–862.
55. Sakai F. Failure tests of plate girders using large-sided models. University of Tokyo, Department of Civil Engineering, *Structural Engineering Report*, Tokyo. 1966.
56. Moon J. Shear strength and design of trapezoidally corrugated steel webs. *Journal of Constructional Steel Research.* 2009. Vol. 65(5). Pp. 1198-1205.
57. Driver R. G., Abbas H. H., Sause R. Shear behavior of corrugated web bridge girders. *J. Struct. Eng. ASCE.* 2006. Vol. 132(2). Pp. 195-203. doi:10.1061/(ASCE) 0733-9445(2006)132:2(195).

REFERENCES

1. Graciano C., Ayestará, A. Steel plate girder webs under combined patch loading, bending and shear. *Journal of Constructional Steel Research.* 2013. Vol. 80. Pp. 202–212. doi:10.1016/j.jcsr.2012.09.018.
2. Kövesdi B., Alcaine J., Dunai L., Braun B. Interaction behaviour of steel I-girders Part I: Longitudinally unstiffened girders. *Journal of Constructional Steel Research.* 2014. Vol. 103. Pp. 327–343. doi:10.1016/j.jcsr.2014.06.018.
3. Kövesdi B., Alcaine J., Dunai L., Braun B. Interaction behaviour of steel I-girders; part II: Longitudinally stiffened girders. *Journal of Constructional Steel Research.* 2014. Vol. 103. Pp. 344–353. doi:10.1016/j.jcsr.2014.06.017.
4. Kövesdi B., Kuhlmann U., Dunai L. Combined shear and patch loading of girders with corrugated webs. *Periodica Polytechnica Civil Engineering.* 2010. Vol. 54(2). Pp. 79–88.
5. Seitz M. Tragverhalten längsversteifter Blechträger unter quergerichteter Krafteinleitung (Longitudinally stiffened girder webs subjected to patch loading). Institute for Structural Design. Universität Stuttgart. 2005.
6. Kovacevic S., Markovic N., Sumarac D., Salatic R. Influence of patch load length on plate girders. Part II: Numerical research. *Journal of Constructional Steel Research.* 2019. Vol. 158. Pp. 213–229. doi:10.1016/j.jcsr.2019.03.025.
7. Rogač M., Aleksić S., Lučić D. Influence of patch load length on resistance of I-girders. Part-II: Numerical research. *Journal of Constructional Steel Research.* 2021. Vol. 176. Pp. 106–138. doi:10.1016/j.jcsr.2020.106369.
8. Pavlovčić L., Detzel A., Kuhlmann U., Beg D. Shear resistance of longitudinally stiffened panels. Part 1: Tests and numerical analysis of imperfections. *Journal of Constructional Steel Research.* 2007. Vol. 63(3). Pp. 337–350.
9. Nadolski V., Marková J., Podymako V., Sykora M. Pilot numerical analysis of resistance of steel beams under combined shear and patch loading. *Proceedings of conference Modelling in Mechanics 2022*, Technical University of Ostrava. 2021. Pp. 21–29.
10. Sinur F., Beg D. Moment–shear interaction of stiffened plate girders. Tests and numerical model verification. *Journal of Constructional Steel Research.* 2013. Vol. 85. Pp. 116–129. doi:10.1016/j.jcsr.2013.03.007.
11. Riahi F., Behraves A., Fard M. Y., Armaghani A. Shear Buckling Analysis of Steel Flat and Corrugated Web I-girders. *KSCE Journal of Civil Engineering.* 2018. Vol. 22(12). Pp. 5058–5073.

12. Estrada I., Real E., Mirambell E. General behaviour and effect of rigid and non-rigid end post in stainless steel plate girders loaded in shear. Part II: Extended numerical study and design proposal. *Journal of Constructional Steel Research*. 2007. Vol. 63. Pp. 985–996. doi:10.1016/j.jcsr.2006.08.0.
13. Botyan S.S., Zhamojdik S.M., Kudryashov V.A., Olesiyuk N.M., Pischenkov I.A. Ocenka ognе-stojkosti stal'nyh stroitel'nyh konstrukcij s uchetom vliyaniya teploobmena s primykayushchimi smezh-nymi konstrukcijami [Assessment of fire resistance of steel building structures taking into account the influence of heat exchange with adjacent structures]. *Vestnik Universiteta grazhdanskoj zashchity MCHS Belarusi*. 2021. T. 5. No. 3. Pp. 278–288. doi:10.33408/2519-237X.2021.5-3.278.
14. Nadol'skij V.V. Raschet i konstruirovaniye flancevogo soedineniya elementov pryamo-ugol'nogo secheniya, podverzhennyh central'nomu rastyazheniyu [Calculation and design of the flange connection of straight-angle cross-section elements subject to central tension]. *Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta*. 2018. No. 16. Pp. 121–130.
15. Saiyan S.G., Paushkin A.G. CHislennoe parametricheskoe issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya dvutavrovyyh balok s razlichnymi tipami gofrirovannyh stenok [Numerical parametric study of the stress-strain state of I-beams with various types of corrugated walls]. *Vestnik MGSU*. 2021. T. 16. No. 6. Pp. 676–687.
16. Martynov YU.S., Nadol'skij V.V., Verevka F.A. Stenovye paneli na osnove kassetnyh profilej. CHast' 1. Teoreticheskie issledovaniya [Wall panels based on cassette profiles. Part 1. Theoretical research. Construction and reconstruction]. *Stroitel'stvo i rekonstrukciya*. 2019. No.4 (84). Pp. 26–37.
17. Afenchenko D. S., Petrova YU. N., Ustinova M. E., Olejnikova R.E. Verifikaciya analitichesko-raschyota nesushchej sposobnosti perforirovannogo sterzhnya sredstvami konechno-elementnogo kompleksa [Verification of the analytical calculation of the bearing capacity of a perforated rod by means of a finite element complex]. *Vestnik Kerchenskogo gosudarstvennogo morskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2019. No. 4. Pp.118–129.
18. Nadol'skij V.V. Neopredelennosti raschetnyh modelej soprotivleniya stal'nyh kon-strukcij [Uncertainties of calculated models of resistance of steel structures]. *Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta*. 2016. No. 8. Pp. 66–72.
19. Sýkora M., Marková J., Nadolski V. Application of Semi-Probabilistic Methods to Verification of Series System. *Transactions of the Technical University of Ostrava, Civil Engineering Series*. 2021. Vol. 21/2. Pp. 80–85. doi:10.35181/tces-2021-0018.
20. Tur V.V., Nadol'skij V.V. Konceptiya proektirovaniya stroitel'nyh konstrukcij na osno-ve chislennyh modelej soprotivleniya [The concept of design of building structures based on numerical resistance models]. *Stroitel'stvo i rekonstrukciya*. 2022. No. 6 (104). Pp.78-90. doi:10.33979/2073-7416-2022-104-6-78-90.
21. Nadol'skij V.V. Analiz raschetnyh modelej soprotivleniya lokal'noj nagruzke stal'nyh elementov [Analysis of calculated models of resistance to local load of steel elements]. *Vestnik BrGTU*. 2016. No. 1(97). Pp. 167–171.
22. Nadol'skij V.V. Nadezhnost' stal'nogo elementa pri potere mestnoj ustojchivosti stenki [Reliability of a steel element with loss of local wall stability]. *Vestnik MGSU*. 2022. T. 17. Vyp. 5. Pp. 569–579. doi:10.22227/1997-0935.2022.5.569-579.
23. Braun B. Stability of steel plates under combined loading. *Mitteilungen. Institut für Konstruktion und Entwurf der Universität Stuttgart*. 2010. 226 p.
24. Gozzi J. Patch loading resistance of plated girders - ultimate and serviceability limit state : Doctoral Thesis. Sweden, Luleå University of Technology. 2007.
25. Hansen T. Theory of Plasticity for Steel Structures - Solutions for Fillet Welds, Plate Girders and Thin Plates. Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark, Report. No. R-146. 2006. 239 p.
26. Flores R. Resistance of Transversally Stiffened Hybrid Steel Plate Girders to Concentrated Loads : Doctoral Thesis. Barcelona, Polytechnic University of Catalonia. 2009. 221 p.
27. Basler K., Yen B.T., Mueller J.A. Web buckling tests on welded plate girders, Part 3: Tests on plate girders subjected to shear. *WRC Bulletin* 64. No. 165 (60-5) P. 1689. 1960.
28. Lee S.C., Yoo C.H. Experimental Study on Ultimate Shear Strength of Web Panels. *Journal of Structural Engineering*. 1999. Vol. 125(8). Pp. 838–846. Doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1999)125:8(838)
29. Roberts T.M. Combined Shear and Patch Loading of Plate Girders. *J. Struct. Engrg, ASCE*. 2000. Vol. 126. Pp. 316–321.
30. ТКП EN 1993-1-5:2009 (02250). Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-5. Пластинчатые элементы конструкций. Минск : МАИС, 2014. 51 с.
31. СНиП II-23-81* Стальные конструкции. Госстрой СССР. Москва : ЦИТП Госстроя СССР, 1991. 96 с.
32. ANSI/AISC-360-05. Specification for Structural Steel Buildings. Chicago, Illinois: American Institute of Steel Construction, 2005. 256 p.
33. CAN/CSA-S16-01. Limit States Design of Steel Structures, Includes Update No. 1 (2010), Update. No. 2 (2001). Mississauga, Ontario: Canadian Standards Association, 2009. 198 p.
34. Baryshnikov M.P., CHukin M.V., Bojko A.B. Analiz programnyh kompleksov dlya rascheta napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya kompozicionnyh materialov v processah obrabotki davle-niem [Analysis of software systems for calculating the stress-strain state of composite materials in pressure treatment processes]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. GI Nosova*. 2012. No. 4. Pp.72–74.
35. Riks E. An incremental approach to the solution of snapping and buckling problems. *International Journal of Solids Structures*. 1979. No.15. Pp. 529–551.
36. Nadol'skij V. V., Vihlyayev A.I. Ocenka nesushchej sposobnosti balok s gofrirovannoj sten-koj metodom konechnykh elementov pri dejstvii lokal'noj nagruzki [Evaluation of the load-bearing capacity of beams with a corrugated

wall by the finite element method under the action of a local load]. *Vestnik MGSU*. 2022. T. 17. Vyp. 6. Pp. 693–706. doi:10.22227/1997-0935.202.

37. Nadol'skij V.V., Podymako V.I. Ocenka nesushchej sposobnosti stal'noj balki metodom konechnyh elementov pri sovmestnom dejstvii lokal'nyh i sdvigovyh usilij[Evaluation of the bearing capacity of a steel beam by the finite element method under the combined action of local and shear forces]. *Stroitel'stvo i rekonstrukciya*. 2022. No. 2 (100). Pp. 26–43.

38. Tryland T. Steel girders subjected to concentrated loading – validation of numerical simulations. *J. Constr. Steel Res.* 1999. Vol. 50. Pp. 199–216.

39. BSK. Boverkets Handbok om Stålkonstruktioner, BSK 07, November 2007.

40. Yun X., Gardner L. Stress-strain curves for hot-rolled steels. *J. Construct. Steel Res.* 2017. Vol. 133. Pp. 36–46.

41. Estrada I. Shear design of stainless steel plate girders. Doctoral thesis. Barcelona (Spain). Department of Construction Engineering, Universitat Politècnica de Catalunya; 2005.

42. Roberts T. M. Slender plate girders subjected to edge loading. *Proc Inst Civ Eng.* 1981. Vol. 2(71). P. 805–819.

43. D'apice M., Fielding D., Cooper P. Statics tests on longitudinally stiffened plate girders. *Welding Research Council*. (Bulletin No. 117). 1966.

44. Cooper P., Lew B., Yen B. Welded constructional alloy steel plate girder. *Journal of the Structural Division-ASCE*. 1964. Vol. 90(1). Pp. 1–36.

45. Nishino F., Okumura T. Experimental investigation of strength of plate girders in shear. *Congress AIPC New York*. 1968. Pp. 451–463.

46. Dubas P., Tschamper H. Stabilité des âmes soumises a une charge concentrée et a une flexion globale. *Construction Metallique*. 1990. Vol. 27(2). Pp. 25–39.

47. Roberts T. M., Shahabian F. Ultimate resistance of slender web panels to combined bending shear and patch loading. *Journal of Constructional Steel Research*. 2001. Vol. 57(7). Pp. 779–790.

48. COMBRI. Competitive Steel and Composite Bridges by Improved Steel Plated Structures. Final Report, RFCS research project RFS-CR-03018, 2007.

49. Glassman D. A compression model for ultimate postbuckling shear strength. *Thin-Walled Structures*. 2016. Vol. 102. Pp. 258–272. doi:10.1016/j.tws.2016.01.016.

50. Bergfelt A., Hovik J. Thin-walled deep plate girders under static loads. *Proceedings of the IABSE Colloquium*, New York. 1968. Vol. 8. Pp. 465–478.

51. Kamtekar A.G. Tests on Hybrid Plate Girders. Report No. CUED/C-Struct/TR28, Cambridge University, Cambridge, 1972.

52. Rockey K.C. The ultimate load behaviour of plate girders loaded in shear. *Structural Engineers*. 1972. Vol. 50(1). Pp. 29–48.

53. Evans H.R., Rockey K.C., Porter D.M. Tests on longitudinally reinforced plate girders subjected to shear. *Proceedings of Conference on Structural Stability*, Liege. 1977.

54. Narayanan R., Rockey K. C. Ultimate load capacity of plate girders with webs containing circular cut-outs. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*. 1981. Vol. 71. Pp. 845–862.

55. Sakai F. Failure tests of plate girders using large-sided models. University of Tokyo, Department of Civil Engineering, Structural Engineering Report, Tokyo. 1966.

56. Moon J. Shear strength and design of trapezoidally corrugated steel webs. *Journal of Constructional Steel Research*. 2009. Vol. 65(5). Pp. 1198–1205.

57. Driver R. G., Abbas H. H., Sause R. Shear behavior of corrugated web bridge girders. *J. Struct. Eng. ASCE*. 2006. Vol. 132(2). Pp. 195–203. doi:10.1061/(ASCE) 0733-9445(2006)132:2(195).

Информация об авторе:

Надольский Виталий Валерьевич

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

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технологии строительного производства».

E-mail: nadolskivv@mail.ru

Information about author:

Nadolski Vitali V.

Brest State Technical University, Brest, Belarus,

candidate of technical science (PhD), docent, associated professor of the department of Building constructions.

E-mail: nadolskivv@mail.ru

М.Ю. ТРОШИН¹, А.В. ТУРКОВ¹¹ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г. Орёл, Россия

ВЛИЯНИЕ ШАГА ПОПЕРЕЧНЫХ СЛОЕВ НА ДЕФОРМАТИВНОСТЬ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В ПЯТИСЛОЙНЫХ ПЛИТАХ ДРЕВЕСИНЫ ПЕРЕКРЕСТНО-КЛЕЕНОЙ

Аннотация. Рассматривается влияние шага поперечных слоев пятислойных плит из древесины перекрестно-клееной (CLT-панелей) на деформации и распределение возникающих нормальных и касательных напряжений в слоях конструкции. Исследования выполнены в вычислительном комплексе SCAD+ методом конечных элементов (МКЭ). В результате проведенного исследования получены, систематизированы и наглядно показаны зависимости прогиба и напряжений от варьирования шага поперечных ламелей перекрестно-клееной плиты, состоящей из 5 слоев. Выявлено, что при увеличении расстояний между ламелями в поперечных слоях увеличиваются прогибы и значительно возрастают нормальное напряжение вдоль пролёта. При этом, в среднем слое напряжение растет незначительно, что свидетельствует о том, что основную нагрузку при изгибе воспринимают верхние и нижние слои, работающие на сжатие и растяжение соответственно.

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

M.Y. TROSHIN¹, A.V. TURKOV¹¹Orel state University named after I. S. Turgenev, Orel, Russia

THE EFFECT OF THE STEP OF TRANSVERSE LAYERS ON THE DEFORMABILITY AND STRESS DISTRIBUTION IN FIVE-LAYER SLABS OF CLT-PANELS

Abstract. The influence of the step of the transverse layers of five-layer slabs of cross-glued wood (CLT panels) on the deformation and distribution of the resulting normal and tangential stresses in the layers of the structure is considered. The research was carried out in the SCAD+ computing complex by the finite element method (FEM). As a result of the conducted research, the dependences of deflection and stresses on the variation of the pitch of the transverse lamellae of a cross-glued plate consisting of 5 layers are obtained, systematized and clearly shown. It is revealed that with increasing distances between lamellae in transverse layers, deflections increase and the normal stress along the span increases significantly. At the same time, the stress increases slightly in the middle layer, which indicates that the upper and lower layers, working for compression and stretching, respectively, perceive the main load during bending.

Keywords: wooden structures, CLT-panels, wood, stress distribution, thickness, deflection.

Введение

Древесина является одним из древнейших строительных материалов благодаря своим прочностным характеристикам. Одной из ключевых особенностей древесных материалов и производных изделий является их сильно выраженная анизотропия свойств, характерная для древесины всех пород. Модули упругости и сдвига древесины для продольных и поперечных направлений волокон могут отличаться в десятки раз. [1]

В конце XX века Австрийская ассоциация деревянной промышленности начала исследования по развитию новой технологии производства CLT-панелей (Cross Laminated Timber), в отечественной нормативной базе именуемой ДПК (древесина перекрестно-клееная

© Трошин М.Ю., Турков А.В., 2023

по ГОСТ Р 56706–2022 «Плиты клеенные из пиломатериалов с перекрестным расположением слоев. Технические условия»). Данная конструкция представляет из себя массивную многослойную плиту, состоящую из нечетного количества накрест склеенных (или зубчато соединенных) деревянных досок (ламелей). [2] Перекрестное расположение слоев позволило значительно увеличить жесткость и несущую способность плит, что позволяет использовать материал в качестве несущих конструкций стен и перекрытий в многоэтажных многопролетных зданиях.

Исследованием механических свойств плит из древесины перекрестно-клееной (CLT-панелей) при разных условиях занимались как зарубежные [1-8], так и отечественные авторы [9-18].

Целью настоящей статьи является исследование несущей способности и деформативности плит из древесины перекрестно-клееной, или CLT-панелей, при изменении шага расположения ламелей в поперечных слоях (2-ой и 4-ый слой). Результаты данного исследования позволяют выделить общие закономерности изменения прогибов, нормальных и тангенциальных (касательных) напряжений в продольных и поперечных слоях пятислойных плит.

Для достижения поставленной цели необходимо решить стандартные задачи:

- выбрать шаг изменения толщин продольных и поперечных слоев;
- смоделировать расчетную конструкцию в соответствии с выбранной расчетной схемой в программном комплексе SCAD+;
- провести численные исследования конструкций и систематизировать полученные данные;
- провести анализ результатов расчетов и сделать по результатам исследований выводы.

Материалы и методы

Исследования были проведены численными методами при помощи программно-вычислительного комплекса SCAD+. Расчетная схема определена как система общего вида, деформации которой и ее основные неизвестные представлены линейными перемещениями узловых точек вдоль осей X, Y, Z и поворотами вокруг этих осей.

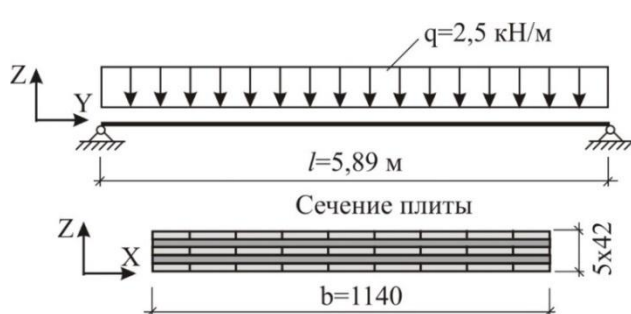


Рисунок 1 – Расчетная схема и сечение пятислойной плиты из древесины перекрестно-клееной

Расчетная конструкция - пятислойная плита из древесины перекрестно-клееной, шарнирно опёртая на опорах. Расчетная схема и сечение конструкции приведены на рисунке 1.

Нагружение плиты из перекрестной древесины задается равномерно-распределенной нагрузкой на грани объемных элементов интенсивностью $2,5 \text{ кН/м}^2$. Конструкция имеет длину 5890 мм и ширину 1140 мм. Остроганные по 4 сторонам доски толщиной 42 мм в слоях

имеют ширину 190 мм. В нечётных слоях (1, 3 и 5) волокна расположены вдоль пролёта, в чётных (2 и 4) – поперёк пролёта плиты. Модули упругости и модуль сдвига древесины приняты в соответствии с СП 64.13330.2017 «Деревянные конструкции»: вдоль волокон $E=1000 \text{ кН/см}^2$, поперёк волокон $E_{90}=400 \text{ кН/см}^2$, модуль сдвига принят $G=500 \text{ кН/см}^2$.

Численные исследования проводились в программном комплексе SCAD+, который позволяет определять механические свойства за счет присвоения расчетной модели параметров, соответствующих реальному материалу. Учитывая анизотропные свойства древесины, поперечным и продольным слоям были заданы разные модули упругости вдоль OX и OY.

Результаты и обсуждение

Для выявления основных зависимостей деформаций и напряжений от шага досок в чётных слоях была рассмотрена конструкция пятислойной плиты из перекрестной древесины.

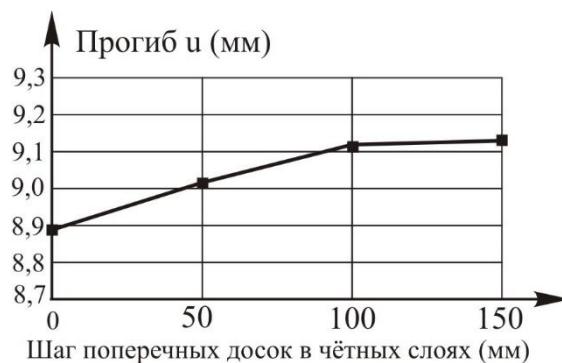


Рисунок 2 – Прогибы плиты в зависимости от шага досок в нечётных слоях

Шаг досок в чётных слоях принимался 0, 50, 100 и 150 мм. По результатам численных исследований определялись прогибы плиты, а также нормальные и касательные напряжения в конечных плитах с заданными характеристиками в программном комплексе SCAD+, был получен массив данных с результатами вычислений для каждого слоя при изменении шага досок в чётных слоях. Полученные значения внесены в таблицу 1.

По данным таблицы 1 построены графики изменения прогибов (рисунок 2).

Таблица 1 – Прогибы и напряжения в пятислойной плите из древесины перекрестно-клееной

№ слоев	Шаг досок в поперечных слоях, мм	Прогиб плиты u, мм	Максимальные нормальные напряжения			Максимальные касательные напряжения		
			N_x , кН/м ²	N_y , кН/м ²	N_z , кН/м ²	τ_{xy} , кН/м ²	τ_{xz} , кН/м ²	τ_{yz} , кН/м ²
1,5	0	8,88	-44,58	-2058,63	-198,59	-5,96	-7,18	-128,76
	50	9,05	-56,00	-2084,47	-247,22	-6,79	-7,88	-130,25
	100	9,16	-52,51	-2086,00	-233,54	-7,89	-8,10	-129,20
	150	9,17	-63,20	-2091,11	-278,83	-12,31	-8,63	-128,02
2,4	0	8,88	-49,04	-40,36	-123,43	-2,78	-3,09	-93,89
	50	9,05	-61,83	-40,38	-138,15	-2,82	-3,63	-97,12
	100	9,16	-72,18	-40,58	-136,31	-2,93	-4,24	-109,65
	150	9,17	-81,67	-40,82	-152,91	-3,51	-4,71	-129,41
3	0	8,88	-14,26	-112,95	-63,91	-1,56	-7,95	-75,15
	50	9,05	-14,75	-115,21	-67,53	-1,53	-9,22	-117,09
	100	9,16	-15,37	-101,43	-70,64	-1,91	-10,29	-108,03
	150	9,17	-15,45	-98,91	-71,74	-1,52	-11,28	-102,30

По данным таблицы 1 построены также графики нормальных (рисунки 3, 4 и 5) и касательных напряжений (рисунки 6, 7 и 8).

Как показали исследования, максимальные прогибы плиты при изменении шага слоёв с поперечным расположением досок от 0 до 150 мм (чётные слои) изменяются весьма незначительно в пределах 3,3%. Это объясняется весьма небольшой жёсткостью чётных слоёв при ориентации волокон древесины поперёк пролёта и близким их расположением к

нейтральной оси сечения. Таким образом, эти слои не могут оказать сколько-нибудь существенного влияния на прогибы плиты.

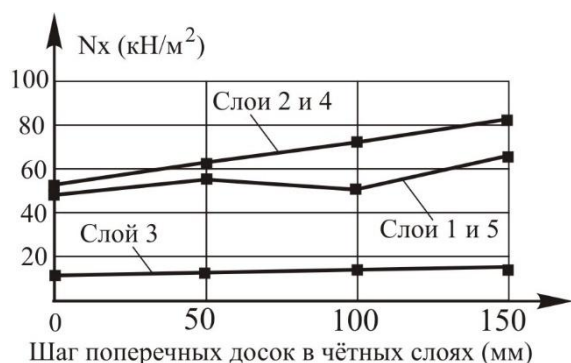


Рисунок 3 – Нормальные напряжения N_x в зависимости от шага досок в нечётных слоях

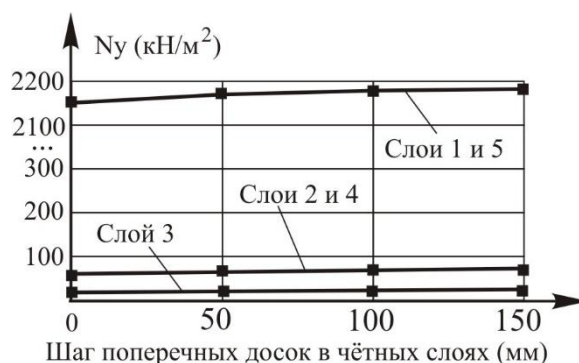


Рисунок 4 – Нормальные напряжения N_y в зависимости от шага досок в нечётных слоях

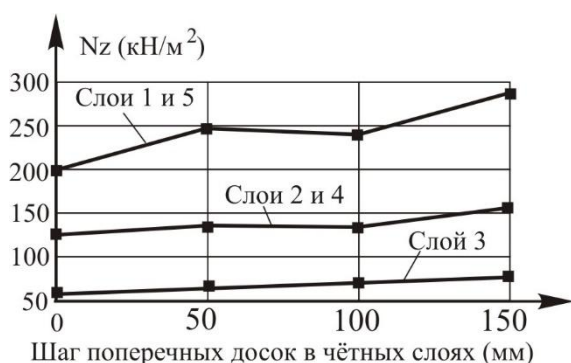


Рисунок 5 – Нормальные напряжения N_z в зависимости от шага досок в нечётных слоях

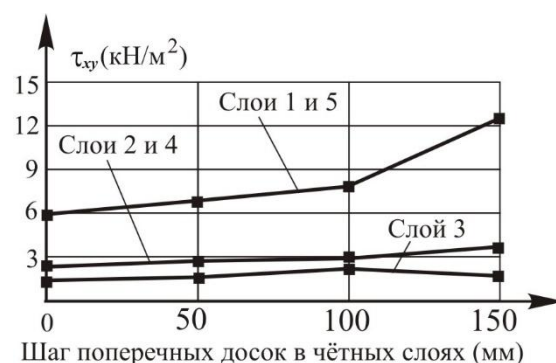


Рисунок 6 – Касательные напряжения τ_{xy} в зависимости от шага досок в нечётных слоях

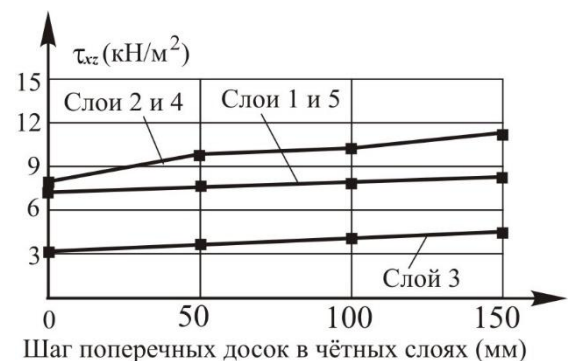


Рисунок 7 – Касательные напряжения τ_{xz} в зависимости от шага досок в нечётных слоях

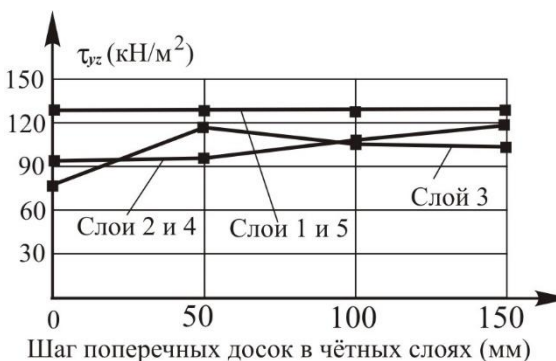


Рисунок 8 – Касательные напряжения τ_{zy} в зависимости от шага досок в нечётных слоях

Нормальные напряжения вдоль пролёта плиты N_y возрастают в крайних слоях 1 и 5 также незначительно, что объясняется незначительным влиянием чётных слоёв на перераспределение напряжений и их невысокой жёсткостью.

Касательные напряжения играют небольшое влияние на общее напряжённое состояние в слоях плиты.

Выводы

По результатам расчета при действии статической равномерно-распределенной нагрузки выявлено, что:

– при увеличении расстояний между ламелями в поперечных слоях предсказуемо увеличивается величина прогибов. При этом, разница между наименьшим и наибольшим значением составляет порядка 3,3 %. Это связано с тем, что поперечные слои не оказывают существенного влияния на момент инерции сечения плиты, что способствует несущественному влиянию шага ламелей на прогиб плиты;

– при увеличении шага досок в поперечных слоях незначительно увеличиваются напряжения в крайних слоях, что свидетельствует о слабом влиянии шага поперечных слоёв на нормальные напряжения изгиба. При этом, в среднем слое с увеличением шага ламелей чётных слоёв напряжения незначительны и возрастают примерно на 12%, что свидетельствует о том, в среднем слое возможно использование древесины с меньшей несущей способностью, чем в наружных слоях;

– анализ всего массива полученных данных показывает, что основную нагрузку несут на себе наружные слои 1 и 5, из-за чего можно предположить, что первичное разрушение плиты при сверхнормативном нагружении произойдет именно в этих слоях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ашкенази Е.К. Анизотропия древесины и древесных материалов. М.: Лесная промышленность, 1978. 224 с.
2. Крестьянникова А.Ю., Юминова М.О. Материалы и конструкции для строительства деревянных домов // Наука через призму времени. 2017. № 9. С. 42–51. URL: <http://naupri.ru/journal/465>
3. Yinlan Shen, Schneider Johannes, Stierner Siegfried F., Xueyong Ren. Failure Modes and Mechanical Properties of Bracket Anchor Connections for Cross-Laminated-Timber // MATEC Web of Conferences 275. 2019. Pp. 1-7. doi:10.1051/mateconf/201927501011
4. Václav Sebera, Lech Muszyński, Jan Tippner, Melanie Noyel, Thomas Pisaneschi & Benjamin Sundberg. FE analysis of CLT panel subjected to torsion and verified by DIC / Materials and Structures. 2015. No. 48. Pp. 451-459. doi:10.1617/s11527-013-0195-1
5. ZiruiHuang, DongshengHuang, Ying-HeiChui, YurongShen, HosseinDaneshvar, BaoluSheng, ZhongfanChen. Modeling of Cross-Laminated Timber (CLT) panels loaded with combined out-of-plane bending and compression / Engineering Structures. 2022. V. 250. doi:10.1016/j.engstruct.2022.115262
6. Ioannis P. Christovasilis, Michele Brunetti, Maurizio Follesa, Michela Nocetti, Davide Vassallo. Evaluation of the Mechanical Properties of Cross Laminated Timber with Elementary Beam Theories compression // Engineering Structures. 2016. V. 122. Pp. 202-213. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.06.082
7. Weidong Lu, Jiahui Gu, Bibo Wang. Study on Flexural Behavior of Cross-Laminated Timber Based on Different Tree Species // Advances in Materials Science and Engineering. 2019. V. 2019, Article ID 1728258. <https://doi.org/10.1155/2019/1728258>
8. Alexander Opazo-Vega, Franco Benedetti, Mario Nuñez-Decap, Nelson Maureira-Carsalade, Claudio Oyarzo-Vera. Non-Destructive Assessment of the Elastic Properties of Low-Grade CLT Panels // Forests. 2021. No. 12. <https://doi.org/10.3390/f12121734>
9. Gagnon S., Popovski M.. Structural Design of Cross-Laminated Timber Elements. In: Chapter 3, CLT Handbook. FPIInnovations. Québec, Québec, Canada. 2011.
10. Погорельцев А.А., Филимонов М.А., Смирнов П.Н. Определение прочностных и упругих характеристик древесины перекрестно клееной (ДПК/CLT) и классификация по классам прочности. М.: Научно-исследовательский центр "Строительство", 2020. 175 с.
11. Погорельцев А.А. Проведение исследований по определению несущей способности стеновых панелей и плит перекрытия из древесины перекрестно клееной (ДПК/CLT) и разработка методики расчета / А.А. Погорельцев, П.Н. Смирнов, М.А. Филимонов - М.: Научно-исследовательский центр "Строительство", 2020. 268 с.
12. Рогожина А.В. Расчет деформативности CLT-панели перекрытия // Инженерный вестник Дона. 2022. № 6. URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_89__5_Rogozhina.pdf_10c4252bae.pdf
13. Филимонов М.А., Смирнов П.Н. Исследования прочностных и упругих характеристик плит из древесины перекрестно-клееной (ДПК/CLT) Российского производства // Сейсмическое строительство. Безопасность сооружений. 2022. № 2. С. 81-97. doi:10.37153/2618-9283-2022-2-81-97
14. Мамедов Ш.М., Шабилова Е.Г., Нижегородцев Д.В., Казакевич Т.Н. Методика расчета панелей из перекрестно-клееной древесины / Вестник гражданских инженеров. 2020. № 5(82). С. 66-71. doi:10.23968/1999-

5571-2020-17-5-66-71

15. Бубис А.А., Гизятуллин И.Р., Хворова А.Н., Петров И.Ю. Особенности поведения древесины перекрёстно-клееной (ДПК/CLT) при статических и динамических нагрузках, моделирующих сейсмические воздействия // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2022. № 2. С. 62-80. doi:10.37153/2618-9283-2022-2-62-80

16. Чебыкин А.А., Фрицлер Ю.А., Кудрявцев С.В. Определение расчетных характеристик сечений древесных клееных плит из перекрестных досок / Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2017. № 2. С. 83-85. URL:<https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-raschetnyh-harakteristik-secheniy-drevesnyh-kleenyh-plit-iz-perekrestnyh-dosok/viewer>

17. Змеев М.В. Определение толщины перекрытия из перекрестно-клееных досок на примере CLT-плит Binderholz (Austria) из условия жесткости // Инженерный вестник Дона. 2020. № 11. URL:http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_35_10_Zmeev.pdf_91b8606af3.pdf

18. Щелокова Т.Н. Современные тенденции улучшения свойств древесины и деревянных строительных конструкций // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. № 6. С. 39-45. URL:<http://dspace.bstu.ru/bitstream/123456789/1514/1/6.%20Щелокова.pdf>

REFERENCES

1. Ashkenazi E.K. Anizotropiya drevesiny i drevesnyh materialov [Anisotropy of wood and wood materials]. M.: *Lesnaya promyshlennost'* [Forest industry], 1978. 224 p. (In Russian)
2. Krestyanikova A.Yu., Yuminova M.O. Materialy i konstrukcii dlya stroitel'stva derevyannyh domov [Materials and structures for the construction of wooden houses] // *Nauka cherez prizmu vremeni* [Science through the prism of time]. 2017. No. 9. С. 42–51. URL: <http://naupri.ru/journal/465>
3. Yinlan Shen, Schneider Johannes, Stierner Siegfried F., Xueyong Ren. Failure Modes and Mechanical Properties of Bracket Anchor Connections for Cross-Laminated-Timber // *MATEC Web of Conferences* 275. 2019. Pp. 1-7. doi:10.1051/mateconf/201927501011
4. Václav Sebera, Lech Muszyński, Jan Tippner, Melanie Noyel, Thomas Pisaneschi & Benjamin Sundberg. *FE analysis of CLT panel subjected to torsion and verified by DIC* // *Materials and Structures*. 2015. No. 48. Pp. 451-459. doi:10.1617/s11527-013-0195-1
5. ZiruiHuang, DongshengHuang, Ying-HeiChui, YurongShen, HosseinDaneshvar, BaoluSheng, ZhongfanChen. Modeling of Cross-Laminated Timber (CLT) panels loaded with combined out-of-plane bending and compression // *Engineering Structures*. 2022. V. 250. doi:10.1016/j.engstruct.2022.115262
6. Ioannis P. Christovasilis, Michele Brunetti, Maurizio Follesa, Michela Nocetti, Davide Vassallo. Evaluation of the Mechanical Properties of Cross Laminated Timber with Elementary Beam Theories compression // *Engineering Structures*. 2016. V. 122. Pp. 202-213. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.06.082
7. Weidong Lu, Jiahui Gu, Bibo Wang. Study on Flexural Behavior of Cross-Laminated Timber Based on Different Tree Species // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2019. V. 2019, Article ID 1728258. <https://doi.org/10.1155/2019/1728258>
8. Alexander Opazo-Vega, Franco Benedetti, Mario Nuñez-Decap, Nelson Maureira-Carsalade, Claudio Oyarzo-Vera. Non-Destructive Assessment of the Elastic Properties of Low-Grade CLT Panels // *Forests*. 2021. No. 12. <https://doi.org/10.3390/f12121734>
9. Gagnon S., Popovski M. Structural Design of Cross-Laminated Timber Elements. In: Chapter 3, CLT Handbook. *FPInnovations. Québec*, Québec, Canada. 2011.
10. Pogorel'cev A.A. Opredelenie prochnostnyh i uprugih harakteristik drevesiny perekrestno kleenoy (DPK/CLT) i klassifi-kaciya po klassam prochnosti [Determination of strength and elastic characteristics of cross-glued wood (WPC/CLT) and classification by strength classes] / A.A. Pogorel'cev, M.A. Filimonov, P.N. Smirnov – M.: *Nauchno-issledovatel'skij centr "Stroitel'stvo"* [Scientific Research Center "Construction"], 2020. 175 p. (In Russian)
11. Pogorel'cev A.A. Provedenie issledovaniy po opredeleniyu nesushchej sposobnosti stenovyh panelej i plit perekrytiya iz drevesiny perekrestno kleenoy (DPK/CLT) i razrabotka metodiki rascheta [Conducting research to determine the bearing capacity of wall panels and floor slabs made of cross-glued wood (WPC/CLT) and developing a calculation methodology] / A.A. Pogorel'cev, P.N. Smirnov, M.A. Filimonov - M.: *Nauchno-issledovatel'skij centr "Stroitel'stvo"* [Scientific Research Center "Construction"], 2020. 268 p. (In Russian)
12. Rogozhina A.V. Raschet deformativnosti CLT-paneli perekrytiya [Calculation of the deformability of the CLT overlap panel] // *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Journal of Don]. 2022, No. 6. URL:http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_89_5_Rogozhina.pdf_10c4252bae.pdf (In Russian)
13. Filimonov M. A., Smirnov P.N. Issledovaniya prochnostnyh i uprugih harakteristik plit iz drevesiny perekrestno-kleenoy (DPK/CLT) Rossijskogo proizvodstva [Research of strength and elastic characteristics of russian-made cross laminated timber slabs] // *Seismicheskoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenij* [Earthquake engineering. Construction safety]. 2022, No. 2. 81-97. doi:10.37153/2618-9283-2022-2-81-97 (In Russian)
14. Mamedov SH.M, SHabikova E.G., Nizhegorodcev D.V., Kazakevich T.N. Metodika rascheta panelej iz

perekrestno-kleenoy drevesiny [Method for calculating cross laminated timber panels] // *Vestnik grazhdanskih inzhenerov* [Bulletin of civil engineers]. 2020. No. 5(82). Pp. 66-71. doi:10.23968/1999-5571-2020-17-5-66-71 (In Russian)

15. Bubis A.A., Giziattullin I.R., Hvorova A.N., Petrov I.Yu. Osobennosti povedeniya drevesiny perekryostno-kleenoy (DPK/CLT) pri staticheskikh i dinamicheskikh nagruzkah, modeliruyushchih sejsmi-cheskie vozdejstviya [Peculiarities of behavior of cross-laminated timber (CLT) under static and dynamic loads simulating seismic impacts]. *Seismicheskoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenij* [Earthquake engineering. Construction safety]. 2022. No. 2. Pp. 62-80. doi:10.37153/2618-9283-2022-2-62-80 (In Russian)

16. Chebykin A.A., Fricler YU.A., Kudryavcev S.V. Opredelenie raschetnykh harakteristik sechenij drevesnykh kleenyykh plit iz pere-krestnykh dosok [Evaluation of cross section design properties for plates from cross laminated timber] // *Akademicheskij vestnik UralNIIproekt RAASN* [Academic Bulletin of UralNIIproekt RAASN]. 2017. No. 2. Pp. 83-85. URL:<https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-raschetnykh-harakteristik-secheniy-drevesnykh-kleenyykh-plit-iz-perekrestnykh-dosok/viewer> (In Russian)

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

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

Информация об авторах:

Трошин Михаил Юрьевич

ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г. Орёл, Россия, аспирант кафедры строительных конструкций и материалов.

E-mail: mtr997@mail.ru

Турков Андрей Викторович

ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г. Орёл, Россия, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры строительных конструкций и материалов.

E-mail: aturkov@bk.ru

Information about authors:

Troshin Mikhail Yr.

Oryol state University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia, postgraduate student, of the department of Building Structures and Materials.

E-mail: mtr997@mail.ru,

Turkov Andrey V.

Oryol state University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia, doctor of technical sciences, associate professor, professor of the department of Building Structures and Materials.

E-mail: aturkov@bk.ru

Ю.А. ШАПОШНИКОВА¹, В.С. КУЗНЕЦОВ¹¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ПОКАЗАТЕЛИ ПОПЕРЕЧНОГО АРМИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК

Аннотация. В работе рассматривается влияние различных факторов на реальную длину хомутов при конструировании сечений линейных изгибаемых железобетонных элементов. Целью работы является определение степени влияния хомутов различной конфигурации, а также иных факторов, на длину хомута при различных размерах сечения линейного изгибаемого элемента. Полученные данные и зависимости позволяют получать наиболее эффективные решения армирования наклонных сечений минимальной стоимости. Расчетно-аналитический, основанный на анализе результатов расчетов при различных видах поперечного армирования, соотношения диаметров продольной и поперечной арматуры, величин защитного слоя, радиуса загиба хомута и размеров сечения. Предложено выражение для расчета действительной длины хомута в зависимости от размеров сечения, коэффициента армирования и толщины защитного слоя с учетом применяемых оправок. Получены графики, которые говорят об экономии длины хомута от 6,7-7,4%, при использовании рабочей арматуры Ø6, до 12,2-37,9%, при использовании рабочей арматуры Ø40, в диапазоне размеров сечения от 20×40 см до 55×80 см и при коэффициенте армирования $0,1\% \leq \mu \leq 3\%$. Проанализированы зависимости уменьшения прочности в условиях неточной привязки рабочей продольной арматуры к хомутам. Полученные данные говорят об уменьшении прочности нормальных сечений балок от 0,33% до 10,78%. В работе рассмотрено влияние различных факторов при конструировании сечений линейных изгибаемых элементов на реальную длину хомутов в соответствии с принятыми нормами. Представленная работа уточняет расход поперечной арматуры для ее наиболее экономичного использования.

Ключевые слова: железобетонная балка, оправка, поперечная арматура, прочность наклонных сечений, прочность нормальных сечений, рабочая высота сечения, хомут.

YU.A. SHAPOSHNIKOVA¹, V.S. KUZNETSOV¹¹Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

INFLUENCE OF STRUCTURAL AND TECHNOLOGICAL FACTORS ON INDICATORS OF TRANSVERSAL REINFORCEMENT OF REINFORCED CONCRETE BEAMS

Abstract. The paper considers the influence of various factors on the actual length of clamps in the design of sections of linear bending reinforced concrete elements. The aim of the work is to determine the degree of influence of clamps of various configurations and other factors on the length of the clamp at various cross-sectional dimensions of a linear bending element. The obtained data and dependences make it possible to obtain the most effective solutions for reinforcing inclined sections with minimal cost. The calculation-analytical research method was used, based on the analysis of the results of calculations for various types of transverse reinforcement, the ratio of the diameters of the longitudinal and transverse reinforcement, the values of the protective layer, the radius of the bend of the clamp and the dimensions of the section. An expression is proposed for calculating the actual length of the clamp, depending on the dimensions of the section, the coefficient of reinforcement and the thickness of the protective layer, taking into account the mandrels used.

Graphs of the change in the length of the collar for various section sizes $b \times h$ from 20×40 cm to 55×80 cm and with a reinforcement coefficient of $0.1\% \leq \mu \leq 3\%$ have been obtained. The graphs show savings in the length of the clamp from 6.7-7.4%, when using working fittings $\varnothing 6$, to 12.2-37.9%, when using working fittings $\varnothing 40$. The dependencies of strength reduction under conditions of inaccurate binding of the working longitudinal reinforcement to the collars are analyzed. The data obtained indicate a decrease in the strength of normal sections of beams from 0.33% to 10.78%. The paper considers the influence of various factors in the design of the sections of linear bending elements on the actual length of the clamps in accordance with accepted standards. Thanks to the obtained data and dependences, it is possible to refine the consumption of transverse reinforcement in beams for its more economical use.

Keywords: mandrel, reinforced concrete beam, reinforcement clamp, strength of inclined sections, strength of normal sections, transverse reinforcement, working height of the section.

Введение

В Российской Федерации при проектировании железобетонных элементов используется метод предельных состояний, гарантированно обеспечивающий прочность, долговечность и эксплуатационные свойства конструкций. Практическая реализация метода представлена в различных сводах правил, рекомендациях, технических условиях и другой нормативной литературе, например, в СП 63.13330.2018. В Европе для расчета железобетонных элементов используются Еврокоды и нормы BS8110, в США – ACI 318-05, а также иная нормативная литература.

Как правило, отечественные и зарубежные нормы, прежде всего, обращают внимание на прочность и безопасность конструкции, оставляя без внимания экономическую составляющую. Экономика при проектировании конструкций направлена на минимизацию финансовых затрат, связанных не только с учетом прямых расходов материалов, но и с влиянием дополнительных затрат на изготовление элементов, транспортирование и монтаж.

Тема оптимального проектирования железобетонных балок рассматривалась в работах многих российских и зарубежных ученых. В России проблемами оптимального проектирования железобетонных конструкций с учетом надежности и экономичности занимался Складнев Н.Н. Тамразян А.Г. и Алексейцев А.В. изучали оптимизацию конструкций с учетом соотношения производственных затрат и рисков материальных потерь при аварийных ситуациях [1]. Чакрабартти Б.К. изучал взаимосвязь между стоимостью балки и удельной стоимостью материалов и размерами балки [2]. Козьмо К.К., Сантос Ф.Э. и Алонсо Ф.Ф. использовали генетические алгоритмы для оптимального проектирования балок [3]. Гарстеки А., Глема А. и Сигалло Дж. разработали пакет программ для оптимального проектирования железобетонных балок и колонн [4]. Демби Майкл обратился к проблеме оптимального и безопасного проектирования армирующих конструкций в железобетонных элементах [5]. Кузнецов В.С. и Шапошникова Ю.А. искали оптимальные параметры железобетонной прямоугольной балки [6].

Прочность конструкций железобетонных балок с поперечной арматурой исследовали Дженсен С., Минелли Ф. [7, 8]. Балакай А.А., Филатов В.Б. и другие изучали несущую способность наклонных сечений при действии поперечных сил [9, 10]. Экспериментальные исследования прочности при действии поперечных сил рассмотрены в работах Снежкиной О.В., Силантьева А.С., Тихонов И.Н. и других [11-13].

Аксёнов Н.Б., Яковлев С.Н. и др. исследовали влияние отклонений положения рабочей арматуры от проектного на прочность изгибаемых элементов [14, 15]. Кампионе Г. и Чжуовэй Ван А. обратили внимание на влияние коэффициента продольного армирования и рабочей высоты сечения на прочность на срез конструкций балок [16, 17].

Кузнецов В.С., Корчагин О.П., Мерта И., Колбич А., Краванья С. и другие изучали оптимизацию железобетонных конструкций, в том числе балок, с точки зрения

экономической составляющей [18-23]. Сулягин А.Е. предложил практический способ расчёта поперечной арматуры в балках [24].

Духанин П.В., Радкевич А.В., Кузнецова С.В. изучали организационно-технологические факторы для осуществления поперечного армирования в балках [25-27].

Однако, несмотря на достаточно большое количество работ по теме оптимального проектирования железобетонных балок, степень влияния конструктивных и технологических факторов на показатели поперечного армирования представляется не до конца изученной. Сочетание шага и применяемых диаметров хомутов, их различная конфигурация, радиус загиба хомута и прочее, могут существенно влиять на технико-экономические показатели изделия, поэтому подробное рассмотрение данного вопроса имеет научный и практический интерес.

В изгибаемых железобетонных линейных элементах хомут предназначен для обеспечения прочности наклонных сечений, предотвращения образования наклонных трещин, противодействия кручению и прогибу арматуры. Хомуты не допускают деформирования и смещения продольных рабочих стержней при заливке бетона, а также образуют опору для продольной рабочей арматуры при монтаже каркаса.

Хомуты представляют собой скобо-гибочные изделия из арматуры гладкого или периодического профиля, различного диаметра и разных классов арматуры [28]. В практике применяются различные виды хомутов:

- замкнутого профиля – рамки, наиболее распространенные (рисунок 1 а, б);
- незамкнутого, открытого профиля – П-форма, обычно используются в срединных балках, где преобладают изгибные усилия (рисунок 1 в);
- ромбовидный хомут (рисунок 1 г);
- усиленные хомуты, работающие на крутящие усилия, устанавливаются в крайних балках, применяются при сейсмических нагрузках.

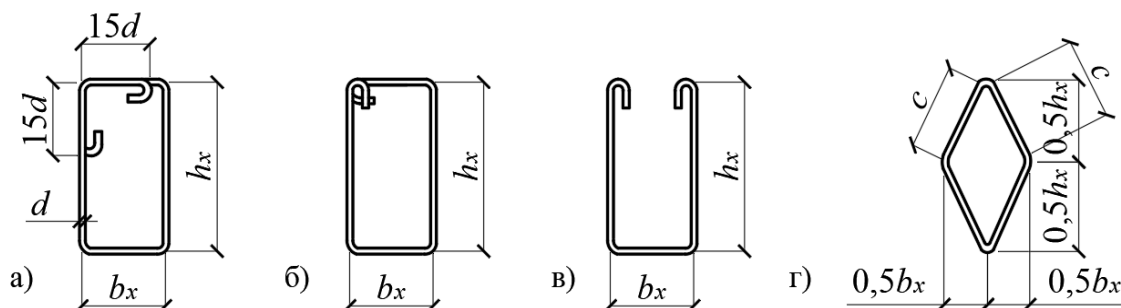


Рисунок 1 – Разные виды хомутов для балок:
а), б) замкнутый профиль; в) незамкнутый профиль; г) ромбовидный профиль

Способ крепления хомутов к продольной арматуре может быть: с помощью специальной вязальной проволоки, сечением 1,2-2,0 мм, или с помощью сварки (рисунок 2 а, б).

Однако фиксация с помощью сварки не всегда возможна, так как сварка допускается не для всех классов арматуры (только с индексом «С»), также необходимы точки подключения к электросети, специальное оборудование и квалифицированные кадры, а сварные работы могут быть исключены на объекте из условий пожаробезопасности.



Рисунок 2 – Крепление хомутов: а) с помощью вязальной проволоки; б) с помощью сварки

В случае применения вязальной проволоки обычно применяют специальный «пистолет» для повышения качества работы и ускорения процесса вязки. Вязанные каркасы отличаются более низкой стоимостью, простотой в изготовлении, но и большим расходом арматуры и увеличенным весом конечной конструкции.

На рисунке 3 представлены специальные устройства для загиба стержней.

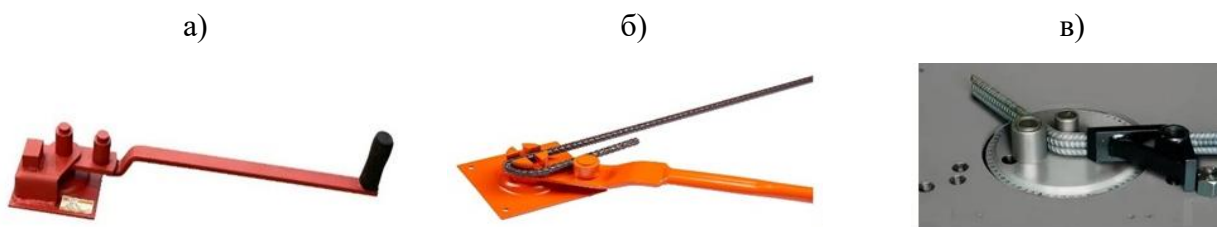


Рисунок 3 – Специальные устройства для загиба стержней:
а, б) ручные станки; в) станок с механическим приводом

Целью работы является установление зависимостей и определение степени влияния различных видов хомутов, технологических и прочих факторов, на минимальную длину хомута при различных размерах сечения линейного изгибаемого элемента.

Основными задачами настоящего исследования являлись:

- Анализ конструктивных требований для установки хомутов, а именно:
 - диаметра и шага хомутов согласно действующим нормам по прочности;
 - диаметра хомутов согласно условиям свариваемости или связывания стержней;
 - толщин защитных слоев для рабочей и конструктивной арматуры;
 - радиус загиба хомутов.
- Анализ влияния различных видов хомутов, радиуса загиба хомута, а также диаметра и класса продольной и поперечной арматуры на прочность нормального сечения;
- Определение в общем виде действительной длины хомута.

Модели и методы

В представленной работе применяется расчетно-аналитический метод исследования, основанный на анализе различных видов поперечного армирования, соотношения диаметров продольной и поперечной арматуры, величин защитного слоя и радиуса загиба хомута, в соответствии с рекомендациями норм.

В исследовании рассматривался линейный изгибаемый железобетонный элемент, длиной L , без преднапряжения, переменного прямоугольного сечения, размерами $b \times h$, нагруженный сосредоточенной силой в середине пролета. Защитный слой арматуры $a_3=20$ мм, $a=30$ мм согласно СП 63.13330.2018 и СП 28.13330.2017. Рабочая высота сечения h_0 . Класс бетона на сжатие B25, $R_b=14,5$ МПа, $R_{bt}=1,05$ МПа. Продольная арматура верхняя 2Ø16, нижняя арматура – 2 (3, 4) стержня переменного диаметра, от 6 до 40 мм, класса

A500С, $R_s=435$ МПа. Поперечная арматура принимается в виде хомутов замкнутого профиля (типа б, рисунок 1) из арматуры Ø10, класса А240 (гладкая, профиль 2ф), $R_{sw}=170$ МПа (рисунок 4).

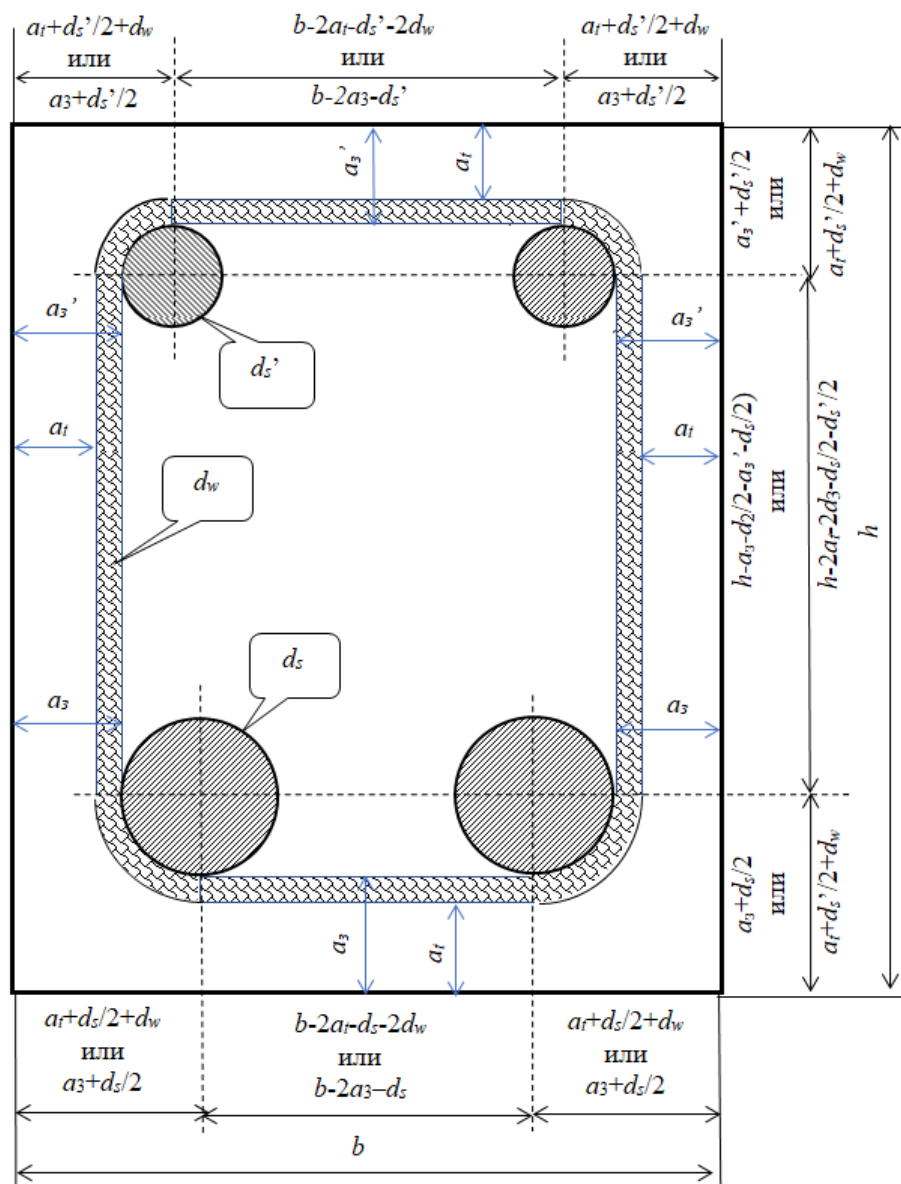


Рисунок 4 – Поперечное сечение балки

Ниже представлены основные конструктивные требования к расстановке поперечной арматуры.

1. Шаг стержней на опорных участках s_1 , длиной $l_1=l_0/4$, должен быть не более $s_1 \leq h_0/2$ и не более $s_1 \leq 300$ мм согласно СП 63.13330.2018.

2. По ГОСТ 34028-2016 и ГОСТ 14098-2014 диаметр поперечных стержней d_w :

- в сварных каркасах диаметр хомута принимают не менее диаметра, устанавливаемого из условия сварки с наибольшим диаметром продольной арматуры по ГОСТ 14098-2014. Отношения диаметров стержней следует принимать для соединений типа К1 - от 0,25 до 1,00, типа К3 - от 0,50 до 1,00.

- в вязаных каркасах изгибаемых элементов диаметр хомута принимают не менее 6 мм;

3. Толщина защитного слоя согласно СП 63.13330.2018 и СП 28.13330.2017:

- нижних продольных стержней не менее $a_3=20$ мм в закрытых помещениях при нормальной и пониженной влажности, а также не менее диаметра продольной нижней

арматуры d_s . Для сборных элементов минимальные значения толщины защитного слоя бетона рабочей арматуры допускается уменьшать еще на 5 мм.

- верхних продольных стержней по высоте сечения также не менее $a_3'=20$ мм и не менее диаметра продольной верхней арматуры d_s' .
- верхних продольных стержней по ширине сечения не менее $a_3'=20$ мм и не менее диаметра продольной нижней арматуры d_s , так как $d_s' \leq d_s$, поэтому $a_3'=a_3$;
- для конструктивной арматуры минимальные значения толщины защитного слоя бетона принимают на 5 мм меньше по сравнению с требуемыми для рабочей арматуры;
- минимальная толщина защитного слоя 20 мм для слабоагрессивной среды для арматуры A240, A500, A400.

Таким образом, описанный выше объект исследования, изгибаемый железобетонный линейный элемент с поперечной арматурой в виде хомутов замкнутого профиля из гладкой арматуры $\varnothing 10$ профиля 2ф, может быть представлен как со сварным, так и с вязанным каркасом.

В сортаменте для арматурного проката периодического профиля указан номинальный диаметр d_n – это диаметр равновеликого по площади поперечного сечения круглого гладкого проката. Согласно ГОСТ 34028-2016 наибольший диаметр арматуры, по величине выступов или гребней, всегда больше номинального, равновеликого.

Например, для арматуры класса A500С, номинального диаметра 28 мм, диаметр, замеренный по гребням и выступам для формы 2ф, составляет $d_1=d_2=31$ мм, а для диаметра 16 мм $d_1=d_2=18$ мм (таблица 1) (рисунок 5, 6).

На рисунках 5-6 представлены разные формы профилей стержня (1ф-4ф) с основными размерами сечения согласно ГОСТ 34028-2016.

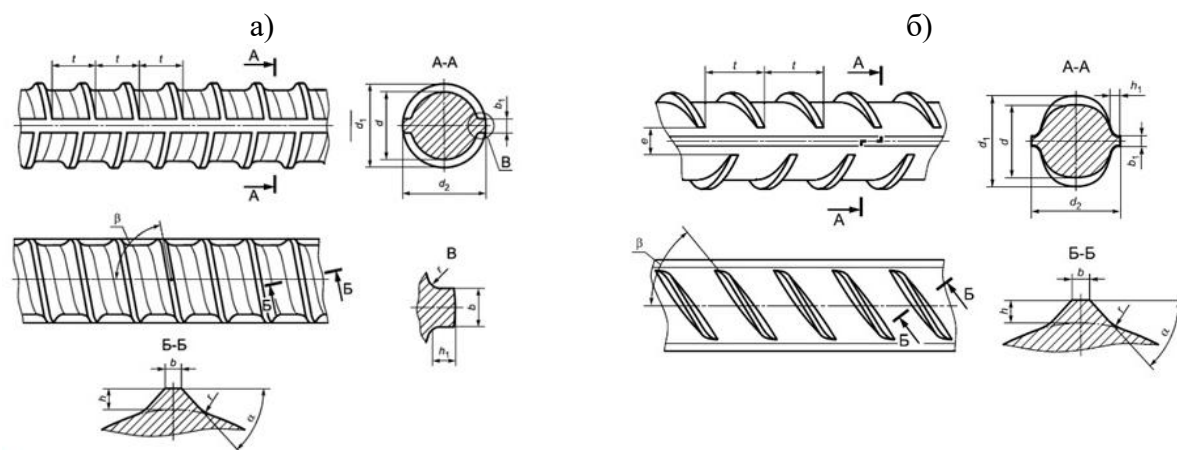


Рисунок 5 – Конфигурация и параметры периодического профиля по форме:
а) 1ф (кольцевой профиль); б) 2ф (серповидный профиль)

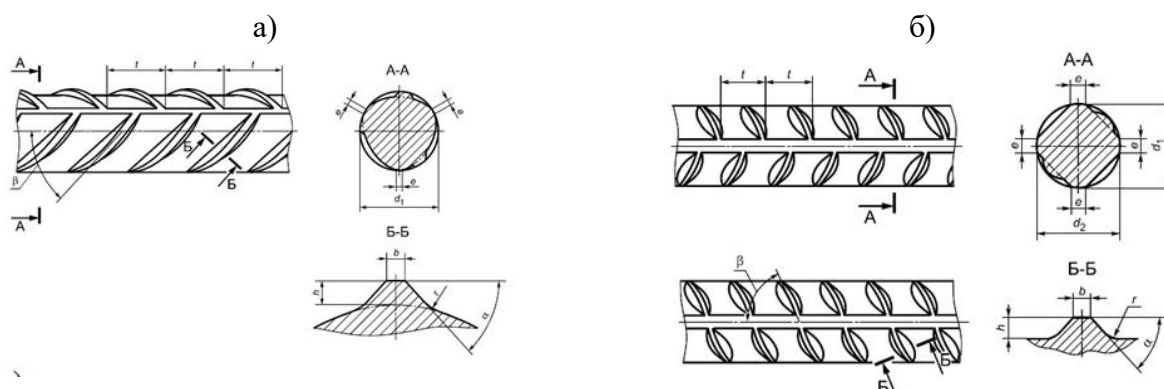


Рисунок 6 – Конфигурация и параметры периодического профиля по форме:
а) 3ф (трехсторонний профиль); б) 4ф (четырёхсторонний профиль)

В таблице 1 представлены размеры сечения арматуры по гребню ($d_1=d_2$) и минимальный диаметр сечения арматуры (d) для номинальных диаметров $d_n=16$ мм и $d_n=28$ мм для разных форм профилей стержня (1ф-4ф).

Таблица 1 – Примеры размеров арматурного сечения для разных форм профилей для номинальных диаметров $d_n=16$ мм и $d_n=28$ мм

Форма профиля	$d_n=16$ мм	$d_n=28$ мм
1ф	$d=15$ мм, $d_1=d_2=18$ мм	$d=26,5$ мм, $d_1=d_2=30,5$ мм
2ф	$d=15,2$ мм, $d_1=d_2=18$ мм	$d=27$ мм, $d_1=d_2=31$ мм
3ф	-	-
4ф	$d_1=d_2=17$ мм	-

Для формы профиля 3ф (трехсторонний профиль) размеры сечения арматуры указаны для номинальных диаметров от $d_n=4$ до $d_n=12$ мм, а для $d_n=16$ мм и $d_n=28$ мм в ГОСТ 34028-2016 данные отсутствуют. Для формы профиля 4ф (четырёхсторонний профиль) размеры сечения арматуры указаны для номинальных диаметров от $d_n=4$ до $d_n=18$ мм, для $d_n=28$ мм информация также отсутствует.

Общая длина хомута L , замеренная по оси симметрии сечения хомута, состоит из четырех прямолинейных участков и четырех дуг, то есть закруглений вокруг продольной арматуры. Общая длина хомута L определяется по формуле (1)

$$L=L_{1н}+L_{2в}+2L_{3б}+2L_{D1}+2L_{D2}, \quad (1)$$

где

$L_{1н}=b-2a_t-d_{s,греб}-2d_w$ – длина нижнего прямолинейного участка;

$L_{2в}=b-2a_t-d_{s',греб}-2d_w$ – длина верхнего прямолинейного участка;

$L_{3б}=h-2a_t-d_{s,греб}/2-d_{s',греб}/2-2d_w$ – длина бокового прямолинейного участка;

$L_{D1}=2\pi(R_{s,греб}+R_w)/4=2\pi(d_{s,греб}/2+d_w/2)/4$ – длина дуги вокруг нижней продольной арматуры;

$L_{D2}=2\pi(R_{s',греб}+R_w)/4=2\pi(d_{s',греб}/2+d_w/2)/4$ – длина дуги вокруг верхней продольной арматуры.

Таким образом, общая длина хомута с учетом наибольшего диаметра арматуры (по величине выступов или гребней), без учета отгибов («хвостиков»)

$$L=L_{1н}+L_{2в}+2L_{3б}+2L_{D1}+2L_{D2}=b-2a_t-d_{s,греб}-2d_w+b-2a_t-d_{s',греб}-2d_w+2(h-2a_t-d_{s,греб}/2-d_{s',греб}/2-2d_w)+2(2\pi(d_{s,греб}/2+d_w/2)/4)+2(2\pi(d_{s',греб}/2+d_w/2)/4).$$

Таким образом, общую длину хомута L можно определить в соответствии с (2).

$$L=2b+2h-8a_t-2d_{s,греб}-2d_{s',греб}-8d_w+\pi(d_{s,греб}/2+d_{s',греб}/2+d_w). \quad (2)$$

Также следует учесть, что для предотвращения раскалывания бетона внутри загиба хомута или его разрушения в месте загиба нормы ограничивают минимальный диаметр оправки.

Так, при диаметре продольных стержней $d_s < 20$ мм, диаметр оправки для гладких стержней согласно ГОСТ 34028-2016 составляет $d_{оп}=2,5d_s$, а при диаметре продольных стержней $d_s \geq 20$ мм диаметр оправки - $d_{оп}=4,0d_s$.

Таким образом, расчетный радиус диаметра загиба хомута, для расчета его длины, определяется суммой радиусов оправки и хомута (рисунок 7 а).

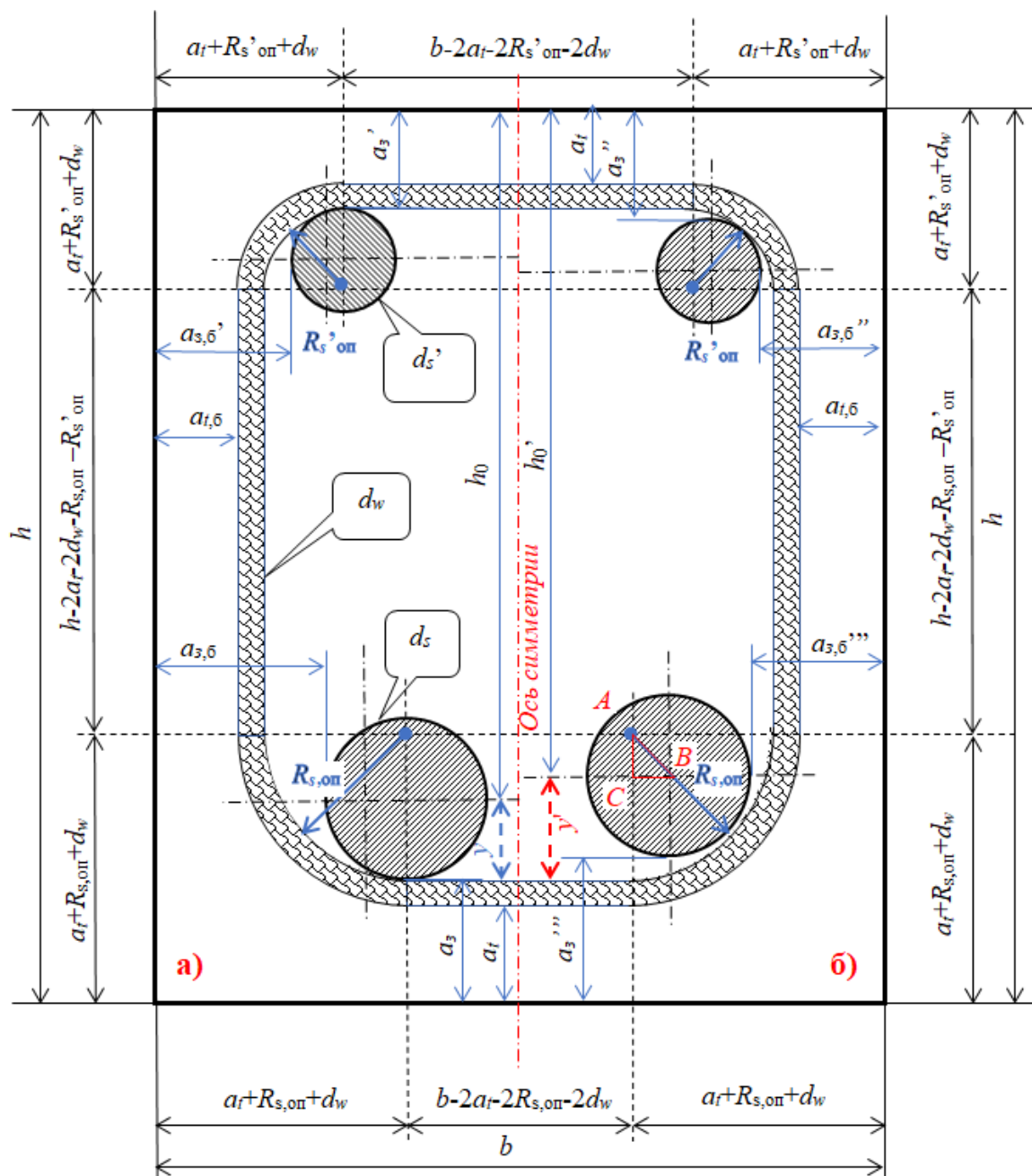


Рисунок 7 – Поперечное сечение балки с армированием с учетом загиба вокруг оправок:
а) правильное; б) ошибочное

Для приведенного примера радиус загиба можно определить по формулам (3) и (4):

- для верхних продольных стержней, диаметром 16 мм

$$R_{s' \text{ в}} = R_{s' \text{ оп}} + R_w = 2,5d_s' / 2 + d_w / 2 = 1,25d_s' + d_w / 2 = 1,25 \times 16 + 10 / 2 = 20 + 5 = 25 \text{ (мм)}. \quad (3)$$

- для нижних продольных стержней, диаметром 28 мм

$$R_{s, \text{ н}} = R_{s, \text{ оп}} + R_w = 4d_s / 2 + d_w / 2 = 2d_s + d_w / 2 = 2 \times 28 + 10 / 2 = 56 + 5 = 61 \text{ (мм)}. \quad (4)$$

Ввиду того, что диаметр загиба хомута вокруг оправки больше, чем вокруг стержня, длина прямолинейных участков уменьшится (рисунок 7).

Общая длина хомута $L_{\text{оп}}$ с учетом применяемых оправок, без учета отгибов, определяется по формуле (5)

$$L_{\text{оп}} = L_{1\text{н}} + L_{2\text{в}} + 2L_{3\text{б}} + 2L_{D1} + 2L_{D2}, \quad (5)$$

где

$L_{1H}=b-2a_t-2R_{s,оп}-2d_w$ – длина нижнего горизонтального участка стержня;

$L_{2B}=b-2a_t-2R_{s,оп}-2d_w$ – длина верхнего горизонтального участка стержня;

$L_{36}=h-2a_t-2R_{s,оп}-2R_{s'оп}-2d_w$ – длина вертикального прямого участка стержня;

$L_{D1}=2\pi(R_{s,оп}+R_w)/4=2\pi(4d_s/2+d_w/2)/4$ – длина дуги вокруг нижней продольной арматуры;

$L_{D2}=2\pi(R_{s'оп}+R_w)/4=2\pi(2,5d_s'/2+d_w/2)/4$ – длина дуги вокруг верхней продольной арматуры.

Общая длина хомута без учета отгибов («хвостиков»), с учетом применяемых оправок

$$\begin{aligned} L_{оп}=L_{1H}+L_{2B}+2L_{36}+2L_{D1}+2L_{D2}=b-2a_t-2R_{s,оп}-2d_w+b-2a_t-2R_{s'оп}-2d_w+ \\ +2(h-2a_t-2R_{s,оп}-2R_{s'оп}-2d_w)+2(2\pi(4d_s/2+d_w/2)/4)+2(2\pi(2,5d_s'/2+d_w/2)/4)= \\ =2b+2h-8a_t-6R_{s,оп}-6R_{s'оп}-8d_w+\pi(2d_s+1,25d_s'+d_w); \end{aligned}$$

или $L_{оп}$ определяется в соответствии с выражением (6)

$$L_{оп}=2b+2h-8a_t-12d_s-7,5d_s'-8d_w+\pi(2d_s+1,25d_s'+d_w). \quad (6)$$

Нередко на строительной площадке пренебрегают использованием оправок, это приводит к перенапряжению поперечной арматуры, а, следовательно, негативно влияет на прочность и на трещиностойкость элемента [20].

Также типичной ошибкой арматурщиков при формировании каркаса является ситуация, когда продольная арматура привязывается по биссектрисе угла загиба, а не к нижнему и верхнему участкам хомутов. При таком варианте за счет большего радиуса оправки продольная арматура сдвигается внутрь вглубь сечения (рисунок 7 б). Это приводит к тому, что рабочая высота сечения h_0 уменьшается до h_0' , следовательно, уменьшается и прочность по нормальному сечению элемента.

На рисунке 7 б показан возможный ошибочный вариант поперечного сечения балки с армированием с учетом загиба вокруг оправок и привязкой арматуры по биссектрисе угла загиба. При таком положении продольной арматуры длина хомута остается без изменения, однако рабочая высота сечения уменьшается на длину $n=h_0'-h_0$ и определяется в соответствии с формулой (7)

$$n=h_0'-h_0=h-R_{s,грeб}-d_w-a_t-h+y'+d_w+a_t; \quad n=y'-R_{s,грeб}, \quad (7)$$

где

$h_0=h-R_{s,грeб}-d_w-a_t$ – рабочая высота сечения нижней продольной арматуры;

$h_0'=h-y'-d_w-a_t$ – рабочая высота сечения верхней продольной арматуры;

$y'=R_{s,оп}-(AC)$ – расстояние от центра продольного стержня до внутреннего края хомута (рисунок 7 б).

Вариант со смещением продольной рабочей арматуры больше чем на диаметр d_s представлен авторами в предыдущих работах [18-19].

Рассмотрим треугольник ABC на рисунке 7 б. Так как продольная арматура d_s ошибочно привязана к биссектрисе угла загиба, то треугольник ABC равнобедренный ($AC=CB$) с углами по 45° . Тогда $(AC)^2+(CB)^2=(AB)^2$, $(AB)^2=2(AC)^2$. Если расстояние (AB) выразить через $R_{s,оп}-R_{s,грeб}$, то $(R_{s,оп}-R_{s,грeб})^2=2(AC)^2$.

Отсюда расстояние (AC) выражается формулой (8)

$$(AC)=(R_{s,оп}-R_{s,грeб})/(\sqrt{2}). \quad (8)$$

Рабочая высота сечения уменьшается на расстояние n , которое можно выразить через формулу (9)

$$n=R_{s,оп}-R_{s,грeб}-(R_{s,оп}-R_{s,грeб})/(\sqrt{2}). \quad (9)$$

Вычислим момент, который может воспринять сечение по известной формуле (10) согласно нормам.

$$x=R_s A_s/(\gamma_{b1}R_b b) \quad (10)$$

В случае сечения с одиночной арматурой $\xi=x/h_0 \leq \xi_R$, где $\xi_R=0,493$ для арматуры А500.

Момент M_{ult} , который может выдержать сечение с правильно установленной продольной арматурой определяется в соответствии с выражением (11)

$$M_{ult}=\gamma_{b1}R_b b x(h_0-x/2) \quad (11)$$

Момент M_{ult}' , который может выдержать сечение с ошибочно установленной продольной арматурой, привязанной к биссектрисе угла загиба, равен

$$M_{ult}' = \gamma_{b1} R_b b x (h_0 - n - x/2).$$

Таким образом, M_{ult}' определяется в соответствии с выражением (12)

$$M_{ult}' = \gamma_{b1} R_b b x (h_0 - R_{s,оп} + R_{s,греб} + (R_{s,оп} - R_{s,греб})/(\sqrt{2}) - x/2). \quad (12)$$

Результаты и обсуждение

Сравним результаты расчета длин хомута с учетом оправок и без них при различных параметрах сечения изгибаемого линейного элемента.

Например, для балки, размерами сечения $b \times h = 30 \times 50$ см, с продольной верхней арматурой 2Ø16, нижней – 2Ø28, класса А500С, общая длина хомута составит

$$L = L_{1н} + L_{2в} + 2L_{36} + 2L_{D1} + 2L_{D2} = 209 + 222 + 2 \times 415,5 + 2 \times 32,2 + 2 \times 22 = 1370,3 \text{ (мм)}$$

Для балки с теми же параметрами общая длина хомута с учетом оправок

$$L_{оп} = L_{1н} + L_{2в} + 2L_{36} + 2L_{D1} + 2L_{D2} = 128 + 200 + 2 \times 288 + 2 \times 95,8 + 2 \times 39,3 = 1174 \text{ (мм)}$$

С учетом оправок длина хомута уменьшилась на 16,7%.

В таблице 2 показано изменение расхода длины хомута для различных размеров сечения $b \times h$, при минимально возможных диаметрах оправки $d_{s,оп}$ и соблюдении рекомендуемых параметров по коэффициенту армирования ($\mu_{min} = 0,1\%$, $\mu_{max} = 3\%$).

Таблица 2 - Изменение расхода длины хомута в % для различных размеров сечения и диаметров рабочей растянутой арматуры

Размеры сечения $b \times h$, см	μ_{min} , см ²	μ_{max} , см ²	Изменение расхода длины хомута в % при диаметре продольной арматуры d_s , мм													
			Ø6	Ø8	Ø10	Ø12	Ø14	Ø16	Ø18	Ø20	Ø22	Ø25	Ø28	Ø32	Ø36	Ø40
20×40	0,8	24	7,4	8,2	8,9	9,7	10,5	11,3	12,1	18,8	20,4	22,8	25,4	29,6	35	
23×40	0,92	27,6	7	7,7	8,4	9,1	9,8	10,6	11,3	17,5	19	21,2	23,5	27,3	32,2	37,9
25×40	1	30	6,7	7,4	8	8,7	9,4	10,1	10,8	16,8	18,1	20,3	22,5	26	30,6	35,8
25×50	1,25	37,5		6,1	6,7	7,3	7,8	8,4	9	13,8	14,9	16,5	18,3	21	24,3	28
30×50	1,5	45		5,7	6,2	6,7	7,2	7,7	8,3	12,6	13,6	15,2	16,7	19,2	22,1	25,3
35×50	1,75	52,5		5,3	5,7	6,2	6,7	7,2	7,7	11,7	12,6	14	15,4	17,6	20,2	23,1
35×60	2,1	63			5	5,4	5,9	6,3	6,7	10,2	10,9	12,1	13,3	15,1	17,3	19,6
40×60	2,4	72			4,7	5,1	5,5	5,9	6,3	9,5	10,2	11,3	12,5	14,2	16,1	18,2
45×60	2,7	81			4,5	4,8	5,2	5,6	5,9	9	9,6	10,7	11,7	13,3	15,1	17
45×80	3,6	108				3,9	4,2	4,5	4,8	7,3	7,8	8,6	9,5	10,7	12	13,5
50×80	4	120				3,8	4,1	4,3	4,6	6,9	7,5	8,2	9	10,2	11,5	12,8
55×80	4,4	132				3,6	3,9	4,2	4,4	6,7	7,1	7,9	8,6	9,7	10,9	12,2

Примечание к таблице 2. Цветом отмечены ячейки с количеством продольных растянутых стержней в один ряд: белый – 2 шт.; синий – 3 шт.; розовый – 4 шт.; оранжевый – $\mu \leq \mu_{min}$ (или $\mu \geq \mu_{max}$). Разное количество стержней обусловлено необходимостью соблюдения минимального коэффициента армирования $\mu_{min} = 0,1\%$.

На рисунке 8 показаны графики изменения расхода длины хомута в % при различных диаметрах продольной рабочей арматуры d_s для различных размеров сечения $b \times h$.

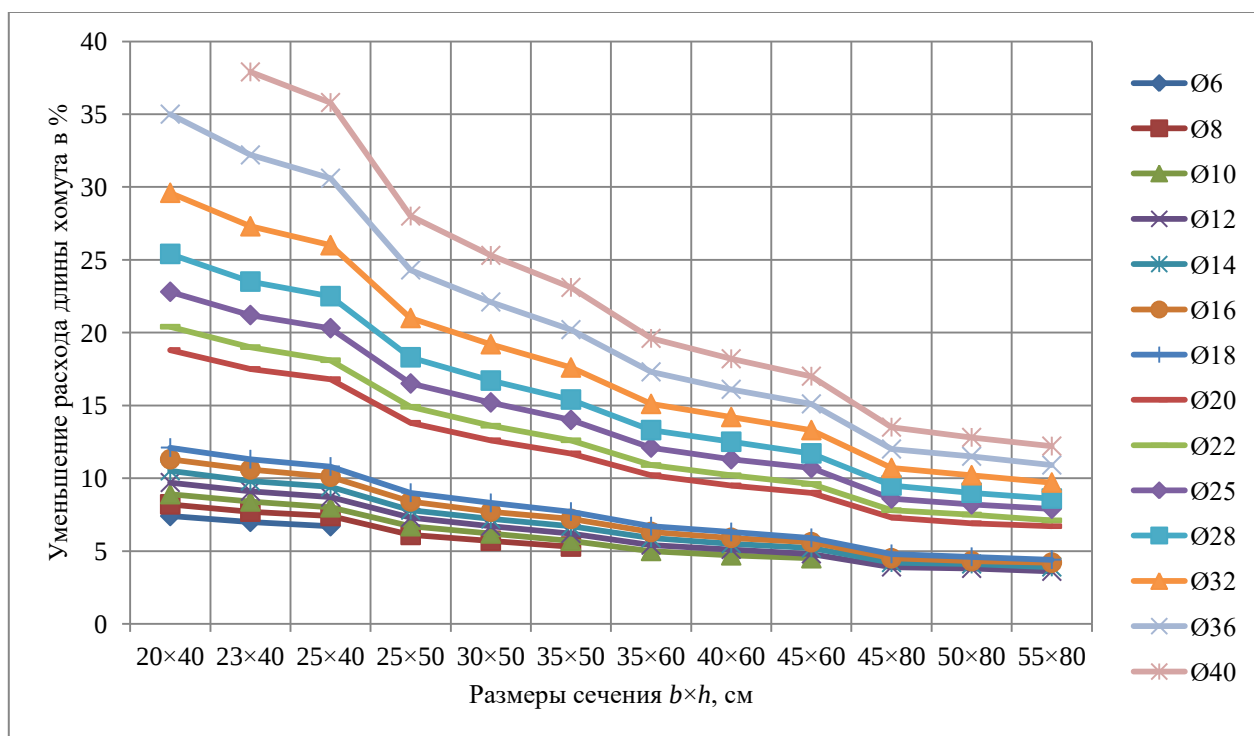


Рисунок 8 – Графики изменения расхода длины хомута в % при различных диаметрах продольной рабочей арматуры d_s для различных размеров сечения $b \times h$

Из таблицы 2 и графиков (рисунок 8) видно, что экономия составляет 5,6-37,9% длины хомута без учета отгибов. Очевидно, что при увеличении процента армирования и уменьшении размера сечения элемента, достигается большая экономия арматуры при использовании оправок – до 37,9% при рабочей продольной арматуре 2Ø40.

В таблице 3 показано изменение прочности нормального сечения с ошибочно установленной продольной арматурой, с привязкой к биссектрисе угла загиба, при использовании различных диаметров продольных рабочих растянутых стержней, при форме профиля 2ф (серповидный профиль). Размеры сечения $b \times h$ переменные, коэффициент армирования сечения от $\mu_{min}=0,1\%$ до $\mu_{max}=3\%$, при минимально возможных диаметрах оправки $d_{s,оп}$.

Таблица 3 - Изменение прочности в % для различных размеров сечения и диаметров рабочей растянутой арматуры

Размеры сечения $b \times h$, см	μ_{min} , см ²	μ_{max} , см ²	Изменение прочности в % при диаметре продольной арматуры d_s , мм													
			Ø6	Ø8	Ø10	Ø12	Ø14	Ø16	Ø18	Ø20	Ø22	Ø25	Ø28	Ø32	Ø36	Ø40
20×40	0,8	24	0,33	0,44	0,56	0,69	0,83	0,98	1,14	2,75	3,15	3,84	4,68	6,24	8,63	
23×40	0,92	27,6	0,33	0,44	0,56	0,69	0,82	0,97	1,13	2,69	3,06	3,7	4,45	5,78	7,68	10,78
25×40	1	30	0,33	0,44	0,56	0,68	0,82	0,96	1,11	2,66	3,02	3,63	4,33	5,56	7,25	9,87
25×50	1,25	37,5		0,34	0,43	0,53	0,63	0,74	0,85	2,02	2,28	2,7	3,17	3,95	4,92	6,25
30×50	1,5	45		0,34	0,43	0,53	0,63	0,74	0,84	1,99	2,23	2,63	3,06	3,75	4,59	5,67
35×50	1,75	52,5		0,34	0,44	0,53	0,62	0,73	0,83	1,96	2,2	2,58	2,99	3,62	4,38	5,31
35×60	2,1	63			0,36	0,43	0,51	0,6	0,68	1,59	1,78	2,07	2,39	2,86	3,4	4,05
40×60	2,4	72			0,36	0,43	0,51	0,59	0,68	1,58	1,76	2,05	2,35	2,81	3,31	3,91
45×60	2,7	81			0,36	0,43	0,51	0,59	0,67	1,57	1,75	2,03	2,32	2,76	3,25	3,81
45×80	3,6	108				0,32	0,38	0,43	0,49	1,15	1,27	1,47	1,67	1,96	2,28	2,63
50×80	4	120				0,32	0,37	0,43	0,49	1,14	1,27	1,46	1,66	1,95	2,26	2,59
55×80	4,4	132				0,32	0,37	0,43	0,49	1,14	1,26	1,45	1,65	1,93	2,24	2,56

Примечание к таблице 3. Цветом отмечены ячейки с количеством продольных растянутых стержней в один ряд: белый – 2 шт.; синий – 3 шт.; розовый – 4 шт.; оранжевый – $\mu \leq \mu_{min}$ (или $\mu \geq \mu_{max}$). Разное количество стержней обусловлено необходимостью соблюдения минимального коэффициента армирования $\mu_{min}=0,1\%$.

На рисунке 9 показаны графики изменения прочности нормального сечения в % при условии ошибочно установленной продольной арматуры (с привязкой к биссектрисе угла загиба) при различных диаметрах продольной рабочей арматуры d_s для различных размеров сечения $b \times h$.

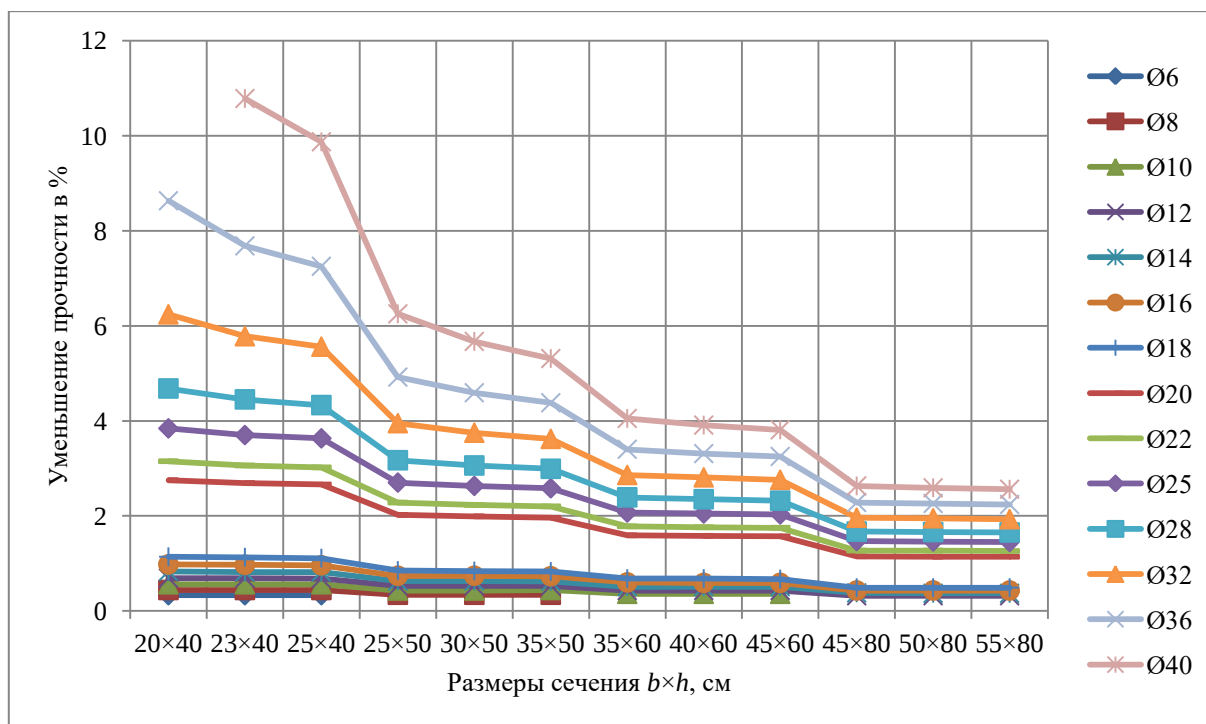


Рисунок 9 – Графики изменения прочности нормального сечения в % при различных диаметрах продольной арматуры d_s для различных размеров сечения $b \times h$

Из таблицы 3 и графиков (рисунок 9) видно, что при увеличении процента армирования и уменьшении размера сечения элемента, при неправильно расположенной продольной арматуре прочность элемента падает. Например, при использовании рабочей продольной арматуры 2Ø36 прочность уменьшается на 10,78%.

При ошибочной привязке продольной арматуры по биссектрисе угла загиба, если при установке арматуры монтажники ориентируются на толщину защитного слоя именно для продольной рабочей арматуры, то проектная рабочая высота сечения при этом соблюдается. Но в таком случае продольная рабочая арматура сдвинется в первоначальное положение и «потянет» за собой увеличение длины хомута.

Выводы

1. Установлены зависимости и уровень влияния применения различных видов хомутов, а также прочих факторов, на минимальную длину хомута при различных размерах сечения линейного изгибаемого железобетонного элемента и принятой продольной рабочей арматуры.

2. Получены данные, которые говорят об экономии длины хомута от 6,7-7,4%, при использовании рабочей арматуры 2Ø6, до 12,2-37,9%, при использовании рабочей арматуры 2Ø40, в рассмотренном диапазоне размеров сечения $(20 \times 40) \leq (b \times h) \leq (55 \times 80)$ см и коэффициенте армирования $0,1\% \leq \mu \leq 3\%$.

3. Проанализированы зависимости уменьшения прочности от 0,33% до 10,78% нормальных сечений балок в условиях ошибочной привязки продольной рабочей арматуры по биссектрисе угла загиба к хомутам.

Результаты работы позволят установить зависимости и уровень влияния применения различных видов хомутов, а также прочих факторов, на минимальный шаг и диаметр поперечной арматуры при различных размерах сечения линейного изгибаемого элемента и принятой продольной рабочей арматуры.

Полученные данные помогут получить эффективное решение армирования наклонных сечений минимальной стоимости при использовании различных диаметров поперечной арматуры в сочетании с переменным шагом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tamrazyan A.G., Alekseytsev A.V. Optimization of reinforced concrete beams under local mechanical and corrosive damage // *Engineering Optimization*. 2022. doi.org/10.1080/0305215X.2022.2134356
2. Chakrabarty B.K. Models for optimal design of reinforced concrete beams // *Journal of Structural Engineering*. 1992. Vol. 118. No. 11. doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1992)118:11(3238)
3. Coello C.C., Hernandez F.S. and Farrera F.A. Optimal design of reinforced concrete beams using genetic algorithms // *Journal of Intelligent Learning Systems and Applications*. 2014. Vol. 6. No. 4. doi.org/10.1016/S0957-4174(96)00084-X
4. Garstecki A., Glema A., Ścigałło J. Optimal design of reinforced concrete beams and frames // *Computer Assisted Mechanics and Eng. Sciences*. 1996. No. 3 (3). Pp. 223-231.
5. Demby M., Ścigałło J. Design aspects of the safe structuring of reinforcement in reinforced concrete bending beams // *Modern building materials, structures and techniques, MBMST 2016. Procedia Engineering* 172. 2017. Pp. 211-217. doi:10.1016/j.proeng.2017.02.051
6. Kuznetsov V.S., Shaposhnikova Y.A., Yandiev A.A. Selection of the optimal parameters of a reinforced concrete rectangular beam with single reinforcement // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. No. 962 (2): 022055. doi: 10.1088/1757-899X/962/2/022055
7. Jensen B.C. and Łapko A. On shear reinforcement design of structural concrete beams on the basis of theory of plasticity // *Journal of Civil Engineering and Management*. 2009. No. 15 (4). Pp. 395-403. doi.org/10.3846/1392-3730.2009.15.395-403
8. Minelli F. and Plizzari G.A. Shear design of FRC members with little or no conventional shear reinforcement // *Ailor Made Concrete Structures – Walraven & Stoelhorst (eds)*. 2008. doi:10.1201/9781439828410.ch100
9. Балакай А.А., Цыганов М.В., Алейник Д.В., Дмитренко Е.А. Зависимость несущей способности наклонных сечений на действие поперечной силы от изменения длины проекции наклонного сечения // *Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры*. 2020. № 4 (144). С. 50-55.
10. Филатов В.Б., Арцыбасов А.С., Багаутдинов М.А., Гордеев Д.И., Картунов А.И., Никитин Р.А. Анализ расчетных моделей при расчете прочности наклонных сечений железобетонных балок на действие поперечных сил // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2014. Том 16. № 4-3. С. 642-645.
11. Снежкина О.В., Егинов Э.В., Ладин Р.А. Оценка влияния вертикальных хомутов на прочность железобетонных балок при действии поперечных сил // *Региональная архитектура и строительство*. 2014. № 3. С. 57-61. Силантьев А.С., Лучкин Е.А. Работа изгибаемых элементов по наклонным сечениям с экстремально малым пролетом среза // *Бетон и железобетон*. 2020. № 2 (602). С. 28-33.
13. Тихонов И.Н., Саврасов И.П. Исследование прочности железобетонных балок с арматурой класса А500 при действии поперечных сил // *Жилищное строительство*. 2010. № 9. С. 32-37.
14. Аксёнов Н.Б., Задорожная А.В., Трофимова В.М., Сеницина Т.В., Назаров А.В. Исследование влияния отклонений положения рабочей арматуры от проектного на прочность безбалочных перекрытий // *Инженерный вестник Дона*. 2018. № 2 [Электронный ресурс] URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_113_Aksionov.pdf_91646016dd.pdf (дата обращения: 05.01.2023).
15. Яковлев С.Н., Поздеев В.М. Исследование железобетонных многопустотных плит перекрытий с дефектом смещения рабочей арматуры путем натурных испытаний // *Инженерные кадры - будущее инновационной экономики России*. 2016. № 5. С. 89-92.
16. Campione G., Monaco A., Minafò G. Shear strength of high-strength concrete beams: Modeling and design recommendations // *Engineering Structures*. 2014. No. 69 (9). Pp. 116-122. doi:10.1016/j.engstruct.2014.02.029
17. Zhuowei Wang A., Yufeng Liao and Weilun Wang. Effect of longitudinal reinforcement ratio and effective depth on shear capacity of PVA fiber high strength RC beams // *Advances in engineering research (AER)*. 2nd International Conference on Material Science, Energy and Environmental Engineering (MSEEE 2018). 2018. Vol. 169. doi:10.2991/mseee-18.2018.52

18. Кузнецов В.С., Кузнецов А.В., Смирнов М.Н. Нормативные допуски как факторы риска снижения долговечности строительных объектов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2005. № 5 (76). С. 80-81.
19. Кузнецов В.С., Прокуронова Е.А. Геометрические допуски как факторы риска снижения долговечности железобетонных элементов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2006. № 7 (90). С. 22-23.
20. Корчагин О.П., Зонина С.В. О специфике расчётов изгибаемых железобетонных конструкций по наклонным сечениям // Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация. 2018. № 1 (77). С. 12-20.
21. Kuznetsov V., Shaposhnikova Y. The cost of flexible elements of a rectangular profile // XIV International Scientific Conference «INTERAGROMASH 2021». Lecture Notes in Networks and Systems. 2022. Vol. 247. Pp. 33–40. doi:10.1007/978-3-030-80946-1_4
22. Kuznetsov V.S., Shaposhnikova Y.A. The structure of the content and cost of materials in bending reinforced concrete element with variable section height // Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 151. Pp. 181–187. doi:10.1007/978-3-030-72910-3_26
23. Merta I., Kolbitsch A., Kravanja S. Cost optimization of reinforced concrete beams // Conference: Sixth International Conference Concrete under Severe Conditions Environment & Loading. At: Mérida. Yucatán. México. 2010. [Online]. URL:researchgate.net/publication/282132306_Cost_Optimization_of_Reinforced_Concrete_Beams (date of application: 05.01.2023).
24. Сутягин А.Е. Практический способ расчёта поперечной арматуры в балках // Наука и безопасность. 2012. № 4. С. 65-69.
25. Духанин П.В., Макшанов Н.Я. Определение допустимых технологий для осуществления поперечного армирования арматурного каркаса с учетом условий и факторов производства // Ростовский научный журнал. 2017. № 6. С. 301-307.
26. Радкевич А.В., Нетеса А.Н. Определение и ранжирование организационно-технологических факторов, обуславливающих рациональные решения соединения арматуры // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. 2017. № 3 (69). [Электронный ресурс]. URL: cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-i-ranzhirovanie-organizatsionno-tehnologicheskikh-faktorov-obuslovliyayuschih-ratsionalnye-resheniya-soedineniya/viewer (дата обращения: 05.01.2023).
27. Кузнецова С.В., Симаков А.Л., Рожков А.Н., Мамин Ю.А., Варнавская Т.В. Расчет отклонения поперечных сечений арматуры при автоматизированной гибке // Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія: Приладобудування. 2015. № 50 (2). С. 106-114.
28. Biswas L. How to calculate cutting length of stirrups in beam and colum. [Online]. Civil Read. 2018. URL:civilread.com/cutting-length-stirrups/ (date of application: 05.01.2023).

REFERENCES

1. Tamrazyan A.G., Alekseytsev A.V. Optimization of reinforced concrete beams under local mechanical and corrosive damage. *Engineering Optimization*. 2022. doi.org/10.1080/0305215X.2022.2134356
2. Chakrabarty B.K. Models for optimal design of reinforced concrete beams. *Journal of Structural Engineering*. 1992. Vol. 118. No. 11. doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1992)118:11(3238)
3. Coello C.C., Hernandez F.S. and Farrera F.A. Optimal design of reinforced concrete beams using genetic algorithms. *Journal of Intelligent Learning Systems and Applications*. 2014. Vol. 6. No. 4. doi.org/10.1016/S0957-4174(96)00084-X
4. Garstecki A., Glema A., Ścigałło J. Optimal design of reinforced concrete beams and frames. *Computer Assisted Mechanics and Eng. Sciences*. 1996. No. 3 (3). Pp. 223-231.
5. Demby M., Ścigałło J. Design aspects of the safe structuring of reinforcement in reinforced concrete bending beams. Modern building materials, structures and techniques, MBMST 2016. *Procedia Engineering* 172. 2017. Pp. 211-217. doi:10.1016/j.proeng.2017.02.051
6. Kuznetsov V.S., Shaposhnikova Y.A., Yandiev A.A. Selection of the optimal parameters of a reinforced concrete rectangular beam with single reinforcement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. No. 962 (2): 022055. doi:10.1088/1757-899X/962/2/022055
7. Jensen B.C. and Łapko A. On shear reinforcement design of structural concrete beams on the basis of theory of plasticity. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2009. No. 15 (4). Pp. 395-403. doi.org/10.3846/1392-3730.2009.15.395-403
8. Minelli F. and Plizzari G.A. Shear design of FRC members with little or no conventional shear reinforcement. *Ailor Made Concrete Structures – Walraven & Stoelhorst (eds)*. 2008. doi:10.1201/9781439828410.ch100
9. Balakaj A.A., Cyganov M.V., Alejnik D.V., Dmitrenko E.A. Zavisimost' nesushhej sposobnosti naklonnyh sechenij na dejstvie poperechnoj sily ot izmenenija dliny proekcii naklonnogo sechenija [The dependence of

the bearing capacity of inclined sections on the action of the shear force on the change in the length of the projection of the inclined section] // *Vestnik Donbasskoj nacional'noj akademii stroitel'stva i arhitektury* [Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2020. No. 4 (144). Pp. 50-55 (rus)

10. Filatov V.B., Arcybasov A.S., Bagautdinov M.A., Gordeev D.I., Kortunov A.I., Nikitin R.A. Analiz raschetnyh modelej pri raschete prochnosti naklonnyh sechenij zhelezobetonnyh balok na dejstvie poperechnykh sil [Analysis of the design models for calculating the strength of inclined sections of reinforced concrete beams on the action of shear forces] // *Izvestija Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk* [Samara State University of Architecture and Civil Engineering]. 2014. Vol. 16. No. 4-3. Pp. 642-645 (rus)

11. Snezhkina O.V., Eginov Je.V., Ladin R.A. Ocenka vlijanija vertikal'nyh homutov na prochnost' zhelezobetonnyh balok pri dejstvii poperechnykh sil [Evaluation of the effect of vertical clamps on the strength of reinforced concrete beams under the action of transverse forces] // *Regional'naja arhitektura i stroitel'stvo* [Regional architecture and construction]. 2014. No. 3. Pp. 57-61 (rus)

12. Silant'ev A.S., Luchkin E.A. Rabota izgibaemykh jelementov po naklonnym sechenijam s jeks-tremal'no malym proletom sreza [The shear resistance of bending elements with extremal small shear span] // *Beton i zhelezobeton* [Concrete and reinforced concrete]. 2020. No. 2 (602). Pp. 28-33 (rus)

13. Tihonov I.N., Savrasov I.P. Issledovanie prochnosti zhelezobetonnyh balok s armaturoj klassa A500 pri dejstvii poperechnykh sil [Study of the strength of reinforced concrete beams with reinforcement class A500 under the action of transverse forces] // *Zhilishhnoe stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2010. No. 9. Pp. 32-37 (rus)

14. Aksjonov N.B., Zadorozhnaja A.V., Trofimova V.M., Sinicina T.V., Nazarov A.V. Issledovanie vlijanija otklonenij polozhenija rabochej armatury ot proektnogo na prochnost' bezbalochnykh perekrytij [Investigation of the influence of the deviations of the position of the working armature from the project on the bearing strength of the overlap] // *Inzhenernyj vestnik Dona* [Engineering journal of Don]. 2018. No. 2 [Online] URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_113_Aksionov.pdf_91646016dd.pdf (date of application: 05.01.2023) (rus)

15. Jakovlev S.N., Pozdeev V.M. Issledovanie zhelezobetonnyh mnogopustotnykh plit perekrytij s defektom smeshhenija rabochej armatury putem naturnykh ispytanij [Investigation of reinforced concrete multi-hollow floor slabs with a displacement defect of working reinforcement by field tests] // *Inzhenernye kadry - budushhee innovacionnoj jekonomiki Rossii* [Engineering personnel - the future of the innovative economy of Russia]. 2016. No. 5. Pp. 89-92 (rus)

16. Campione G., Monaco A., Minafò G. Shear strength of high-strength concrete beams: Modeling and design recommendations // *Engineering Structures*. 2014. No. 69 (9). Pp. 116-122. doi:10.1016/j.engstruct.2014.02.029

17. Zhuwei Wang A., Yufeng Liao and Weilun Wang. Effect of longitudinal reinforcement ratio and effective depth on shear capacity of PVA fiber high strength RC beams // *Advances in engineering research (AER)*. 2nd International Conference on Material Science. Energy and Environmental Engineering (MSEEE 2018). 2018. Vol. 169. doi:10.2991/mseee-18.2018.52

18. Kuznetsov B.C., Kuznetsov A.B., Smirnov M.N. Normativnye dopuski kak faktory riska snizhenija dolgovechnosti stroitel'nykh ob'ektov [Regulatory tolerances as risk factors for reducing the durability of construction objects] // *Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tehnologii XXI veka* [Building materials, equipment, technologies XXI]. 2005. No. 5 (76). Pp. 80-81 (rus)

19. Kuznetsov B.C., Prokuronova E.A. Geometricheskie dopuski kak faktory riska snizhenija dolgovechnosti zhelezobetonnykh jelementov [Geometric tolerances as risk factors for reducing the durability of reinforced concrete elements] // *Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tehnologii XXI veka* [Building materials, equipment, technologies XXI]. 2006. No. 7 (90). Pp. 22-23. (rus)

20. Korchagin O.P., Zonina S.V. O specifike raschjotov izgibaemykh zhelezobetonnykh konstrukcij po naklonnym sechenijam [On the specifics of calculations of bent reinforced concrete structures along inclined sections] // *Social'no-jekonomicheskie i tehicheskie sistemy: issledovanie, proek-tirovanie, optimizacija* [Socio-economic and technical systems: research, design, optimization]. 2018. No. 1 (77). Pp. 12-20 (rus)

21. Kuznetsov V., Shaposhnikova Y. The cost of flexible elements of a rectangular profile // XIV International Scientific Conference «Interagromash 2021». *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022. Vol. 247. Pp. 33-40. doi:10.1007/978-3-030-80946-1_4

22. Kuznetsov V.S., Shaposhnikova Y.A. The structure of the content and cost of materials in bending reinforced concrete element with variable section height // *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021. Vol. 151. Pp. 181-187. doi:10.1007/978-3-030-72910-3_26

23. Merta I., Kolbitsch A., Kravanja S. Cost optimization of reinforced concrete beams // Sixth International Conference Concrete under Severe Conditions Environment & Loading. At: Mérida. Yucatán. México. 2010. [Online]. URL: researchgate.net/publication/282132306_Cost_Optimization_of_Reinforced_Concrete_Beams (date of application: 05.01.2023).

24. Sutjagin A.E. Prakticheskij sposob raschjota poperechnoj armatury v balkah [A practical way to calculate transverse reinforcement in beams] // *Nauka i bezopasnost'* [Science and security]. 2012. No. 4. Pp. 65-69 (rus)

25. Duhanin P.V., Makshanov N.Ja. Opredelenie dopustimyh tehnologij dlja osushhestvlenija pope-rechnogo armirovanija armaturnogo karkasa s uchetom uslovij i faktorov proizvodstva [Determination of acceptable technologies

for the implementation of transverse reinforcement of the reinforcing cage, taking into account the conditions and factors of production] // *Rostovskij nauchnyj zhurnal* [Rostov scientific journal]. 2017. No. 6. Pp. 301-307 (rus)

26. Radkevich A.V., Netesa A.N. Opredelenie i ranzhirovanie organizacionno-tehnologicheskikh faktorov, obuslovlivajushhih racional'nye reshenija soedinenija armatury [Determination and ranking of organizational and technological factors that determine rational solutions for rebar connection] // *Nauka i progress transporta. Vestnik Dnepropetrovskogo nacional'nogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta* [Science and progress of transport. Bulletin of the Dnepropetrovsk National University of Railway Transport]. 2017. No. 3 (69). [Online]. URL:cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-i-ranzhirovanie-organizatsionno-tehnologicheskikh-faktorov-obuslovlivayuschih-ratsionalnye-resheniya-soedineniya/viewer (date of application: 05.01.2023) (rus)

27. Kuznecova S.V., Simakov A.L., Rozhkov A.N., Mamin Ju.A., Varnavskaja T.V. Raschet otklonenija poperechnykh sechenij armatury pri avtomatizirovannoju gibke [Calculation of the deviation of the cross sections of reinforcement during automated bending] // *Visnik nacional'nogo tehničnogo universitetu Ukraïni «Kiïvs'kij politehničnij institut». Serija: Priladobuduvannja* [Bulletin of the National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute». Series: Instrumentation]. 2015. No. 50 (2). Pp. 106-114 (rus)

28. Biswas L. How to calculate cutting length of stirrups in beam and colum. [Online]. Civil Read. 2018. URL:civilread.com/cutting-length-stirrups/ (date of application: 05.01.2023).

Информация об авторах:

Шапошникова Юлия Александровна

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

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

E-mail: yuliatalyzova@yandex.ru

Кузнецов Виталий Сергеевич

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

кандидат технических наук, профессор.

E-mail: aspgbk20@yandex.ru

Information about authors:

Shaposhnikova Yulia A.

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,

candidate in technical sciences, associate professor, associate professor of the department of Reinforced Concrete and stone Structures.

E-mail: yuliatalyzova@yandex.ru

Kuznetsov Vitaly S.

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,

candidate in technical sciences, professor.

E-mail: aspgbk20@yandex.ru

В.С. ФЕДОРОВ¹, Н.Н. ТРЕКИН², Э.Н. КОДЫШ³, И.А. ТЕРЕХОВ¹

¹ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», г. Москва, Россия

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

³АО «ЦНИИПромзданий», г. Москва, Россия

КРИТЕРИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ КАТЕГОРИИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОЛОНН, РИГЕЛЕЙ, БАЛОК И ФЕРМ

Аннотация. В статье рассмотрен процесс формирования критериев оценки в процессе эксплуатации категории технического состояния железобетонных колонн, ригелей, балок и ферм. Критерии ограниченно-работоспособного и аварийного состояния определялись с помощью расчетов по методу предельных усилий с учетом закладываемых при проектировании запасов несущей способности. В качестве примера рассмотрено по одному характерному расчетному дефекту для каждого типа конструкций. Установление критериев для дефектов, которые не были рассмотрены в расчетах, выполнено путем анализа и исследования характерных дефектов строительных конструкций зданий и сооружений на основании данных проведенных ранее исследований, а также по результатам рассмотрения других нормативно-технических документов. Приведенные в итоговой таблице критерии были предложены к включению во вторую редакцию пересмотра ГОСТ 31937–2011 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния».

Ключевые слова: дефект, железобетон, колонна, ригель, балка, ферма, категория технического состояния

V.S. FEDOROV¹, N.N. TREKIN², E.N. KODYSH³, I.A. TEREKHOV¹

¹Russian University of Transport, Moscow, Russia

²National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

³JSC TSNIIPromzdaniy, Moscow, Russia

CRITERIA FOR ASSESSING THE CATEGORY OF TECHNICAL CONDITION OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS, CROSSBARS, BEAMS AND TRUSSES

Abstract. The article considers the process of formation of evaluation criteria in the course of operation of the category of technical condition of reinforced concrete columns, crossbars, beams and trusses. Criteria for limited serviceability and emergency conditions were determined using calculations using the method of limiting forces, taking into account the bearing capacity reserves laid down in the design. As an example, one characteristic design defect for each type of structure is considered. The establishment of criteria for defects that were not considered in the calculations was carried out by analyzing and studying the characteristic defects of building structures of buildings and structures based on data from previous studies, as well as based on the results of consideration of other regulatory and technical documents. The criteria given in the final table were proposed for inclusion in the second edition of the revision of GOST 31937–2011 «Buildings and constructions. Rules of inspection and monitoring of the technical condition».

Keywords: defect, reinforced concrete, column, crossbar, beam, truss, technical condition category.

Введение

Сравнение ряда экспериментальных данных, учитывающих работу несущих конструкций в особом предельном состоянии, с теоретическими, полученными численными и аналитическими методами, показали, что в железобетонных конструкциях имеются резервы по прочности до 30 %, а по деформативности до 50 % [1-5].

В процессе эксплуатации зданий и сооружений в конструкциях происходит накопление дефектов в результате внешних воздействий и внутренних процессов деградации материалов, поэтому с целью предупреждения их преждевременного выхода из строя необходимо проводить обследование технического состояния с определением причин возникновения дефектов и с последующей их ликвидацией.

Обследование выполняют в соответствии с указаниями ГОСТ 31937-2011 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния», в котором в настоящее время отсутствуют количественные значения критериев технического состояния, по которым можно назначить категорию технического состояния конструкций при визуальном обследовании.

Для установления границы перехода строительных конструкций с дефектами из работоспособного состояния в ограниченно-работоспособное и из ограниченно-работоспособного в аварийное (определение параметра дефекта), с учетом закладываемых при проектировании запасов несущей способности, в [6, 7] предложены следующие параметры для оценки технического состояний конструкций:

- сниженная несущая способность сечения для ограниченно-работоспособного состояния до 90 %; по второй группе предельных состояний до 80 %.
- сниженная несущая способность сечения для аварийного состояния меньше 75 %; по второй группе предельных состояний – меньше 65 %.

Под «параметром дефекта» подразумевается величина, характеризующая размер дефекта, которая может быть выражена численно и определена при визуальном обследовании, а также свидетельствует о размере дефекта. Например: уменьшение сечения (в %); потеря сечения арматуры вследствие коррозии (в %).

Подробное обоснование подобного подхода, а также критерии оценки технического состояния железобетонных плит приведены в статье [6, 7].

В статье [8] было предложено определять критерии ограниченно-работоспособного и аварийного состояния с помощью расчетов по методу предельных усилий.

Модели и методы

Для формирования критериев технического состояния конструкций были выполнены следующие численные исследования:

- для колонн: уменьшение сечения колонны; отклонение от вертикали; уменьшение площади сечения арматуры; уменьшение прочности бетона;
- для ригелей и балок: уменьшение площади сечения рабочей арматуры; уменьшение высоты сечения в сжатой зоне; увеличение прогиба; увеличение ширины раскрытия трещин; снижение прочности бетона;
- для стропильных ферм и решетчатых балок: уменьшение площади сечения рабочей арматуры поясов и решетки; уменьшение высоты сечения поясов и решетки; увеличение ширины раскрытия трещин нижнего пояса; увеличение прогиба; уменьшение прочности бетона верхнего пояса.

Для установления критериев предлагается рассмотреть влияние не менее трех значений того или иного дефекта для определения зависимости, которая позволяет прогнозировать сниженную несущую способность на всем диапазоне возможных значений.

Также имеются дефекты, для которых нельзя выполнить расчетное обоснование. Установление критериев для таких дефектов принято путем анализа и исследования

характерных дефектов строительных конструкций зданий и сооружений на основании обработки базы данных обследований [8], исследований [9-15], а также по результатам рассмотрения следующих нормативно-технических документов:

- СП 70.13330.2012 «Несущие и ограждающие конструкции» (раздел 6);
- СП 454.1325800.2019 «Здания жилые многоквартирные. Правила оценки аварийного и ограниченно-работоспособного технического состояния» (раздел 5);
- Методика оценки остаточного ресурса несущих конструкций зданий и сооружений (приложение Б) [16];
- СТО 70238424.27.010.011-2008 Здания и сооружения объектов энергетики. Методика оценки технического состояния (приложение Б) [17];
- Пособие по обследованию строительных конструкций зданий (приложение II) [18];
- Рекомендации по оценке надежности строительных конструкций зданий и сооружений по внешним признакам (раздел 2) [19].

В качестве примера рассмотрим по одному характерному расчетному дефекту для каждого типа конструкций.

Результаты исследования и их анализ

Уменьшение сечения колонн. Ввиду многообразия расчетных ситуаций рассматривались колонны с наиболее часто применяемыми сечениями 300×300 мм, 400×400 мм и 400×500 мм следующих типов:

- тип А – рабочее армирование 4Ø32А400, класс бетона В15;
- тип Б – рабочее армирование 4Ø20А400, класс бетона В20;
- тип В – рабочее армирование 4Ø12А400, класс бетона В45.

Двустороннее уменьшение сечения колонны моделировалось изменением геометрических характеристик сечения.

Для разработки критериев оценки технического состояния железобетонных колонн были выполнены расчеты с уменьшением сечения колонн на 4, 8, 12 и 15 %.

Согласно рисунку 1 двустороннее уменьшение сечения колонны наиболее опасно для колонн типа В, для колонн типа Б отмечается снижение влияния, а для колонн типа А отмечено слабое влияние.

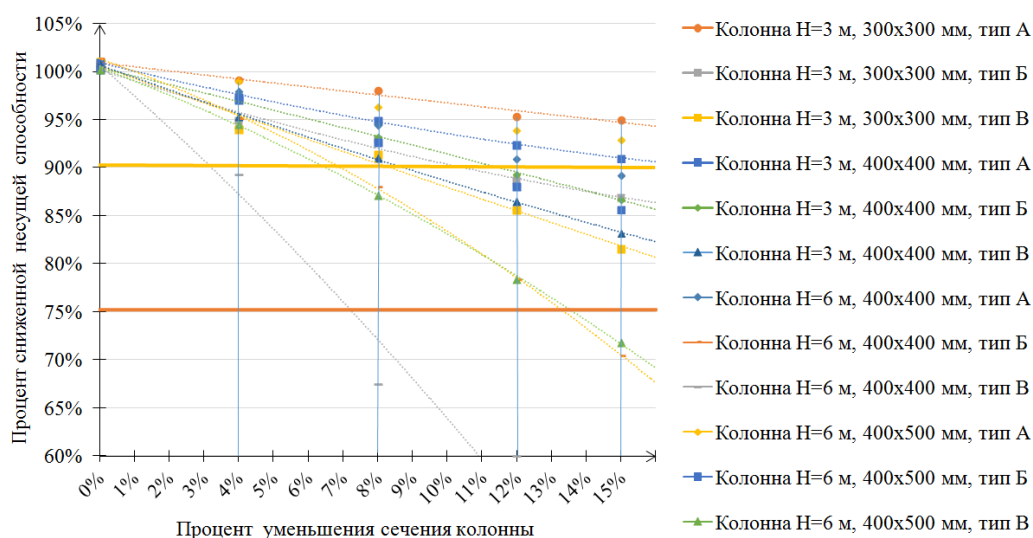


Рисунок 1 – График сниженной несущей способности в процентах в результате двустороннего уменьшения сечения колонны

При двустороннем уменьшении сечения колонны на 8 % среднее значение сниженной несущей способности составляет 90,6 %, что может соответствовать ограниченно-работоспособному состоянию. При двустороннем уменьшении сечения колонны на 15 % среднее значение сниженной несущей способности уменьшается до 81,1 %, но не достигает значения в 75 %.

Однако, учитывая критерии по СТО 70238424.27.010.011 [17], а также то, что часть колонн типа В имеет значения несущей способности ниже 75 %, а также то, что в расчетах не рассматривались колонны выше 6 м, предложено, несколько в запас, принять значение критерия аварийного состояния при уменьшении сечения на 15 %.

Для железобетонных колонн с односторонним уменьшением высоты сечения рекомендованы более жесткие требования: 5% – для ограниченно-работоспособного состояния; 10% – для аварийного состояния.

Уменьшение высоты сечения ригелей и балок. Были рассмотрены типовые ригели для опирания многпустотных и ребристых плит таврового сечения по ГОСТ 18980-2015 «Ригели железобетонные для многоэтажных зданий. Технические условия», а также балка прямоугольного сечения. Уменьшение высоты сечения на 5, 10, 15 и 20 % моделировалось изменением геометрических характеристик сечения, приведенного в таблице 1.

Таблица 1 – Поперечное сечение ригелей и балок

Тип ригеля или балки	Поперечное сечение (размеры в мм)	Тип ригеля или балки	Поперечное сечение (размеры в мм)
РДП 5,56 (бетон В30, арматура А600)		РДР 5,56 (бетон В30, арматура А600)	
РДП 6,76 (бетон В30, арматура А600)		РДР 8,56 (бетон В40, арматура А600)	
Балка прямоугольного сечения, L=2980 мм (бетон В20, арматура А400)			

Согласно рисунку 2 для железобетонных ригелей и балок уменьшение общей высоты сечения в сжатой зоне приводит к значительному снижению несущей способности.

При уменьшении высоты сечения в сжатой зоне на 10% (от общей высоты сечения) среднее значение сниженной несущей способности составляет 88,4 %, а при уменьшении высоты сечения в сжатой зоне на 20% – 75,4 %. Учитывая, что при нарушении монолитности из-за пересекающихся трещин или сколов бетона в сжатой зоне конструкции назначается аварийное состояние, для ригелей и балок были назначены более жесткие значения критериев уменьшения высоты сечения в сжатой зоне: для ограниченно-работоспособного – 5%, для аварийного – 10%. Назначенные критерии соответствуют значениям, приведенным в СТО 70238424.27.010.011 [17].

Снижение прочности бетона верхнего пояса стропильных ферм и решетчатых балок. Были рассмотрены наиболее распространенные типы стропильных ферм [20] с пролетами 18 и 24 м по ГОСТ 20213-2015 «Фермы железобетонные. Технические условия» и решетчатых балок с пролетами 12 и 18 м ГОСТ 20372-2015 «Балки стропильные и подстропильные железобетонные. Технические условия». Уменьшение прочности бетона на 15 и 25 % моделировалось заданием меньшего класса бетона в элементах верхнего пояса, сечения которых приведены в таблице 2.

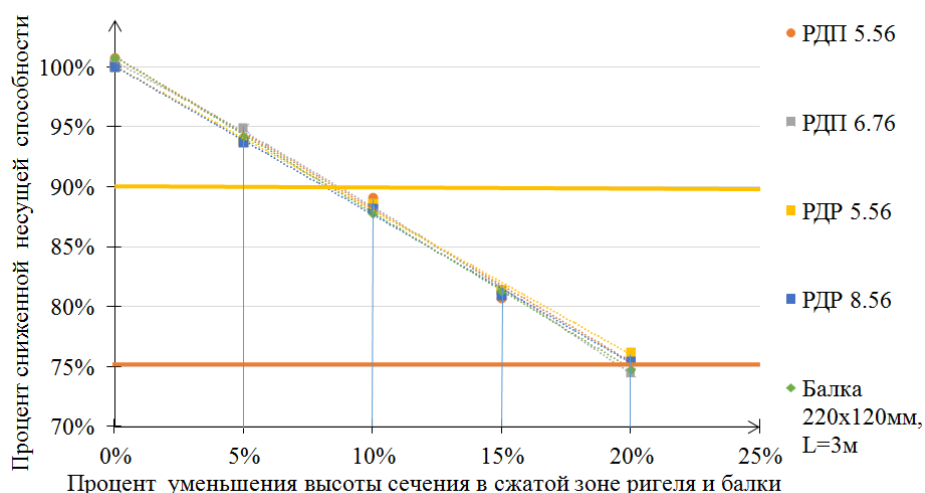


Рисунок 2 – График сниженной несущей способности в процентах в результате уменьшения высоты сечения в сжатой зоне ригелей

Таблица 2 – Поперечное сечение верхнего пояса

Тип фермы или балки	Поперечное сечение (размеры в мм)	Тип фермы или балки	Поперечное сечение (размеры в мм)
ФБС18 (бетон В30, арматура А400)		ФБС24 (бетон В30, арматура А400)	
БРД12 (бетон В40, арматура А400)		БРД18 (бетон В40, арматура А400)	

При уменьшении прочности бетона на 15% среднее значение сниженной несущей способности составляет 89,9 %, что может соответствовать ограниченно-работоспособному состоянию (рисунок 3). При уменьшении прочности бетона на 25% среднее значение процента несущей способности уменьшается до 77,8 %, что может соответствовать аварийному состоянию. Допускать большее значение уменьшения прочности бетона в стропильных конструкциях нецелесообразно.

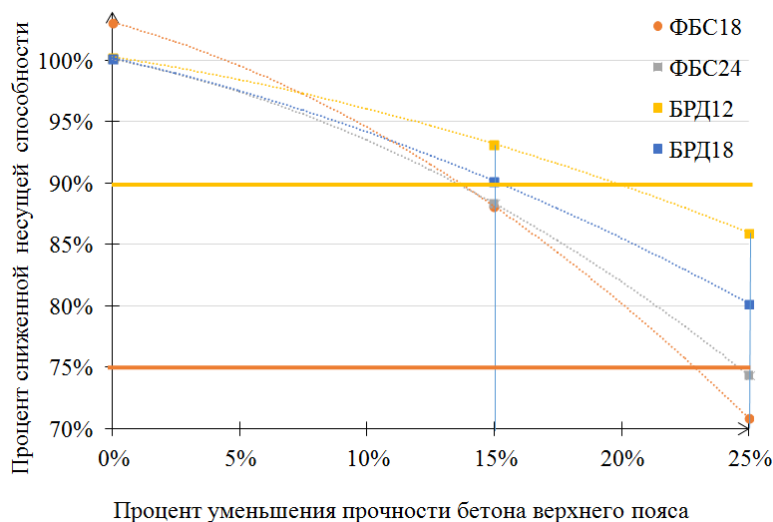


Рисунок 3 – График сниженной несущей способности в процентах в результате уменьшения прочности бетона в верхних поясах ферм и решетчатых балок

Сравнительный анализ результатов снижения несущей способности, полученных экспериментально, с данными, приведенными в нормативных документах [16, 17, 19], позволил предложить критерии для определения категории технического состояния железобетонных стропильных ферм и решетчатых балок (таблица 3).

Таблица 3 – Критерии технического состояния железобетонных стропильных ферм и решетчатых балок

Категория технического состояния	Снижение прочности бетона		
	Критерий по СТО 70238424.27.010.011 [17]	Критерий по методике оценки остаточного ресурса по внешним признакам [16, 19]	Принятый критерий
Ограниченно-работоспособное	15 %	20 %	15 %
Аварийное	20%	30 %	25 %

Принятые критерии оценки технического состояния. С применением данного подхода были получены критерии для оценки технического состояния железобетонных колонн, ригелей, балок и стропильных конструкций с наиболее часто встречающимися дефектами (таблица 4).

Таблица 4 – Критерии для оценки категории технического состояния железобетонных конструкций

№ п/п	Дефект	Критерий оценки технического состояния	Категория технического состояния	
			Ограниченно-работоспособное	Аварийное
1	2	3	4	5
1. Железобетонные колонны				
1.1	Отклонение от вертикали оси колонны	Смещение в плане центра тяжести верхнего сечения от вертикальной оси, проведенной из центра тяжести нижнего сечения колонны приведенное к высоте колонны	1/150 высоты колонны	более 1/100 высоты колонны
1.2	Выгиб (кривизна) колонны	Стрела выгиба колонны приведенное к высоте колонны	1/150 высоты колонны	более 1/100 высоты колонны
1.3	Трещины нормальные к продольной оси элемента в условиях неагрессивной среды	Ширина раскрытия трещин, мм	0,6	1,0
1.4	Трещины наклонные к продольной оси элемента в условиях неагрессивной среды	Ширина раскрытия трещин, мм	0,6	1,0
1.5	Трещины, образовавшиеся вследствие коррозии арматуры*	Визуальные признаки	1) Продольные трещины в бетоне вдоль арматурных стержней от коррозии арматуры на участке элемента. 2) Коррозия арматуры до 12%. 3) Отделение защитного слоя бетона и оголение части поверхности арматуры	1) Коррозия арматуры до 25%. 2) Оголение всего диаметра арматуры стержня в опорной зоне
1.6	Смятие (раздробление) бетона в сжатой зоне*	Визуальные признаки	1) Скол бетона не более толщины защитного слоя бетона. 2) Силовые трещины длиной не более 10 см	1) Скол бетона более толщины защитного слоя бетона. 2) Силовые трещины длиной более 10 см
1.7	Смещение в плане ферм/балок покрытия относительно разбивочных осей на опорных поверхностях колонн	Смещение в плане ферм/балок покрытия относительно разбивочных осей на опорных поверхностях колонн от проектного положения, мм	30	40
1.8	Выпучивание сжатой продольной арматуры с отслоением защитного слоя*	Визуальные признаки	Продольные трещины раскрытием более 0,4мм	1) Отслоение защитного слоя 2) Скол бетона более толщины защитного слоя бетона
1.9	Уменьшение сечения одностороннее	Потеря рабочего сечения, %	5	10
1.10	Уменьшение сечения двустороннее	Потеря рабочего сечения, %	8	15
1.11	Снижение прочности бетона	Снижение прочности бетона, %	15	30
1.12	Уменьшение сечения элементов крепления и (или) сварных швов	Уменьшение сечения элементов крепления и (или) сварных швов, %	10	20

Безопасность зданий и сооружений

№ п/п	Дефект	Критерий оценки технического состояния	Категория технического состояния	
			Ограниченно-работоспособное	Аварийное
1	2	3	4	5
2. Железобетонные ригели и балки				
2.1	Смещение в плане конструкции на опоре	Смещение в плане конструкции покрытия относительно разбивочных осей на опорных поверхностях колонн от проектного положения, мм	30	40
2.2	Прогиб элементов	Прогиб	1/130 длины элемента	1/100
2.3	Трещины, образовавшиеся вследствие коррозии арматуры*	Ширина раскрытия трещин, мм	1) Продольные трещины в бетоне вдоль арматурных стержней от коррозии арматуры на участке элемента. 2) Коррозия арматуры до 12%. 3) Отделение защитного слоя бетона и оголение части поверхности арматуры	1) Коррозия арматуры до 25%. 2) Оголение всего диаметра арматуры стержня в опорной зоне
2.4	Поперечные трещины	Раскрытие трещин, мм	0,6	1,0
2.5	Трещины наклонные к продольной оси	Раскрытие трещин, мм	0,6	1,0
2.6	Трещины от нарушения анкеровки и сдвига арматуры	Ширина раскрытия трещин, мм	0,2	0,4
2.7	Уменьшение высоты сечения	Уменьшение высоты сечения, %	5	10
2.8	Раздробление бетона в сжатой зоне	Визуальные признаки	Образование лещадок на боковых гранях	Нарушение монолитности из-за пересекающихся трещин, сколов
2.9	Уменьшение сечения элементов крепления и (или) сварных швов	Уменьшение сечения элементов крепления и (или) сварных швов, %	10%	20%
2.10	Снижение прочности бетона	Снижение прочности бетона, %	15%	30%
3. Железобетонные стропильные фермы и решетчатые балки				
3.1	Прогиб ферм/балок покрытия	Прогиб	1/160 длины элемента	1/110
3.2	Уменьшение сечения элементов крепления и (или) сварных швов	Уменьшение сечения элементов крепления и (или) сварных швов, %	10	20
3.3	Трещины в балках и элементах ферм (поясах, раскосах), образовавшиеся вследствие коррозии арматуры*	Ширина раскрытия трещин, мм	1) Продольные трещины в бетоне вдоль арматурных стержней от коррозии арматуры на участке элемента. 2) Коррозия арматуры до 12%. 3) Отделение защитного слоя бетона и оголение части поверхности арматуры	1) Коррозия арматуры до 25%. 2) Оголение всего диаметра арматуры стержня в опорной зоне
3.4	Поперечные трещины в балках и в элементах ферм (поясах, раскосах)	Ширина раскрытия трещин, мм	0,6	1,0

№ п/п	Дефект	Критерий оценки технического состояния	Категория технического состояния	
			Ограниченно-работоспособное	Аварийное
1	2	3	4	5
3.5	Уменьшение сечения одностороннее	Уменьшение сечения, %	5	8
3.6	Уменьшение сечения двустороннее	Уменьшение сечения, %	8	10
3.7	Смятие (раздробление) бетона в сжатой зоне	Визуальные признаки	Образование лещадок на боковых гранях	Нарушение, монолитности, пересекающиеся трещины, сколы
3.8	Погнутость (выпучивание) сжатой продольной арматуры с отслоением от ядра сечения элемента*	Визуальные признаки	Продольные трещины раскрытием более 0,4мм	1) Отслоение защитного слоя на длине более 10 см. 2) сколы бетона на глубину более защитного слоя бетона
3.9	Потеря прочности бетона фермы/балки, %	Снижение прочности бетона, %	15	25
Примечание – для дефектов, отмеченных (*), оценка производится по одному наихудшему параметру.				

Выводы

1. Были определены критерии ограниченно-работоспособного и аварийного состояния с помощью расчетов по методу предельных усилий. В качестве основного показателя была принята сниженная несущая способность в процентах. Результаты проведенных расчетов и назначенные критерии согласуются с критериями, приведенными в нормативных документах.

2. Установление критериев для дефектов, которые не были рассмотрены в расчетах, принято путем анализа и исследования характерных дефектов строительных конструкций зданий и сооружений на основании проведенных ранее обследований, а также по результатам рассмотрения других нормативно-технических документов.

3. Приведенные в таблице 4 критерии были предложены к включению во вторую редакцию пересмотра ГОСТ 31937–2011 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кодыш Э.Н., Трекин Н.Н., Федоров В.С., Терехов И.А. Железобетонные конструкции. В 2 ч. Ч. 1 Расчет конструкций: учебник для вузов. 2-е издание, дополненное и переработанное. М.: Издательство АСВ, 2022. 388 с.
2. Трекин Н.Н., Кодыш Э.Н. Особое предельное состояние железобетонных конструкций и его нормирование // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 5. С. 4–9.
3. Trekin N.N., Kodysh E.N., Shmakov S.D., Terekhov I.A., Kudiyakov K.L. Determination of the criteria of deformation in a special limiting state // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2021. Vol. 1. Pp. 108-116. URL: <https://ijccse.iasv.ru/index.php/ijccse/issue/view/51/62>. (eng)
4. Фаликман В.Р., Степанова В.Ф. Нормативные сроки службы бетонных и железобетонных конструкций и принципы их проектирования по параметрам долговечности // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 6. С. 13-22.
5. Чирков В.П. Прикладные методы теории надежности в расчетах строительных конструкций. М.: Маршрут, 2006. 620 с.
6. Ефремов А.М. Учет совместного влияния дефектов на несущую способность конструкций / А.М. Ефремов, Д.В. Бойко, Е.Ю. Сергеевцев, Н.Н. Трекин, Э.Н. Кодыш, И.А. Терехов, С.Д. Шмаков // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 8. С. 11–18.
7. Трекин Н.Н., Кодыш Э.Н., Терехов И.А., Шмаков С.Д., Щедрин О.С. Методика определения эксплуатационной безопасности зданий и их конструкций // Academia. Архитектура и строительство. 2022. № 4. С. 152-159.

8. Терехов И.А. Критерии оценки технического состояния железобетонных плит при коррозии арматуры // Строительство и реконструкция. 2022. № 6 (104). С. 128-139.
9. Карпенко Н.И., Карпенко С.Н., Ярмаковский В.Н., Ерофеев В.Т. О современных методах обеспечения долговечности железобетонных конструкций // Academia. Архитектура и строительство. 2015. № 1. С. 93-102.
10. Тамразян А.Г. Вероятностный метод расчета долговечности железобетонных конструкций, подверженных воздействию хлоридов // В сборнике трудов конференции «Актуальные проблемы строительной отрасли и образования – 2021». М.: НИУ МГСУ. С. 100-106.
11. Frolov, N.V., Smolyago, G.A. Reinforced concrete beams strength under power and environmental influences. Magazine of Civil Engineering. 2021. 103(3). Article No. 10303. (eng)
12. Jun Kang Chow, Kuan-fu Liu, Pin Siang Tan, Zhaoyu Su, Jimmy Wu, Zhaofeng Li, Yu-Hsing Wang Automated defect inspection of concrete structures. Automation in Construction. 2021. Vol. 132. Article No. 103959. (eng)
13. Sina Mansourdehghan, Kiarash M. Dolatshahi, Amir Hossein Asjodi Data-driven damage assessment of reinforced concrete shear walls using visual features of damage. Journal of Building Engineering. 2022. Vol. 53. Article No. 104509. (eng)
14. Tsvetkov R., Shardakov I., Shestakov A., Gusev G., Epin V. Deformation monitoring of load-bearing reinforced concrete beams. Procedia Structural Integrity. 2017. Vol. 5. Pp. 620-626. (eng)
15. Ye H., Fu C., Jin N., Jin X. Performance of reinforced concrete beams corroded under sustained service loads: A comparative study of two accelerated corrosion techniques. Construction and Building Materials. 2018. No. 162. Pp. 286–297. (eng)
16. Методика оценки остаточного ресурса несущих конструкций зданий и сооружений [Электронный ресурс]. ФАУ «ФЦС», 2018. 50 с. Режим доступа: https://www.faufcc.ru/upload/methodical_materials/mp34_2018.pdf.
17. СТО 70238424.27.010.011–2008 Здания и сооружения объектов энергетики. Методика оценки технического состояния — М.: НП «ИНВЭЛ», 2008. 182 с.
18. Пособие по обследованию строительных конструкций зданий. М.: АО «ЦНИИПрозданий», 1997. 179 с.
19. Рекомендации по оценке надежности строительных конструкций зданий и сооружений по внешним признакам. М.: ФГУП ЦПП, 2001. 100 с.
20. Федоров В.С., Кодыш Э.Н., Трекин Н.Н., Терехов И.А. Железобетонный каркас одноэтажного производственного здания: учебное пособие. М.: ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2021. 213 с.

REFERENCES

1. Kodysh E.N., Trekin N.N., Fedorov V.S., Terekhov I.A. Zhelezobetonnye konstrukcii. V 2 ch. Ch. 1 Raschet konstrukcij: uchebnik dlja vuzov. [Reinforced concrete structures. In 2 parts. Part 1 Calculation of structures: a textbook for universities]. 2nd edition, enlarged and revised. — Moscow: Izdatel'stvo ASV, 2022. 388 p. (rus)
2. Trekin N.N., Kodysh E.N. Osoboe predel'noe sostojanie zhelezobetonnyh konstrukcij i ego normirovanie [Special limit condition of reinforced concrete structures and its normalization] // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2020. No. 5. Pp. 4–9. (rus)
3. Trekin N.N., Kodysh E.N., Shmakov S.D., Terekhov I.A., Kudyakov K.L. Determination of the criteria of deformation in a special limiting state // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2021. Vol 1. Pp. 108-116. URL: <https://ijccse.iasv.ru/index.php/ijccse/issue/view/51/62>
4. Falikman V.R., Stepanova V.F. Normativnye sroki sluzhby betonnyh i zhelezobetonnyh konstrukcij i principy ih proektirovanija po parametram dolgovechnosti [Normative service life of concrete and reinforced concrete structures and principles of their design based on durability parameters] // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2019. No. 6. Pp. 13-22. (rus)
5. Chirkov V.P. Prikladnye metody teorii nadezhnosti v raschetah stroitel'nyh konstrukcij [Applied Methods of the Theory of Reliability in the Calculations of Building Structures]. Moscow: Marshrut, 2006. 620 p. (rus)
6. Efremov A.M., Boyko D.V., Sergeevtsev E.Yu., Trekin N.N., Kodysh E.N., Terekhov I.A., Shmakov S.D. Uchet sovmestnogo vlijaniya defektov na nesushhuju sposobnost' konstrukcij [Taking into account the joint effect of defects on the bearing capacity of structures]. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2022. No. 8. Pp. 11–18. (rus)
7. Trekin N.N., Kodysh E.N., Terekhov I.A., Shmakov S.D., Shchedrin O.S. Metodika opredelenija jekspluatacionnoj bezopasnosti zdaniy i ih konstrukcij [Methodology for Determining the Operational Safety of Buildings and Their Structures] // Academia. Arhitektura i stroitel'stvo. 2022. No. 4. Pp. 152-159. (rus)
8. Terekhov I.A. Kriterii ocenki tehničeskogo sostojaniya zhelezobetonnyh plit pri korrozii armatury [Criteria for assessing the technical condition of reinforced concrete slabs during reinforcement corrosion] // Stroitel'stvo i rekonstrukcija. 2022. No 6. Pp. 128-139. (rus)

9. Karpenko N.I., Karpenko S.N., Yarmakovskiy V.N., Erofeev V.T. O sovremennykh metodakh obespecheniya dolgovechnosti zhelezobetonnykh konstruktsiy [The modern methods of ensuring of reinforced concrete structures durability] *Academia. Arhitektura i stroitel'stvo*. No. 1. 2015. Pp. 93-102. (rus)
10. Tamrazyan A.G. Veroyatnostnyy metod rascheta dolgovechnosti zhelezobetonnykh konstruktsiy, podverzhennykh vozhdeystviyu hloridov [Probabilistic method for calculating the durability of reinforced concrete structures exposed to chlorides] V sbornike trudov konferentsii «Aktual'nye problemy stroitel'noy otrasli i obrazovaniya [In the proceedings of the conference "Actual problems of the construction industry and education – 2021]. Moscow: NRU MGSU. Pp. 100-106. (rus)
11. Frolov N.V., Smolyago G.A. Reinforced concrete beams strength under power and environmental influences. *Magazine of Civil Engineering*. 2021. 103(3). Article No. 10303.
12. Jun Kang Chow, Kuan-fu Liu, Pin Siang Tan, Zhaoyu Su, Jimmy Wu, Zhaofeng Li, Yu-Hsing Wang Automated defect inspection of concrete structures. *Automation in Construction*. 2021. Vol. 132. Article No. 103959.
13. Sina Mansourdehghan, Kiarash M. Dolatshahi, Amir Hossein Asjodi Data-driven damage assessment of reinforced concrete shear walls using visual features of damage. *Journal of Building Engineering*. 2022. Vol. 53. Article No. 104509.
14. Tsvetkov R., Shardakov I., Shestakov A., Gusev G., Epin V. Deformation monitoring of load-bearing reinforced concrete beams. *Procedia Structural Integrity*. 2017. Vol. 5. Pp. 620-626.
15. Ye H., Fu C., Jin N., Jin X. Performance of reinforced concrete beams corroded under sustained service loads: A comparative study of two accelerated corrosion techniques. *Construction and Building Materials*. 2018. No. 162. Pp. 286–297.
16. Metodika ocenki ostatochnogo resursa nesushhih konstruktsiy zdaniy i sooruzheniy [Methodology for assessing the residual resource of the supporting structures of buildings and structures] [Online]. FAU "FTsS", 2018. 50 p. URL: https://www.faucc.ru/upload/methodical_materials/mp34_2018.pdf (rus)
17. STO 70238424.27.010.011–2008 Buildings and structures of energy facilities. Method for assessing the technical condition - М.: NP "INVEL", 2008. 182 p.
18. Manual for the inspection of building structures of buildings - М.: JSC "TsNIIProzhdaniy", 1997. 179 p.
19. Recommendations for assessing the reliability of building structures of buildings and structures by external signs. М.: FSUE TsPP, 2001. 100 p.
20. Fedorov V.S., Kodysh Je.N., Trekin N.N., Terehov I.A. Zhelezobetonnyy karkas odnojetazhnogo proizvodstvennogo zdaniya: uchebnoe posobie Reinforced concrete frame of a one-story industrial building: textbook. М.: FGBU DPO "Educational and methodological center for education in railway transport", 2021. 213 p.

Информация об авторах:

Федоров Виктор Сергеевич

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», г. Москва, Россия,
доктор технических наук, профессор, академик РААСН, заведующий кафедрой Строительных конструкций, зданий и сооружений.

E-mail: fvs_skzs@mail.ru

Трекин Николай Николаевич

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия,
доктор технических наук, почетный член РААСН, профессор кафедры Железобетонные и каменные конструкции.

E-mail: nik-trekin@yandex.ru

Кодыш Эмиль Наумович

АО «ЦНИИПромзданий», г. Москва, Россия,
доктор технических наук, почетный член РААСН, главный научный сотрудник.

E-mail: otks@yandex.ru

Терехов Иван Александрович

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», г. Москва, Россия,
кандидат технических наук, доцент кафедры Строительных конструкций, зданий и сооружений.

E-mail: terekhov-i@mail.ru

Information about authors:

Fedorov Viktor S.

Russian University of Transport, Moscow, Russia,

doctor of technical sciences, professor, academician of the RAACS, head of the department of building constructsures, buildings and structures.

E-mail: fvs_skzs@mail.ru

Trekin Nikolay N.

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

doctor of technical sciences, honorary member of the RAACS, professor of the department of reinforced concrete and stone structures.

E-mail: nik-trekin@yandex.ru

Kodysh Emil N.

JSC TsNIIPromzdaniy, Moscow, Russia,

doctor of technical sciences, honorary member of the RAACS, chief researcher.

E-mail: otks@yandex.ru

Terekhov Ivan A.

Russian University of Transport, Moscow, Russia,

candidate of technical science, associated professor of the department of building constructsures, buildings and structures.

E-mail: terekhov-i@mail.ru

Н.В. ФЕДОРОВА^{1,2}, С.Ю. САВИН^{1,2}, В.И. КОЛЧУНОВ^{1,2},
В.С. МОСКОВЦЕВА², М.А. АМЕЛИНА³

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

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

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

КОНСТРУКТИВНАЯ СИСТЕМА БЫСТРОВОВОЗВОДИМОГО ЗДАНИЯ ИЗ ИНДУСТРИАЛЬНЫХ ПАНЕЛЬНО-РАМНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Аннотация. Приведено новое конструктивное решение сборно-монолитного каркаса для быстровозводимых жилых и гражданских зданий разной этажности из промышленных железобетонных элементов заводского изготовления. Сборные конструкции каркаса включают в себя «L»-образные и перевернутые «П»-образные сборные элементы, устанавливаемые в продольном и поперечном направлениях и образующие стоечно-балочный каркас, многоярусные плиты и обвязочные перфорированные ригели наружного контура, на которые опираются ограждающие не несущие стеновые конструкции в пределах каждого этажа. Расчетная модель сборно-монолитного каркаса здания построена с использованием различной степени дискретизации на разных этапах расчета. Это позволило получить как общую картину деформирования конструктивной системы в предельных и запредельных состояниях, вызванных особыми и аварийными воздействиями, так и детальную картину напряженного состояния в бетоне и арматуре отдельных конструктивных элементов до и после образования трещин. Приведены результаты сопоставительного анализа эффективности применения предложенной конструктивной системы в массовом строительстве по сравнению с применяемыми конструкциями крупнопанельных зданий, показано, что применение предложенных конструкций из панельно-рамных элементов позволяет значительно снизить материалоемкость, стоимость и транспортные расходы железобетонного каркаса здания до 30%, при обеспечении его механической безопасности.

Ключевые слова: конструктивная система, быстрая возводимость, железобетон, промышленное домостроение, панельно-рамные элементы, расчетный анализ, конструктивная безопасность

N.V. FEDOROVA^{1,2}, S.YU. SAVIN^{1,2}, V.I. KOLCHUNOV^{1,2},
V.S. MOSKOVTSOVA², M.A. AMELINA³

¹Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

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

³South-West State University, Kursk, Russia

BUILDING STRUCTURAL SYSTEM MADE OF INDUSTRIAL FRAME- PANEL ELEMENTS

Abstract. The paper presents a new structural solution of the precast-monolithic frame for prefabricated residential and civil buildings of various storeys manufactured from prefabricated industrial reinforced concrete elements. The precast frame structures include L-shaped and inverted U-shaped precast elements, installed in the longitudinal and transverse directions and forming a frame, hollow-core slabs and bracing perforated beams of the outer contour, on which fencing non-bearing wall structures are supported within each storey. The computational model of the precast-monolithic building frame was developed using different degrees of discretization at different stages of the analysis. This allowed to obtain both a general picture of structural system deformation in the limiting and over limit states caused by special and emergency actions, and a detailed picture of the stressed state in concrete and reinforcement of structural elements before and after cracking.

© Федорова Н.В., Савин С.Ю., Колчунов В.И., Москovicева В.С., Амелина М.А., 2023

The paper provides the results of the comparative analysis of the effectiveness of application of the proposed structural system in the mass construction as compared with the applied constructions of large-panel buildings. It has been shown that the application of the proposed structures of panel-frame elements allows considerably reduce the material capacity, cost and transportation expenses of the reinforced concrete frame by up to 30 %, ensuring the mechanical safety of the building.

Keywords: structural system, fast construction, reinforced concrete, industrial housing construction, frame-panel elements, computational analysis, structural safety

Введение

Создание безопасных быстровозводимых конструктивных систем каркасов жилых и общественных зданий нового поколения для массового строительства в настоящее время приобретает особую актуальность в связи с необходимостью увеличения объемов и снижением стоимости строительства, особенно в связи с необходимостью ускоренного восстановления и возведения новых объектов на новых территориях Российской Федерации. Традиционно применяемые в массовом строительстве конструкции зданий из крупных панелей имеют ряд известных недостатков. Среди них, с позиций обозначенных целей, можно отметить ограниченные возможности архитектурных и объемно-планировочных решений, жесткая планировка помещений с ограничениями их размеров, низкие теплотехнические качества внешнего контура здания, значительная масса панелей, стен и плит перекрытий, высокие транспортные затраты [1-3], незащищенность проектируемых каркасов из крупнопанельных конструкций при особых воздействиях [4-6] и ряд других. В связи с этим, в рассматриваемой статье приведены результаты исследований, направленных на разработку железобетонных быстровозводимых сборно-монолитных конструктивных систем из индустриальных конструктивных элементов заводского изготовления для жилых и общественных зданий массового строительства. В основе создания таких конструктивных систем приняты принципы механической безопасности, экономичности, индустриального производства, быстровозводимости и широкие возможности объемно-планировочных решений. Каркас здания выполнен из сборных панельно-рамных «L»-образных и перевернутых «П»-образных элементов и многопустотных плит массового производства. Особое внимание при разработке предлагаемого решения уделено расчету и конструированию новых сборных конструкций элементов каркаса при особых и аварийных воздействиях с целью повышения живучести таких зданий. При этом был учтен опыт экспериментальных исследований конструктивных систем каркасов зданий на особые воздействия [6-13]

Конструктивное решение

Предлагаемый вариант железобетонного сборно-монолитного каркаса здания (рисунок 1) возводится из двух типов сборных конструктивных панельно-рамных элементов «L»-образных и перевернутых «П»-образных (рисунок 2). Каркас включает в себя рамные элементы, сопрягаемые с ними перевернутые «П»-образные элементы, многопустотные плиты, устанавливаемые на полку ригелей этих элементов. Стойки рамных элементов выполнены с проемами на высоту, равную высоте многопустотных плит, а боковые поверхности и торцы плит, опирающиеся на сборную часть ригелей панельно-рамных элементов (рисунок 3 а), имеют полости, образующие после обетонирования шпонки.

В процессе монтажа каркаса в верхней зоне ригелей рам над выпусками поперечной арматуры устанавливается продольная рабочая арматура, а армированное пространство между торцами плит перекрытия и в проемах стоек замоноличивается бетоном, образуя тем самым во взаимно ортогональных направлениях жесткую рамную систему. Соединение сборных «L»-образных и перевернутых «П»-образных конструктивных элементов между собой по высоте выполняется с помощью так называемого штепсельного стыка [14, 15] (рисунок 3 б). Соединение этих элементов по горизонтали выполняется с помощью

закладных деталей путем опирания ригеля «L»-образного элемента на выступающую консоль «П»-образного элемента. Кроме того, монолитная часть ригеля проходит через проем в колонне, обеспечивая тем самым после замоноличивания жесткое соединение стойки рамного элемента с ригелем.

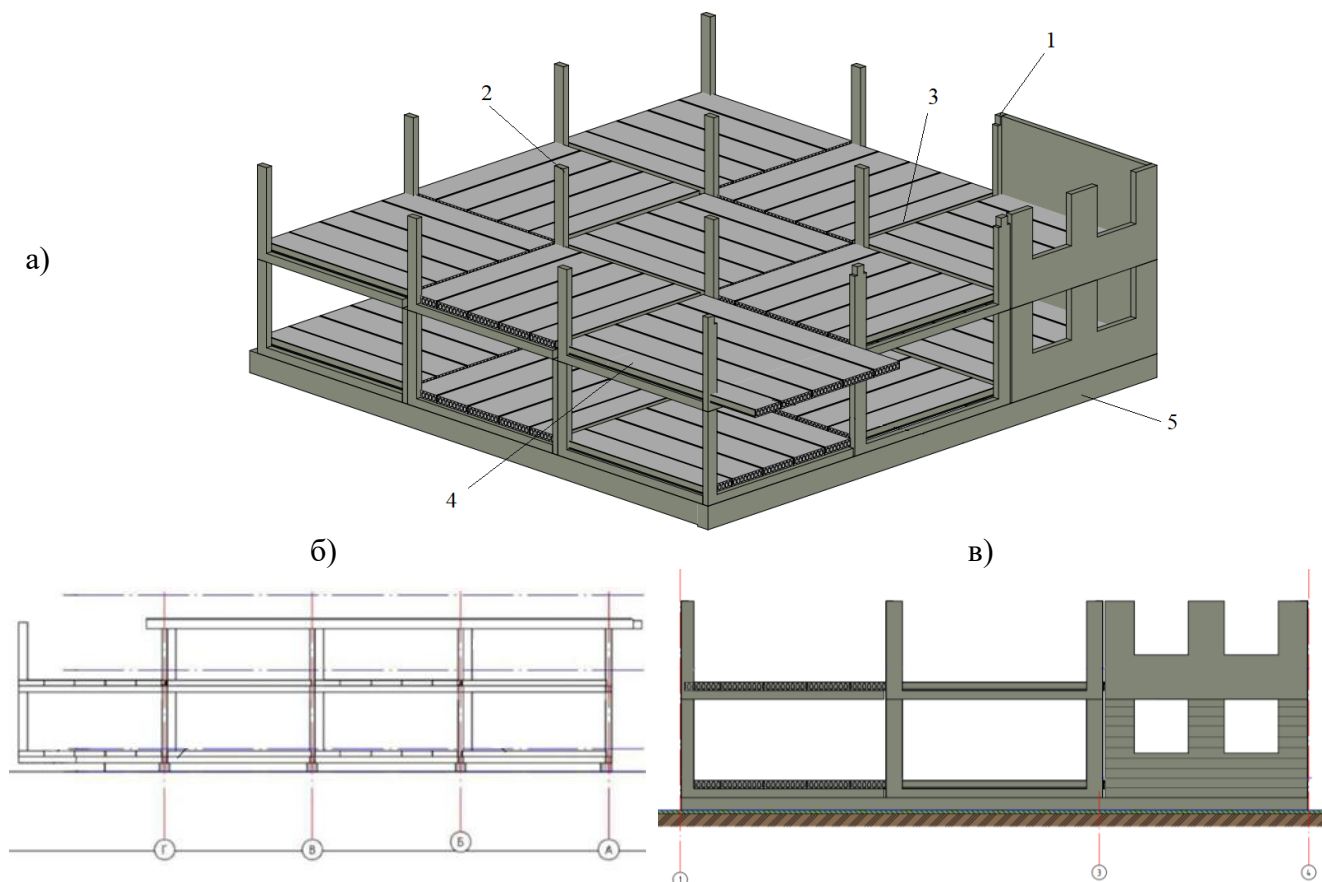
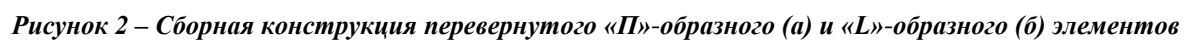


Рисунок 1 – Конструктивная система зданий из «L»-образных и перевернутых «П»-образных элементов: общий вид каркаса (а), продольный разрез (б), фрагмент фасада (в): 1 - перевернутый «П»-образный элемент; 2 - «L»-образный элемент; 3 - ригель; 4 - многопустотная плита; 5 – цокольный этаж

Предлагаемое техническое решение позволяет в сборно-монолитном железобетонном каркасе здания обеспечить восприятие изменяющихся в нем силовых потоков при особом воздействии, вызванном внезапным удалением одной из несущих колонн [16-18], и, как следствие, обеспечить повышение сопротивляемости каркаса прогрессирующему обрушению. С этой же целью стойки рам каркаса здания, смежные по высоте, дополнительно соединяются специальными накладками (рисунок 3 в). Это обеспечивает восприятие растягивающих усилий «цепочкой» колонн по высоте здания в случае повреждения или удаления колонны первого этажа при особом воздействии.

Анализируя представленное конструктивное решение можно отметить следующее. В традиционном сборном или сборно-монолитном стоечно-балочном каркасе из сборных элементов одна ячейка каркаса, например 6х4,8 м, монтируется из четырех колонн, четырех ригелей. Такая же ячейка сборно-монолитного каркаса из «L»-образных и перевернутых «П»-образных элементов имеет в два раза меньше монтажных элементов и, соответственно, меньшее число стыковых соединений. В отличие же от зданий из крупнопанельных элементов [2], имеющих жесткую архитектурно-планировочную структуру, предлагаемое решение позволяет обеспечить различные возможности объемно-планировочных решений как для жилых зданий различной этажности с широким разнообразием форм в плане, так и для общественных зданий различного назначения (рисунок 4).



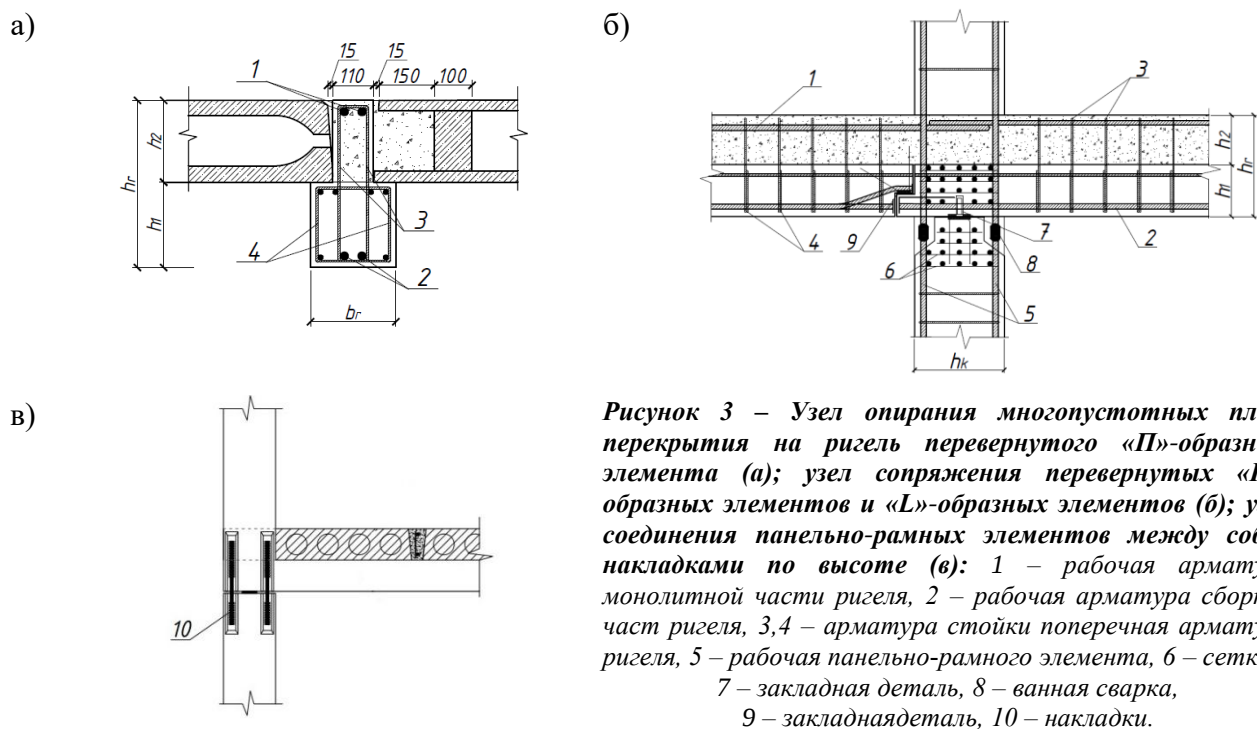


Рисунок 4 – Вариант жилого дома из индустриальных панельно-рамных элементов: общий вид (а); фрагмент плана (б)

Применение в предлагаемом каркасе только двух типов «L»-образных и перевернутых «П»-образных элементов, изготавливаемых на предприятиях стройиндустрии с использованием несложного отечественного оборудования, а также применение дисков перекрытий из многопустотных плит, массово выпускаемых на предприятиях различных регионов страны, а кроме того транспортировка сборных «L»-образных и перевернутых «П»-образных элементов незначительной массы, из которых собирается каркас здания, значительно сокращает грузоподъемность монтажных механизмов и транспортные расходы. Это делает возможным строительство таких зданий в городах и населенных пунктах, удаленных от баз стройиндустрии, в том числе и на территориях новых регионов РФ.

Расчетный анализ

Расчет предлагаемого каркаса жилого здания, собираемого из рамно-панельных «L»-образных и перевернутых «П»-образных элементов выполнен по двум вариантам расчетных схем: первичной – на действие эксплуатационной нагрузки; вторичной – на особое воздействие в виде гипотетического удаления одной из несущих колонн первого этажа. При построении расчетных схем использована методика двухуровневого моделирования на основе подконструкций [6, 17]. Расчетная схема первого уровня, построена по принятой конструктивной схеме для всего каркаса здания (рисунок 5). Расчетные схемы второго и третьего уровней, с целью детализации напряженного состояния в конструктивных элементах и определения параметров предельных состояний второй группы, строились для фрагментов или отдельных конструктивных элементов каркаса здания.

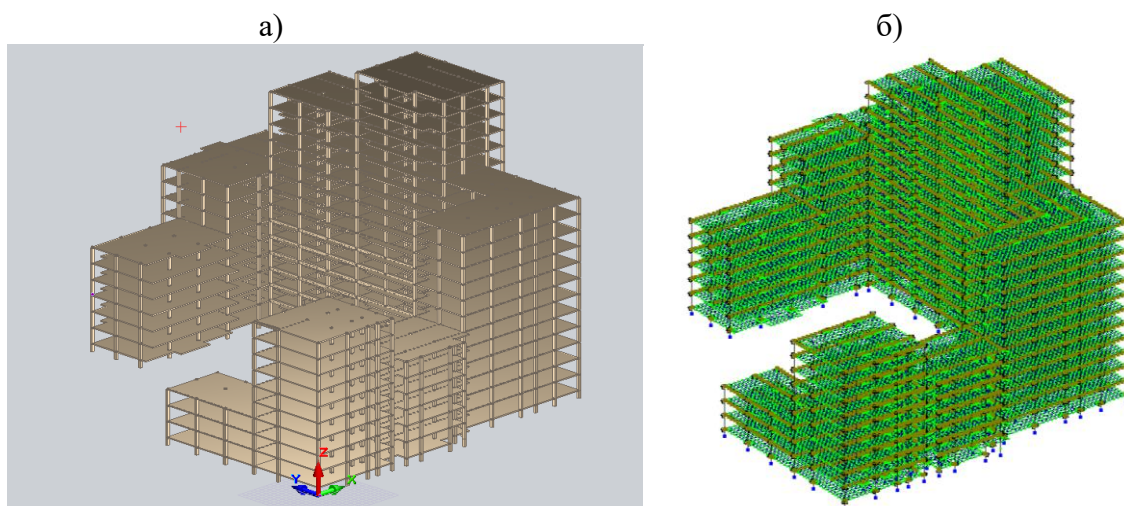


Рисунок 5 – Конструктивная (а) и расчетная (б) схема каркаса здания первого уровня

Для рассматриваемого конструктивного решения несущей системы жилого здания из сборных железобетонных панельно-рамных элементов выполнены расчеты девятиэтажной секции на основное сочетание нагрузок для подбора требуемого армирования и проверки прочности сечений, а также на особое сочетание по СП 385.132580.2018 (Изм. №1, 2, 3), соответствующее расчетной ситуации при проверке устойчивости к прогрессирующему обрушению. При этом рассмотрены три варианта начального локального разрушения: отказ угловой стойки рамного элемента (1), стойки крайнего ряда (2) и стойки среднего ряда (3).

Конструкции сборных элементов рам с учетом принятых размеров поперечных сечений моделировались стержневыми конечными элементами. Для сборных многопустотных плит использовались конечные элементы оболочки с учетом конструктивной ортотропии [19]. Опираение плит на ригели панелей-рам и работа межплитного шва моделировались объединением линейных перемещений (рисунок 6).

Расчеты производились в два этапа. На первом этапе выполнялся расчет в линейной постановке для принятых конструктивных и объемно-планировочных решений с учетом

следующих параметров материалов конструирования: бетон В60 ($R_{bn} = 43$ МПа, $\varepsilon_{b2} = 0.0035$, $R_{bt1} = 2,75$ МПа, $\varepsilon_{bt2} = 0.00015$, $E_b = 39500$ МПа), продольная арматура А500 ($R_{sn} = 500$ МПа, $\varepsilon_{s2} = 0.033$, $E_s = 200000$ МПа), поперечная арматура А240 ($R_{sw} = 170$ МПа). На основании результатов расчета было подобрано симметричное армирование стоек рам четырьмя стержнями $d = 28$ мм. Несимметричное армирование ригелей включало 4 стержня $d = 25$ мм в два ряда у верхней грани ригелей и 2 стержня $d = 25$ мм у нижней грани. На втором – выполнялась проверка устойчивости к прогрессирующему обрушению (особое предельное состояние) в физически, конструктивно и геометрически нелинейной постановке. Рассматривался сценарий внезапного отказа несущего элемента для каждой из рассматриваемых аварийных расчетных ситуаций. При этом в соответствии с экспериментально полученными значениями в исследованиях Хосе Адама и др. Для оценки напряженно-деформированного состояния элементов был использован квазистатический метод с учетом различных значений коэффициента динамических догрузений при упругопластическом деформировании железобетонных элементов с трещинами в пределах $\theta=1,25-1,6$. [7, 20].

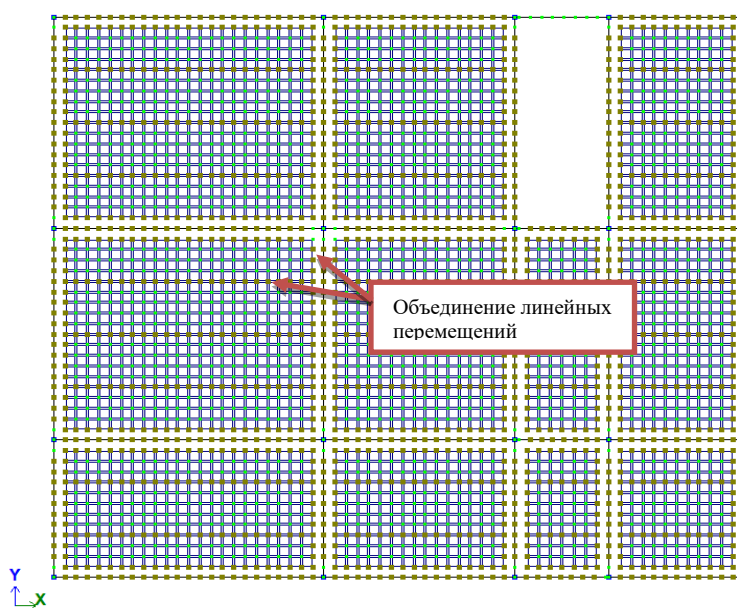


Рисунок 6 – Фрагмент конечно-элементной модели

В связи с тем, что гибкость стоек панелей-рам составляла $\lambda_i \approx 10$, особое внимание уделялось оценке устойчивости их деформированного состояния в результате произошедшей структурной перестройки для каждого из вариантов аварийной расчетной ситуации. В качестве критерия потери устойчивости было принято условие достижения нулевой отпорности $\frac{dP}{df} = 0$, где dP – приращение продольной силы, df – приращение смещения сечения элемента.

Деформированное состояние фрагмента несущей системы здания в результате внезапной структурной перестройки по трем вариантам аварийной расчетной ситуации показано на рисунке 7. По результатам расчета критерий предельных деформаций согласно СП 385.132580.2018 (Изм. №1, 2, 3) не был превышен ни для одной из рассмотренных аварийных расчетных ситуаций. При этом наибольшие относительные деформации в элементах несущей системы были получены при отказе стойки среднего ряда, наименьшие – при отказе угловой стойки. Это обусловлено особенностями изменения расчетных пролетов и грузовых площадей при структурной перестройке несущей системы.

На рисунках 8 а, б приведены графики зависимости перемещений верхних сечений стоек первого этажа вдоль осей X и Y от величины действующей в них продольной силы.

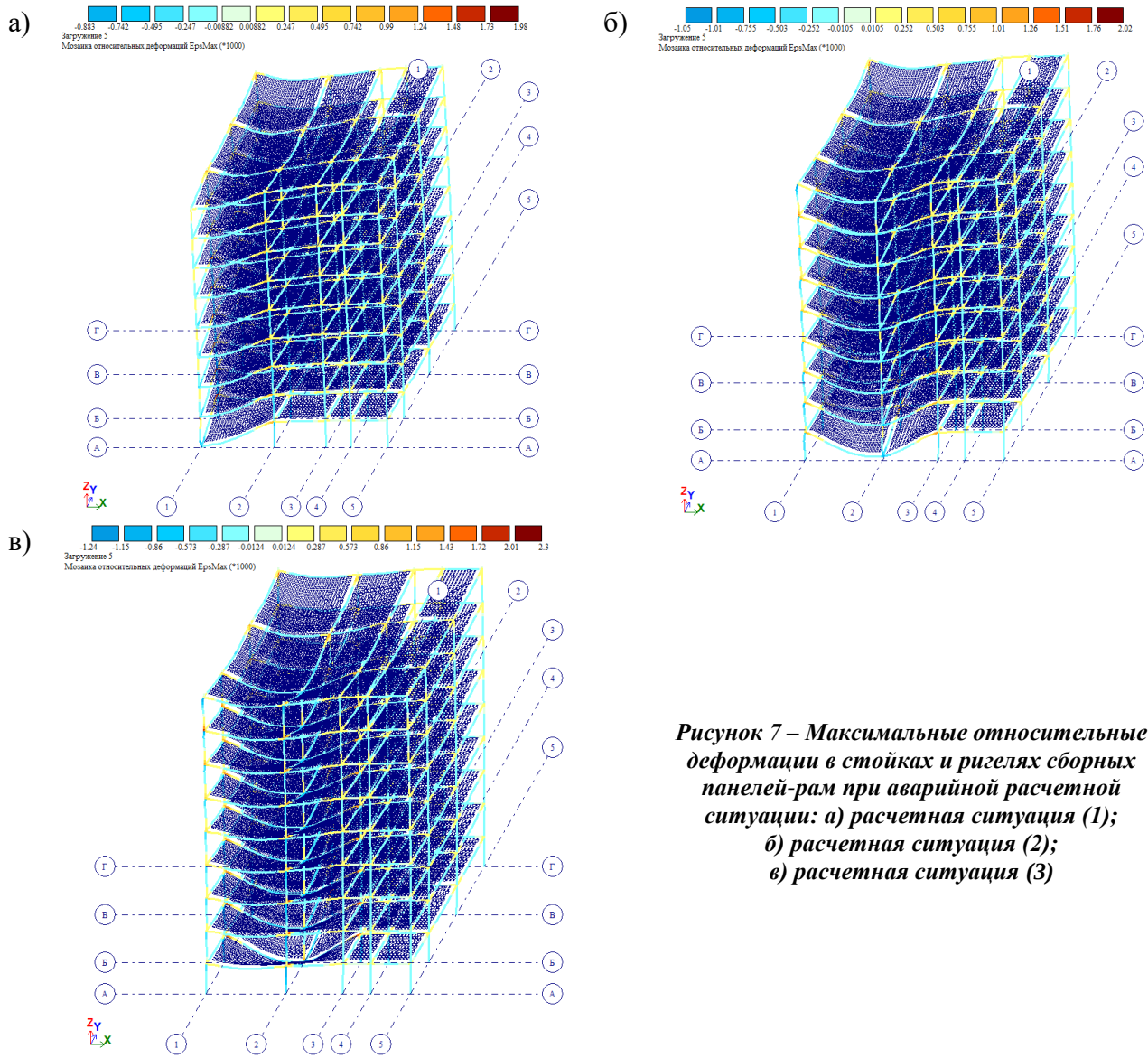


Рисунок 7 – Максимальные относительные деформации в стойках и ригелях сборных панелей-рам при аварийной расчетной ситуации: а) расчетная ситуация (1); б) расчетная ситуация (2); в) расчетная ситуация (3)

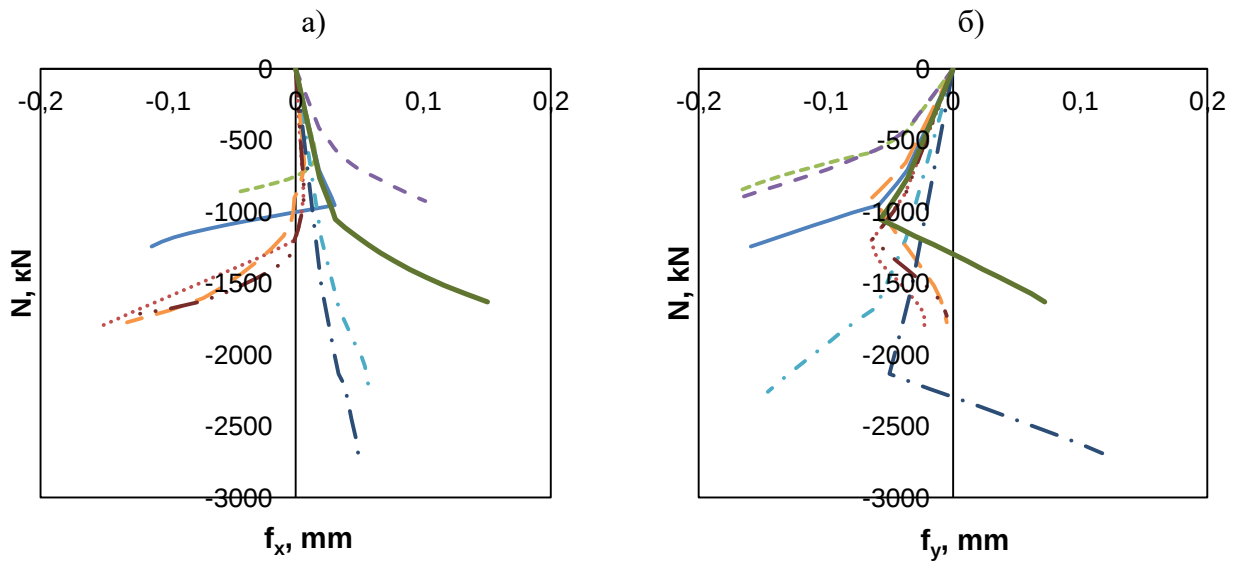


Рисунок 8 – Графики зависимости поперечных смещений верхних сечений стоек первого этажа от величины действующей в них продольной силы: а) вдоль X, б) вдоль Y

— A2(1) B1(1) - - - A1(2) - - - A3(2) - - - B2(1) - - - A2(3) - - - B2(3) - - - B1(3) — B3(3)

Анализ этих графиков позволяет сделать следующие выводы о результатах расчета:

- для принятых аварийных расчетных ситуаций критерий нулевой отпорности не был достигнут ни в одном из рассмотренных несущих элементов, что согласуется с результатами оценки особого предельного состояния по деформационным критериям;

- наименьшей отпорностью при структурной перестройке несущей системы обладали угловые стойки панелей-рам, а также стойки по периметру несущей системы при отказе стойки среднего ряда. Это обусловлено действием мембранных усилий в диске перекрытия в результате структурной перестройки несущей системы и отсутствием дополнительных раскрепляющих элементов, которые могли бы воспринимать эти усилия.

Анализ эффективности применения конструктивной системы

Для оценки эффективности применения предложенной конструктивной системы был определен расход материалов и стоимость каркаса здания с применением быстровозводимых конструкций индустриального изготовления для двух вариантов 17-ти этажного здания: здание из крупнопанельных конструкций (вариант 1) и здание из индустриальных панельно-рамных элементов. При сопоставлении фундамент зданий в обоих вариантах принят в виде монолитной железобетонной плиты высотой 600 и 500 мм, соответственно. В расчет были включены расход железобетона, легкого железобетона для конструкций наружного контура и легкого бетона для межкомнатных и межквартирных перегородок, применяемых для второго варианта. Анализ полученных результатов показал, что расход конструкционного железобетона в предлагаемом варианте каркаса в среднем снижен на 0,070 на м³/м² или на 29 %, масса каркаса здания и соответственно, транспортные расходы снижаются до 30%. Общая стоимость каркаса здания из панельно-рамных элементов (вариант 2) сокращается до 23 %. При этом значительно улучшаются звукоизоляционные показатели в квартирах и теплоизоляция наружного контура здания.

Выводы

1. Предложено новое конструктивное решение сборно-монолитного каркаса для быстровозводимых жилых и гражданских зданий разной этажности из железобетонных индустриальных элементов заводского изготовления. Сборные конструкции каркаса включают в себя «L»-образные и перевернутые «П»-образные несущие элементы в виде рам, устанавливаемые в продольном и поперечном направлениях, многопустотные плиты и обвязочные ригели наружного контура, на которые оперты ограждающие не несущие стеновые конструкции внешнего контура здания в пределах каждого этажа. После монтажа названных конструктивных элементов и замоноличивания верхней зоны ригелей рам совместно со стойками образуется жесткий сборно-монолитный каркас здания.

2. Проведенный расчетный анализ конструктивной системы на основное и особое сочетание нагрузок подтвердил, что предложенное техническое решение сборно-монолитного каркаса здания обеспечивает требуемую нормативными документами механическую безопасность и защиту от прогрессирующего обрушения при особых расчетных ситуациях.

3. Конструктивная система сборно-монолитного каркаса здания позволяет обеспечить быструю возводимость, высокое качество индустриально изготавливаемых элементов, различные возможности объемно-планировочных решений как для жилых зданий разной этажности с широким разнообразием форм в плане, так и для общественных зданий различного назначения, снижение расхода материалов, транспортных затрат и общей стоимости строительства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ключева Н.В., Колчунов В.И., Рыпаков Д.А., Бухтиярова А.С. Жилые и общественные здания из железобетонных панельно-рамных элементов индустриального производства // Жилищное строительство. 2015. № 5. С. 69-75.
2. Николаев С.В. Инновационная замена КПД на панельно-монолитное домостроение (ПМД) // Жилищное строительство. 2019. № 3. С. 3-10.
3. Николаев С.В. Новые подходы к развитию индустриального домостроения // Строительство: новые технологии - новое оборудование. 2019. № 12. С. 73-79.
4. Савин С.Ю. Устойчивость внецентренно сжатых железобетонных элементов при особых воздействиях с учетом деформаций сдвига // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 1. С. 49-58.
5. Травуш В.И., Шапиро Г.И., Колчунов В.И., Леонтьев Е.В., Федорова Н.В. Проектирование защиты крупнопанельных зданий от прогрессирующего обрушения // Жилищное строительство. 2019. № 3. С. 40-46.
6. Савин С.Ю., Федорова Н.В., Емельянов С.Г. Анализ живучести сборно-монолитных каркасов многоэтажных зданий из железобетонных панельно-рамных элементов при аварийных воздействиях, вызванных потерей устойчивости одной из колонн // Жилищное строительство. 2018. № 12. С. 3-7.
7. Колчунов В.И., Федорова Н.В., Савин С.Ю. Динамические эффекты в статически неопределимых физически и конструктивно нелинейных системах // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 9. С. 42-51.
8. Демьянов А.И., Алькади С.А. Статико-динамическое деформирование железобетонных элементов пространственной рамы при их сложном сопротивлении // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2018. № 11 (719). С. 20-33.
9. Parisi F., Scalvenzi M. Progressive collapse assessment of gravity-load designed European RC buildings under multi-column loss scenarios // Engineering Structures. 2020. Vol. 209. Pp.110001.
10. Zhang W.X., Wu H., Zhang J.Y., Hwang H., Jong, Yi W.J. Progressive collapse test of assembled monolithic concrete frame spatial substructures with different anchorage methods in the beam-column joint // Advances in Structural Engineering. 2020. Vol. 23. No. 9. Pp.1785-1799.
11. Zhou. Y., Hu X., Pei Y., Hwang H.J., Chen T., Yi W., Deng L. Dynamic load test on progressive collapse resistance of fully assembled precast concrete frame structures // Engineering Structures. 2020. Vol. 214. Pp. 110675.
12. Xuan W., Wang L., Liu C., Xing G., Zhang L., Chen H. Experimental and theoretical investigations on progressive collapse resistance of the concrete-filled square steel tubular column and steel beam frame under the middle column failure scenario // Shock and Vibration. 2019. Vol. 2019. Pp. 1–12. doi:10.1155/2019/2354931
13. Lin K., Lu X., Li Y., Guan H. Experimental study of a novel multi-hazard resistant prefabricated concrete frame structure // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2019. Vol. 119. Pp. 390–407.
14. Соколов Б.С. Теоретические основы методики расчета штепсельных стыков железобетонных конструкций зданий и сооружений // Жилищное строительство. 2016. № 3. С. 60-63.
15. Колчунов В.И., Мартыненко Д.В. Деформирование и трещинообразование конструкции платформенного стыка в сборно-монолитном каркасе здания // Строительство и реконструкция. 2020. № 4 (90). С. 38-47.
16. Savin S, Kolchunov V, Fedorova N, Tuyen Vu N. Experimental and Numerical Investigations of RC Frame Stability Failure under a Corner Column Removal Scenario // Buildings. 2023. Vol. 13(4). Pp. 908. <https://doi.org/10.3390/buildings13040908>
17. Savin S.Y., Kolchunov V.I., Emelianov S.G. Modelling of resistance to destruction of multi-storey frame-connected buildings at sudden loss of bearing elements stability // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Novosibirsk. 2018. Pp. 012089.
18. Feng. F.F., Hwang H.J., Yi W.J. Static and dynamic loading tests for precast concrete moment frames under progressive collapse // Engineering Structures. 2020. Vol. 213. Pp.110612.
19. Кончковский З. Плиты. Статические расчеты. М.: Стройиздат, 1984. 480 с.
20. Adam J. M., Buitrago M., Bertolesi E., Sagaseta J., Moragues J.J. Dynamic performance of a real-scale reinforced concrete building test under a corner-column failure scenario // Engineering Structures. 2020. Vol. 210. Pp. 110414. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110414>

REFERENCES

1. Klyueva N.V., Kolchunov V.I., Rypakov D.A., Buhtiyarova A.S. Zhilye i obshchestvennyye zdaniya iz zhelezobetonnykh panel'no-ramnykh elementov industrial'nogo proizvodstva [Residential and public buildings from reinforced concrete panel-frame elements of industrial production]. Housing Construction. 2015. No. 5. Pp. 69-75. (rus).
2. Nikolaev S.V. Innovacionnaya zamena KPD na panel'no-monolitnoe domostroenie (PMD) [Innovative replacement of large-panel housing construction by panel-monolithichousing construction (PMHC)]. Housing Construction. 2019. No. 3. Pp. 3-10. (rus).

3. Nikolaev S.V. Novye podhody k razvitiyu industrial'nogo domostroeniya [New approaches to the development of industrial housing construction]. Construction: new technologies - new equipment. 2019. No 12. Pp. 73-79. (rus).
4. Savin S.YU. Ustojchivost' vnecentrenno szhatyh zhelezobetonnykh elementov pri osobykh vozdeystviyakh s uchetom deformatsij sdviga [Stability of eccentrically compressed reinforced concrete elements under special impacts with account taken of shear deformations]. Vestnik MGSU. 2021. Vol. 16. No. 1. Pp. 49-58. (rus).
5. Travush V.I., SHapiro G.I., Kolchunov V.I., Leont'ev E.V., Fedorova N.V. Proektirovanie zashchity krupnopanel'nykh zdaniy ot progressiruyushchego obrusheniya [Design of protection of large-panel buildings against progressive collapse]. Housing Construction. 2019. No. 3. Pp. 40-46. (rus).
6. Savin S.YU., Fedorova N.V., Emel'yanov S.G. Analiz zhivuchesti sborno-monolitnykh karkasov mnogoetazhnykh zdaniy iz zhelezobetonnykh panel'no-ramnykh elementov pri avariynnykh vozdeystviyakh, vyzvannykh poterej ustojchivosti odnoj iz kolonn [Survivability analysis of reinforced concrete frameworks of multi-storey buildings made of frame-panel elements using combination of prefabricated and monolithic concrete in case of accidental impacts caused by loss of stability of one of the columns]. Housing Construction. 2018. No. 12. Pp. 3-7. (rus).
7. Kolchunov V.I., Fedorova N.V., Savin S.YU. Dinamicheskie efekty v staticheski neopredelimyykh fizicheskikh i konstruktivno nelineynykh sistemakh [Dynamic effects in statically indeterminate physically and structurally nonlinear structural systems]. Industrial and Civil engineering. 2022. No. 9. Pp. 42-51. (rus).
8. Dem'yanov A.I., Al'kadi S.A. Statiko-dinamicheskoe deformirovanie zhelezobetonnykh elementov prostranstvennoy ramy pri ih slozhnom soprotivlenii [Static-dynamic deformation of reinforced concrete elements of the spatial frame at their complex resistance]. News of higher educational institutions. Construction 2018. No. 11 (719). Pp. 20-33. (rus).
9. Parisi F., Scalvenzi M. Progressive collapse assessment of gravity-load designed European RC buildings under multi-column loss scenarios // Engineering Structures. 2020. Vol. 209. Pp.110001.
10. Zhang W.X., Wu H., Zhang J.Y., Hwang H., Jong, Yi W.J. Progressive collapse test of assembled monolithic concrete frame spatial substructures with different anchorage methods in the beam-column joint. Advances in Structural Engineering. 2020. Vol. 23. No. 9. Pp. 1785-1799.
11. Zhou. Y., Hu X., Pei Y., Hwang H.J., Chen T., Yi W., Deng L. Dynamic load test on progressive collapse resistance of fully assembled precast concrete frame structures. Engineering Structures. 2020. Vol. 214. Pp. 110675.
12. Xuan W., Wang L., Liu C., Xing G., Zhang L., Chen H. Experimental and theoretical investigations on progressive collapse resistance of the concrete-filled square steel tubular column and steel beam frame under the middle column failure scenario. Shock and Vibration. 2019. Vol. 2019. Pp. 1–12. doi:10.1155/2019/2354931
13. Lin K., Lu X., Li Y., Guan H. Experimental study of a novel multi-hazard resistant prefabricated concrete frame structure. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2019. Vol. 119. Pp. 390–407.
14. Sokolov B.S. Teoreticheskie osnovy metodiki rascheta shtepsel'nykh stykov zhelezobetonnykh konstruktsiy zdaniy i sooruzheniy [Theoretical basis of calculation methods of plug joints of reinforced concrete structures of buildings and constructions]. Housing Construction. 2016. No. 3. Pp. 60-63. (rus).
15. Kolchunov V.I., Martynenko D.V. Deformirovanie i treshchinoobrazovanie konstruktsii platformennogo styka v sborno-monolitnom karkase zdaniya [Deformation and cracking of the platform joint of the prefabricated-monolithic RC building frame] // Building and Reconstruction. 2020. No. 4 (90). Pp. 38-47. (rus).
16. Savin S, Kolchunov V, Fedorova N, Tuyen Vu N. Experimental and Numerical Investigations of RC Frame Stability Failure under a Corner Column Removal Scenario. Buildings. 2023. Vol. 13(4). Pp. 908. <https://doi.org/10.3390/buildings13040908>
17. Savin S.Y., Kolchunov V.I., Emelianov S.G. Modelling of resistance to destruction of multi-storey frame-connected buildings at sudden loss of bearing elements stability. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Novosibirsk, 2018. Pp. 012089.
18. Feng. F.F., Hwang H.J., Yi W.J. Static and dynamic loading tests for precast concrete moment frames under progressive collapse. Engineering Structures. 2020. Vol. 213. Pp.110612.
19. Konchkovskij Z. Plity. Staticheskie raschety. [Plates. Static calculations] Moscow: Strojizdat, 1984. 480 p. (rus).
20. Adam J.M., Buitrago M., Bertolesi E., Sagaseta J., Moragues J.J. Dynamic performance of a real-scale reinforced concrete building test under a corner-column failure scenario. Engineering Structures. 2020. Vol. 210. Pp. 110414. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110414>

Информация об авторах:

Федорова Наталья Витальевна

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия, Советник РААСН, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой архитектурно-строительного проектирования, директор филиала НИУ МГСУ в г. Мытищи.

ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук», г. Москва, Россия, ведущий научный сотрудник.

E-mail: fenavit@mail.ru

Савин Сергей Юрьевич

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций.

ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук», г. Москва, Россия, старший научный сотрудник.

E-mail: savinsyu@mgsu.ru

Колчунов Виталий Иванович

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

ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук», г. Москва, Россия, главный научный сотрудник.

E-mail: asiorel@mail.ru

Московцева Виолетта Сергеевна

ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук», г. Москва, Россия, инженер.

E-mail: lyavetka1@mail.ru

Амелина Маргарита Андреевна

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (ЮЗГУ), г. Курск, Россия, студент кафедры уникальных зданий и сооружений ЮЗГУ.

E-mail: margo.dremova@mail.ru

Information about authors:

Fedorova Natalia V.

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia, Advisor to RAACS, doctor of technical sciences, professor, Head of the Department of Architectural and Construction Design, Director of the branch of Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU) in Mytishchi.

Scientific Research Institute of Construction Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow, Russia, leading researcher.

E-mail: fenavit@mail.ru

Savin Sergey Yu.

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia, candidate of technical science, associate professor of the department of Reinforced Concrete and Masonry Structures.

Scientific Research Institute of Construction Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow, Russia, senior researcher.

E-mail: savinsyu@mgsu.ru

Kolchunov Vitaly Iv.

Moscow State University of Civil Engineering (NRU MSUCE), Moscow, Russia, professor of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures.

Scientific Research Institute of Construction Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow, Russia, chief researcher.

E-mail: asiorel@mail.ru

Moskovtseva Violetta S.

Scientific Research Institute of Construction Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow, Russia, Moscow, Russia, engineer.

E-mail: lyavetka1@mail.ru

Amelina Margarita A.

South-West State University (SWSU), Kursk, Russia, student of the Department of Unique Buildings and Structures of South-Western State University.

E-mail: margo.dremova@mail.ru

Н.В. БАКАЕВА¹, Н.А. РОМАНОВ¹

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

СОЦИАЛЬНО-ДИАГНОСТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОБЛЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ИСТОРИКО-КУЛЬТУРНЫХ ЛАНДШАФТОВ (НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА СУЗДАЛЬ)

Аннотация. Сегодня в сфере градостроительства все большую важность приобретает проблема сохранения рекреационного потенциала природных территорий, в частности, территории историко-культурных ландшафтов, и создания на этих территориях, с минимальным вмешательством, рекреационных пространств в симбиозе с окружающей природной средой. В теории и практике градостроительства отсутствует научно обоснованный подход к восстановлению и экологической реконструкции территории историко-культурных ландшафтов с позиций их устойчивого развития, в результате чего территория историко-культурных ландшафтов в Суздале долгое время находится в экологически неблагоприятном состоянии с признаками деградации компонентов ландшафта. Целью намечаемой экологической реконструкции городских ландшафтов в городе Суздаль является обеспечение динамического баланса между природной и урбанизированной средой. Одним из направлений достижения такого баланса, а также сохранения окружающей среды и повышение благосостояния местного населения может служить развитие экологического туризма как инструмента решения проблемы перегруженности центральной части исторического поселения из-за сезонного наплыва туристов. Для уменьшения антропогенной нагрузки на историческую среду города, улучшения благосостояния населения, знакомства с местной культурой и окружающей природной средой, важно развести туристические потоки по разным направлениям в озелененных пространствах вдоль реки по организованным экологическим тропам. В ходе социально-диагностического исследования территории историко-культурных ландшафтов установили динамику трансформации территории ландшафтов и выполнили оценку экологического состояния исследуемой территории, выявив, при этом, возможность их восстановления. Проведённый социологический опрос определил отношение к данной проблеме жителей и туристов города Суздаль, как заинтересованной социальной группы населения.

Ключевые слова: историко-культурные ландшафты, градостроительная деятельность, экологическая реконструкция, экологический туризм, социально-диагностическое исследование, социологический опрос.

N.V. BAKAEVA¹, N.A. ROMANOV¹

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

SOCIO-DIAGNOSTIC RESEARCH OF THE PROBLEM OF THE FORMATION OF HISTORICAL AND CULTURAL LANDSCAPES (ON THE EXAMPLE OF THE CITY OF SUZDAL)

Abstract. Today, in the field of urban planning, the problem of preserving the recreational potential of natural territories, in particular the territories of historical and cultural landscapes, and the creation of urban public spaces in symbiosis with the natural environment in these territories is becoming increasingly important. In the theory and practice of urban planning, there is no scientifically based approach to the restoration and ecological reconstruction of the territory of historical and cultural landscapes from the standpoint of their sustainable development, as a result of which the territory of protected meadows in Suzdal has been in an environmentally unfavorable state for a long time with signs of degradation of landscape components. The purpose of the planned ecological

reconstruction of urban landscapes in the city of Suzdal is to ensure a dynamic balance between the natural and urbanized environment. One of the ways to achieve such a balance, as well as to preserve the environment and improve the well-being of the local population, can be the development of eco-tourism as a tool to solve the problem of congestion in the central part of the historical settlement due to the seasonal influx of tourists. In order to reduce the anthropogenic load on the historical environment of the city, improve the welfare of the population, get acquainted with the local culture and the natural environment, it is important to separate tourist flows in different directions in green spaces along the river along organized ecological trails.

During the socio-diagnostic research of the territory of historical and cultural landscapes, the dynamics of the transformation of the territory of landscapes were established and an assessment of the ecological state of the researched territory was carried out, revealing, at the same time, the possibility of their restoration. The conducted sociological survey determined the attitude of residents and tourists of the city of Suzdal to this problem as an interested social group of the population.

Keywords: historical and cultural landscapes, urban planning, ecological reconstruction, ecological tourism, socio-diagnostic research, sociological survey.

Введение

Сегодня для урбанизированных территорий остро стоит проблема сохранения рекреационного потенциала историко-культурных ландшафтов по причине нарушения природных компонентов и утраты способности к самоочищению и регенерации. Историко-культурные ландшафты в городах представляют собой природно-культурный территориальный комплекс (ПКТК), обладающий возникшей в результате человеческой деятельности пространственной структурой или ее следами, и отмеченный выдающимися событиями, либо отражающий градостроительные, архитектурные и иные культурные достижения и традиции определенного этноса или социума*.

В контексте градостроительной деятельности для решения выявленной проблемы необходимо говорить об экологической реконструкции, реновации и мелиорации территории историко-культурных ландшафтов, направленных на восстановление и поддержание экологического равновесия.

Экологическая реконструкция поселений успешно проводится в Европе и Северной Америке более 20 лет, однако в России эти проблемы рассматриваются в основном на теоретическом уровне. Тем не менее, появляются и практические достижения, в частности, в области экопозитивных объемно-планировочных решений зданий, их инженерных систем, приемов озеленения. Целью экологической реконструкции поселений является обеспечение динамического баланса между природной и урбанизированной средами путем достижения уровня антропогенных нагрузок, не превышающего адаптационных возможностей биосферы [1].

Вопросами экологического обустройства, реконструкции и оптимизации городской среды, экологической устойчивости городских территорий, подходами к эколого-ландшафтному проектированию и принципами формирования систем озеленения занимались следующие ученые: А.Н. Тетиор, Е.М. Микулина, Н.Г. Благовидова, В.А. Нефедов, В.В. Владимиров, Н.Ф. Реймерс, О.Ю. Тарасова, А.В. Ларина и др. Так, например, Микулина Е.М., Благовидова Н.Г. в своем исследовании рассматривают принципы проектирования экопоселений [2]. Нефедов В.А. обращает внимание на архитектурно-ландшафтную реконструкцию как средство оптимизации городской среды [3].

По мнению академика РААСН Владимирова В.В., для обеспечения экологического баланса необходимо применение системы территориально-планировочных методов экологической компенсации, природоохранных мероприятий, включающей в себя широкий диапазон деятельности на всех уровнях планирования градостроительных систем [4].

* ГОСТ Р 57368-2016. Национальный стандарт РФ. Сохранение произведений ландшафтной архитектуры и садово-паркового искусства. Общие требования [Электронный ресурс]. – Введ. 01.04.2017 // Техэксперт: инф.-справ. система / Консорциум «Кодекс».

Советский и российский ученый А.Н. Тетиор для целей обеспечения экологической безопасности урбанизированных территорий вводит понятие «экологическая реконструкция» – изменение параметров неэкологических объектов с приведением их в экологичное состояние. Экореконструкция, по его мнению, должна основываться на принципах восстановления природы. Чтобы обеспечить сохранение ненарушенного состояния и восстановление полностью разрушенных компонентов природной среды необходимо придать им экологические свойства [5].

Логично, что без экологической инфраструктуры невозможно сохранять и восстанавливать природные территории. Советский эколог Н.Ф. Реймерс подчеркнул, что экологическая инфраструктура – это комплекс природных, природно-антропогенных и искусственных объектов и систем, обеспечивающий условия сохранения среды жизни человека [6]. Основываясь на данном определении, А.Н. Тетиор в своей работе также говорит об экологической инфраструктуре территорий. Учёный считает, что устойчивая экологическая инфраструктура способствует обеспечению экологической безопасности урбанизированных территорий и созданию благоприятных условий жизнедеятельности [7].

Тарасова О.Ю., Ларина А.В. рассматривают вопросы экологического обустройства и реконструкции природных ландшафтов, учитывая современные проблемы территориального развития [8].

В ходе градостроительной деятельности при восстановлении и экологической реконструкции историко-культурных ландшафтов в комплексе с вышеперечисленными природоохранными мероприятиями должно учитываться рациональное эколого-градостроительное зонирование территории [8]. Так, на стадии обоснования планирования территории городского историко-культурного ландшафта традиционно применяется предпроектный анализ, одним из разделов которого является социально-диагностическое исследование. Данное исследование предполагает комплексный анализ территории специалистами из различных сфер: социологов, психологов, экономистов, градостроителей. Это способствует проведению не только анализа территории как социального объекта, но и диагностике его состояния, а также прогнозированию последующих изменений и принятию проектных решений [9]. Социально-диагностическое исследование территории историко-культурных ландшафтов позволит выявить перспективы формирования и развития рекреационной зоны на их территории на основе запросов и предложений жителей города и туристов.

В ходе научных изысканий по обеспечению экологической безопасности научным сообществом глубоко изучен вопрос развития экологического туризма. Экологический туризм предполагает не только посещение туристами ненарушенных природных территорий, но и активное участие жителей города и туристов в сохранении животного и растительного мира. Этой проблеме посвящены исследования Лапочкина В.В., Зверьковой Е.Н., Оборина М.С., Васильевой М.И., Шестаковой Е.С., Косолапова А.Б., Соколовой А.А. и Емельянова Н.Л. [10-17]. Тем не менее, это направление является новым элементом научного обоснования градостроительной деятельности применительно к историко-культурным ландшафтам. Более подробное обоснование развития экологического туризма и проведение расчета рекреационной нагрузки на территории историко-культурного ландшафта в городе Суздаль представлены авторами в статье: «Экологический туризм как инструмент формирования историко-культурных ландшафтов в малых городах (на примере города Суздаль)» [18].

Целью настоящего исследования явилось использование методов социально-диагностического анализа для решения проблемы формирования историко-культурных ландшафтов.

В качестве гипотезы исследования можно предположить, что на основе мнений и предпочтений жителей и туристов города Суздаль, а также методов проведения диагностического анализа объекта исследования, мероприятия по экологической

реконструкции территории историко-культурных ландшафтов и внедрение элементов экологического туризма позволят повысить устойчивость к негативным природным явлениям, антропогенному воздействию и повышения уровня туристической отрасли в целом.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования выступает территория историко-культурных ландшафтов – заповедных лугов – в городе Суздаль. Территория историко-культурных ландшафтов и река Каменка являются одним из основных градообразующих элементов Суздаля, которая, на сегодняшний день, подвержена антропогенному воздействию и климатическим изменениям в виде ливневых дождей, подтоплений паводковыми водами, уменьшения речного стока, деградации почв и растительности, зарастания и обмелению реки Каменка, протекающий на территории поселения. Площадь объекта исследования – 51 га, что составляет 3,4 % от общей площади Суздаля – 1500 га. Территория историко-культурных ландшафтов располагается в низменности, где перепады высотных отметок рельефа составляют от 100,0 до 107,0 м в пойме реки Каменка. Русло реки отличается извилистыми очертанием в плане и изменчивой шириной от 20 до 50 м.

При формировании новых территорий необходимо учитывать установленные градостроительные регламенты и ограничения использования земельных участков. Градостроительные регламенты на нее не накладываются, но распространяются определенные требования и ограничения к режиму использования земель и благоустройству с обеспечением их сохранения и восстановления.

В соответствии с Генеральным планом города Суздаль исследуемая территория относится к иным рекреационным зонам [19]. Она имеет официальный статус достопримечательных мест регионального значения. Согласно Правилам землепользования и застройки города Суздаль Владимирской области, исследуемая территория расположена в зоне историко-культурных ландшафтов (см. рисунок 1) [20].

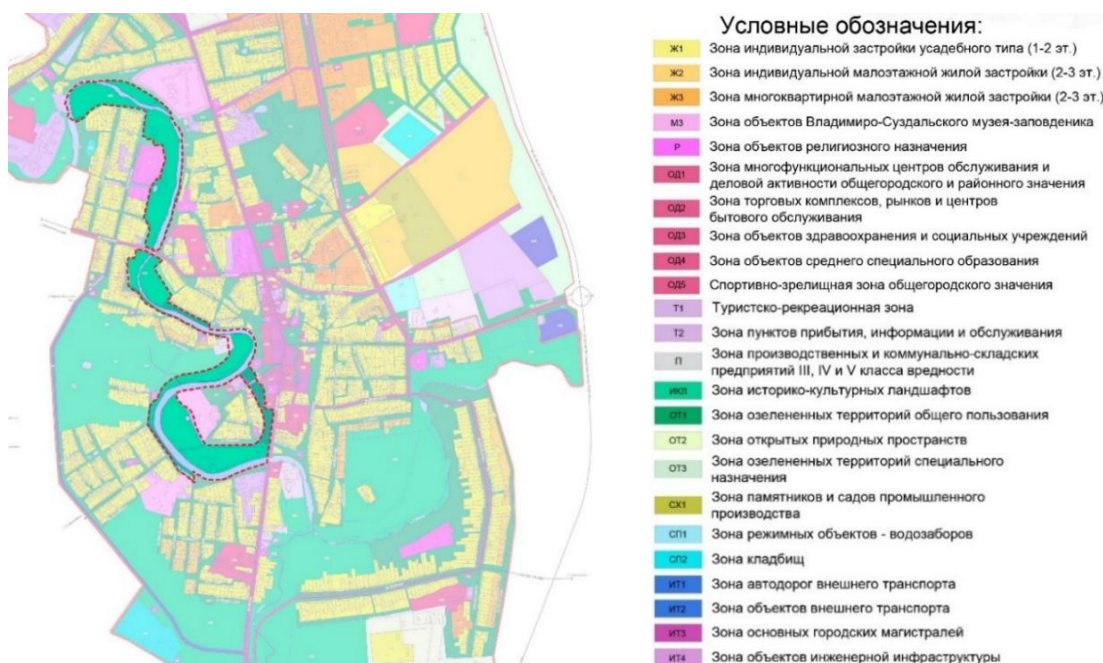


Рисунок 1 - Фрагмент карты градостроительного зонирования территории муниципального образования города Суздаль с выделенной территорией историко-культурных ландшафтов

В ходе социально-диагностического исследования данной территории была выявлена динамика трансформации территории ландшафтов, дана оценка экологического состояния

исследуемой территории, а также выяснено отношение к данной проблеме жителей и туристов города Суздаль, как заинтересованной социальной группы.

Выбор метода исследования определялся необходимостью получения репрезентативного среза потребностей, общественного мнения и предложений по интересующей информации. Оптимальными методами социологического исследования считается: социологический опрос жителей города Суздаль и потенциальных туристов, путешествующих по городам России, и метод квалитметрии, который позволяет обработать полученные данные. Социологический опрос был направлен на выявление мнений, интересов, предложений и предпочтений респондентов по улучшению качества экологической ситуации, а также по восстановлению, формированию и развитию территории заповедных лугов, в т.ч. с учетом мероприятий экологической реконструкции и развития экологического туризма в городе.

Также в рамках социально-диагностического исследования было проведено натурное обследование территории историко-культурных ландшафтов – заповедных лугов в городе Суздаль – с применением методов визуального наблюдения, фотофиксации и сопоставления с историческими фотоматериалами данной территории, которые помогают поставить «диагноз» состоянию объекта исследования и выявить проблемы для принятия проектных решений. Материалы были получены авторами в сентябре-ноябре 2022 года в ходе совершенного выезда в Суздаль, где проводилось натурное обследование современного состояния территории исследования.

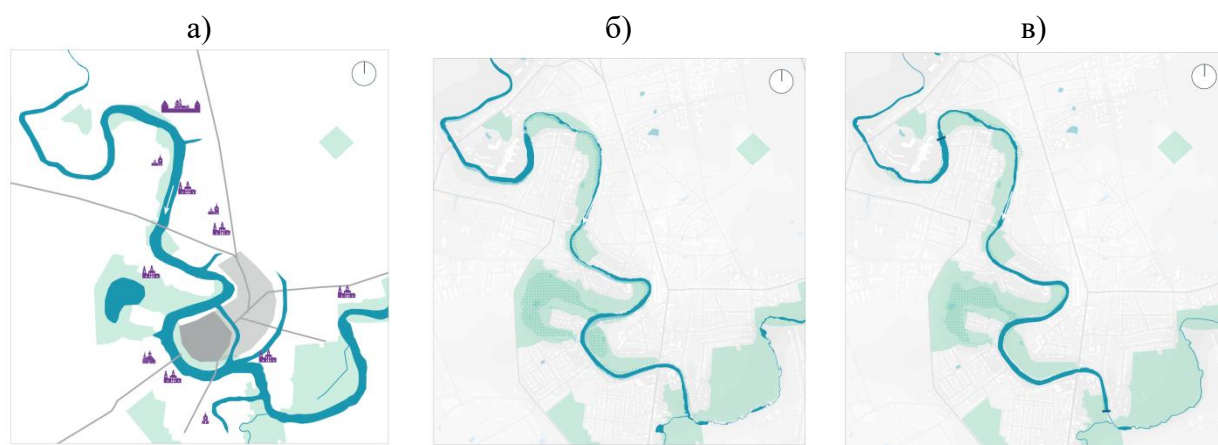
Результаты и обсуждение.

В ходе анализа градостроительной документации и фотофиксации установили, что территория подвержена антропогенному воздействию и климатическим изменениям в виде подтоплений паводковыми водами в весенний период времени, оползневых и эрозионных процессов высоких берегов, деградации почв и растительности, зарастанию и обмелению реки Каменка. На рисунке 2 представлен фрагмент схемы зон с особыми условиями использования территории с иллюстрирующим фотоматериалом деградации природной экосистемы городского ландшафта.



Рисунок 2 - Фрагмент схемы зон с особыми условиями использования территории с иллюстрирующим материалом деградации природной экосистемы городского ландшафта

В рамках научной работы был также проведен ретроспективный анализ исследуемой территории, который помог проследить этапы становления и развития территории за прошедшие периоды времени. Последовательный переход от прошлого времени к настоящему помогает создать пространственно-временную модель и углубиться в развитие планировочной структуры территории. Так, объект исследования проходил несколько этапов развития территории историко-культурных ландшафтов. В процессе жизнедеятельности прибрежная территория претерпевала изменения видов использования и своего внешнего облика, зафиксированные на рисунке 3.



*Рисунок 3 - Карта исследуемой территории и русла реки Каменка в:
а) XVIII в.; б) 1930-1940 гг.; в) настоящее время*

С XVI по XX вв. русло реки было не заросшим и полноводным, а сама территория активно использовалась в качестве сельскохозяйственной деятельности. В то время скотоводство и огородничество стали главным занятием жителей города. Сегодня территория деградирует и находится в заброшенном виде. Если говорить о водной артерии города, то сегодня река и ее притоки сильно обмелели, а также подвержены загрязнению бытовой и ливневой канализацией.

Также в качестве динамики трансформации территории заповедных лугов были получены материалы в виде картографических спутниковых снимков из открытых источников, в которых можно проследить как положительные, так и отрицательные изменения, повлиявшие на современное состояние территории.

Ее внешний облик и использование прибрежной территории вдоль реки Каменка сильно изменялись во времени. С каждым периодом на территории лугов и реки Каменка проходила трансформация по большей мере в отрицательную сторону. Однако это никак не сказывается на том, что историко-культурные ландшафты вдоль реки являются градообразующим элементом и одним из главных символов города в панорамах исторической застройки.

В рамках проведенного социально-диагностического исследования нами были рассмотрены спутниковые картографические аэрофотоснимки исследуемой территории в период с 1985 по 2022 гг. (см. рисунок 4).



Рисунок 4 - Ретроспективный анализ развития территории историко-культурных ландшафтов в период с 1985 по 2022 гг.

На спутниковом снимке 1985 г. видно, что территория лугов в основном предназначена для выпаса скота и для ведения сельскохозяйственной деятельности. В 80-х гг. было построено две плотины, из-за чего река Каменка стала полноводной. Однако к 2000 г. по разным причинам территория стала подвергаться массивному загрязнению, зарастанию берегов и обмелению самой реки. В 2015 г. огороды стали пропадать, а сама территория постепенно заболачивается и зарастает. Также на спутниковом снимке 2015 года можно заметить хозяйственную деятельность человека, предположительно в весенний период, которая вероятно проявляется в выжигании сухой прошлогодней травы – пал травы. В соответствии с Правилами землепользования застройки города Суздаля, для обеспечения сохранения и восстановления, эффективного функционирования и использования территории лугов режим использования земель историко-культурных ландшафтов запрещает весенний пал и разведение костров. Это говорит о том, что необходимо возвращать процедуру сенокоса и посев характерных традиционных луговых трав.

Стоит также обратить внимание, что уровень реки Каменка за последние 10 лет постепенно поднимается, следствием чего в весенний паводковый период происходит подтопление заповедных лугов и прочей городской инфраструктуры.

Интенсивность посещения исследуемой территории менялась со временем в период с 1-ой пол. XX в. по настоящее время. Это связано с изменением видов деятельности на ней. В первой половине XX века видна наибольшая активность на территории лугов, связанная прежде всего с сельскохозяйственной деятельностью жителей. Затем земли стали все больше заболачиваться, в результате чего огороды стали постепенно пропадать, а выпас скота перестал быть интересным населению города. На сегодняшний день территория лугов находится в состоянии деградации. Наиболее привлекательными местами для населения и гостей города являются территории монастырей и музейные комплексы (см. рисунок 5).

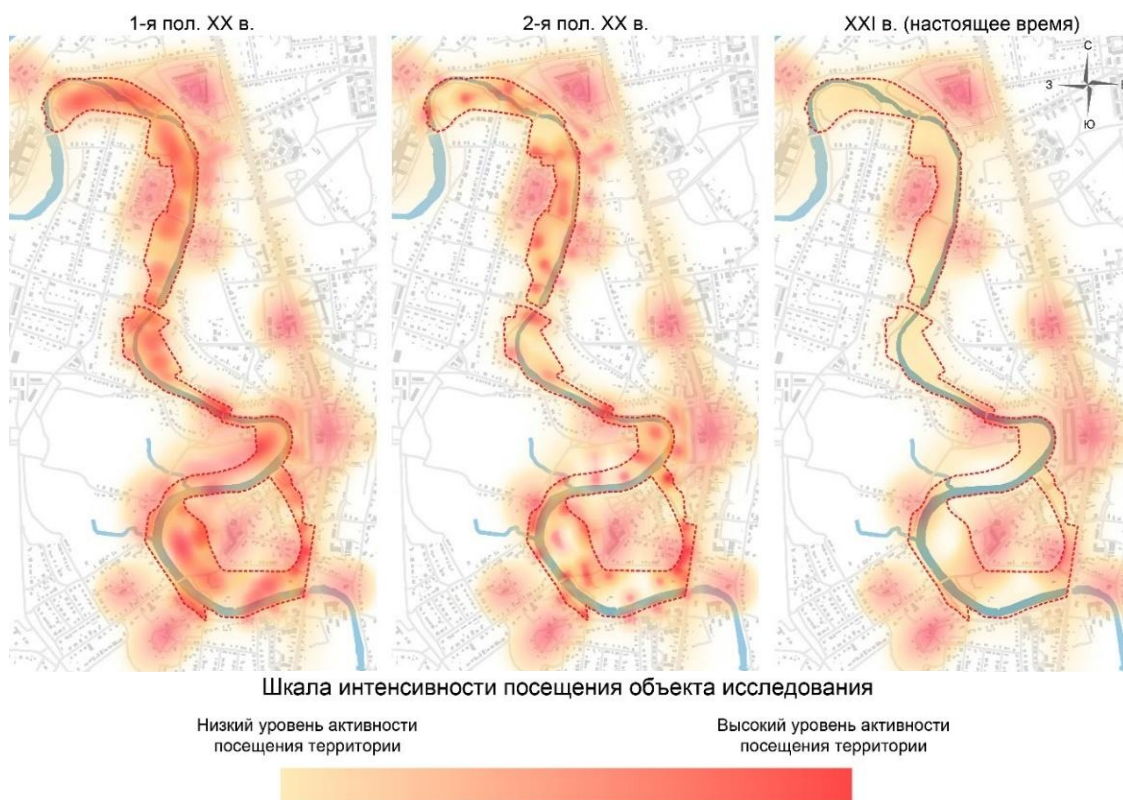


Рисунок 5 – Тепловая карта посещаемости объекта исследования в период с 1-ой половины XX в. по XXI в.

Концентрация объектов притяжения приходится на центральную часть города. Именно здесь сформировалась социальная и туристическая инфраструктура. Тепловая карта создана в геоинформационной системе QGIS на основе открытых данных, в частности с помощью сервиса Open Street Map.

Сегодня территория лугов не привлекает как местных жителей так и туристов. Однако прибрежные луга, сочетание берегов реки и силуэты церквей являются тем самым характерным суздальским пейзажем. Большая часть панорам вдоль реки в черте города охраняется государством. Для того, чтобы Суздаль превратился в комфортный и современный город, необходимо создавать и развивать новые объекты туристической инфраструктуры и территории рекреационного назначения.

В качестве анализа динамики изменения состояния и свойств исследуемой природной территории, было принято решение сравнить фотографии реального натурного обследования (2022 г.) с историческими снимками XX в. (см. рисунок 6).

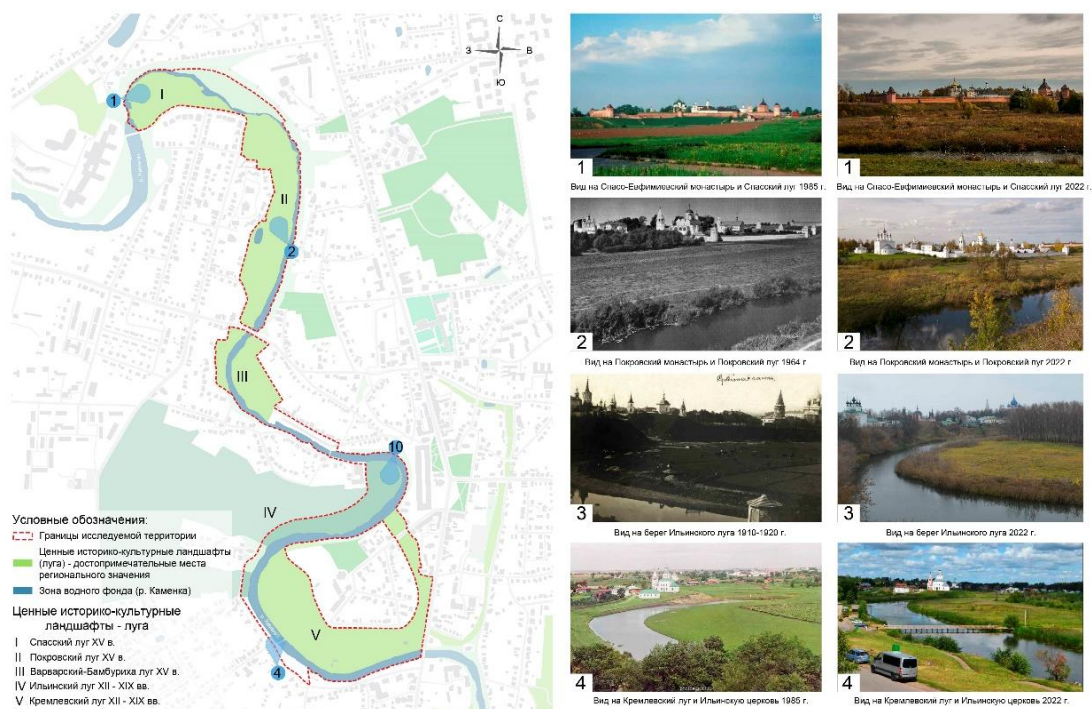


Рисунок 6 - Фотоанализ территории историко-культурных ландшафтов

Культурно-выкошенные ландшафты лугов выделяли реку как градообразующий элемент и планировочную ось города. Спустя 40-50 лет ситуация глобально изменилась в худшую сторону. Сегодня происходит деградация исследуемой территории и ухудшение экологического состояния в виде зарастания и вытаптывания травостоя.

В контексте вышеизложенного было выяснено отношение к данной проблеме жителей и туристов города Суздаль, как заинтересованной социальной группы, изучение социальной потребности в экологической и климатической поддержке Суздаля и прилегающих территорий.

В ходе социологического исследования было проведено онлайн-анкетирование. Анкета размещалась с помощью ресурса Google Forms и распространялась через URL-ссылки между участниками исследования. Целевой группой являются жители и туристы города Суздаль, разных возрастов, начиная с 18 лет, независимо от рода деятельности.

В ходе проведения опроса было получено, что больше половины опрошенных респондентов являются коренными жителями г. Суздаль. Они наиболее глубоко погружены в жизнь города и знакомы с его недостатками и преимуществами.

На рисунке 7 представлены результаты опроса респондентов о выявлении экологических проблем в городе. Жители считают, что в Суздале экологические проблемы в основном представлены в виде ухудшения качества воды, негативного влияния хозяйственной деятельности человека на природные территории, размывания берегов реки Каменка и подтопления территории лугов.

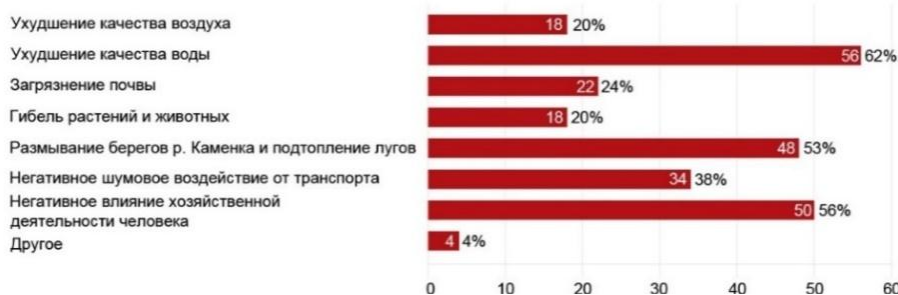


Рисунок 7 - Результаты опроса респондентов о выявлении экологических проблем в городе

В процессе своей жизнедеятельности опрошенные респонденты активно посещают территорию историко-культурных ландшафтов, используя ее в целях транзитного пути, пеших прогулок и знакомства с видовыми раскрытиями города (см. рисунок 8).

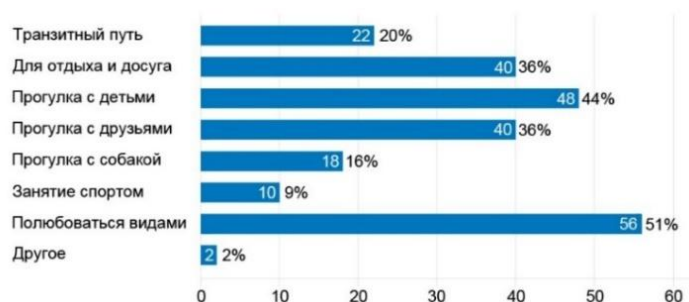


Рисунок 8 - Результаты опроса респондентов о целях посещения территории заповедных лугов

Регулярно жители города замечают, как другие горожане и туристы своей хозяйственной деятельностью оказывают негативное воздействие на природную среду города, в частности замусоривают территорию лугов, сливают сточные воды в реку и нарушают растительный покров автомобилями (см. рисунок 9).



Рисунок 9 - Результаты опроса об антропогенном воздействии на территорию лугов

В основном все опрошенные респонденты выступают за идею создания нового пространства на территории заповедных лугов, выполняющего рекреационную функцию, с целью восстановления и сохранения природной среды. Они считают, что перед проведением экологической реконструкции необходимо обратить внимание на решение таких проблем, как загрязнение реки Каменка, неэффективные очистные сооружения и плотины, а также отсутствие организованных прогулочных дорожек и спусков к воде (см. рисунок 10).

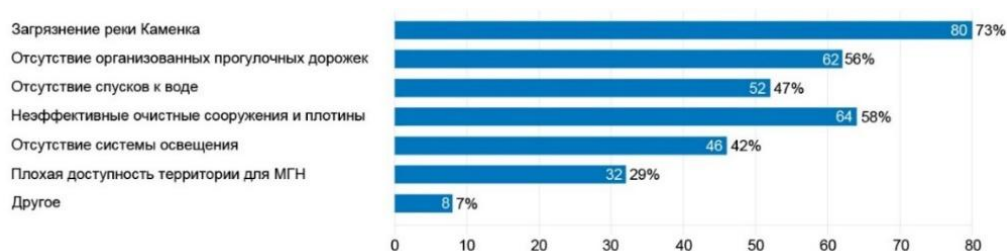


Рисунок 10 - Результаты опроса мнений респондентов о решении проблем на территории заповедных лугов

Социологический опрос туристов Суздаля охватил 151 респондента – жители России, экскурсанты и гости города трудоспособного и выше трудоспособного возраста. Традиционно в Суздаль туристы приезжают с культурно-познавательными целями, в частности, знакомство с историей, культурой, традициями и главными достопримечательностями. Однако, около половины опрошенных предпочитают проводить свой отдых в экологически чистых и красивых местах природы, в результате чего в городе необходимо развивать интерес туристов к природным территориям для знакомства с местной культурой и окружающей средой (см. рисунок 11).

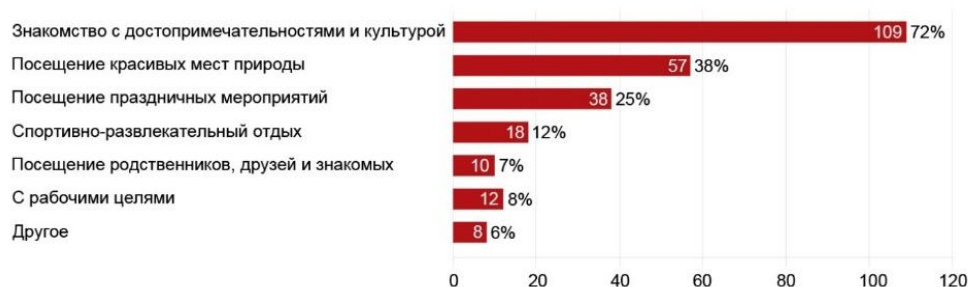


Рисунок 11 - Результаты опроса респондентов о целях приезда в г. Суздаль

Как показали результаты опроса, в основном опрошенные респонденты не задерживаются в городе больше одного дня. Это связано с тем, что в Суздале развито только одно направление туризма – культурно-познавательный туризм. Для того, чтобы привлечь и заинтересовать туристов пробыть в городе на длительный срок необходимо развивать новые виды туризма и развивать подобные природные территории, с которых раскрываются новые видовые картины города.

В настоящее время территория историко-культурных ландшафтов нуждается в развитии экологического туризма как перспективного направления туризма в Суздале. На рисунке 12 представлены результаты опроса о выявлении заинтересованности приоритетов в рамках экологического туризма, где респонденты в основном выбрали возможность увидеть местную культуру, природу и знакомство с новыми видовыми картинами города.

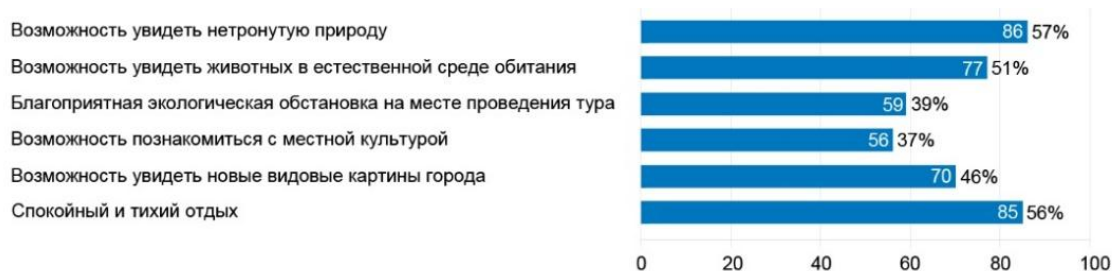


Рисунок 12 - Результаты опроса о выявлении заинтересованности приоритетов в рамках экологического туризма

Абсолютное большинство населения поддержало идею развития территории историко-культурных ландшафтов в Суздале в направлении экологического туризма. Аналогично жителям, большинство туристов в ходе соцопроса предлагают свои идеи по устройству прогулочных организованных дорожек, смотровых площадок и спусков к воде. Раскрытие новых видовых картин и пейзажей, а также близость и контакт с водой позволят наиболее эффективно привлечь и познакомить туристов с территорией заповедных лугов вдоль реки Каменка.

Перед проведением проектных мероприятий, был также проведен расчет потенциального количества посетителей исследуемой территории, в результате которого рекреационная нагрузка составила 59 чел./га, не превышающая допустимую в 100 чел./га. Проектом предлагается реанимировать территорию историко-культурных ландшафтов и включить их в состав рекреационных пространств города Суздаль, а также организовать удобную пешеходную инфраструктуру вдоль реки Каменка по экологическим тропам, сохраняя ценные природно-исторические ландшафты (см. рисунок 13).

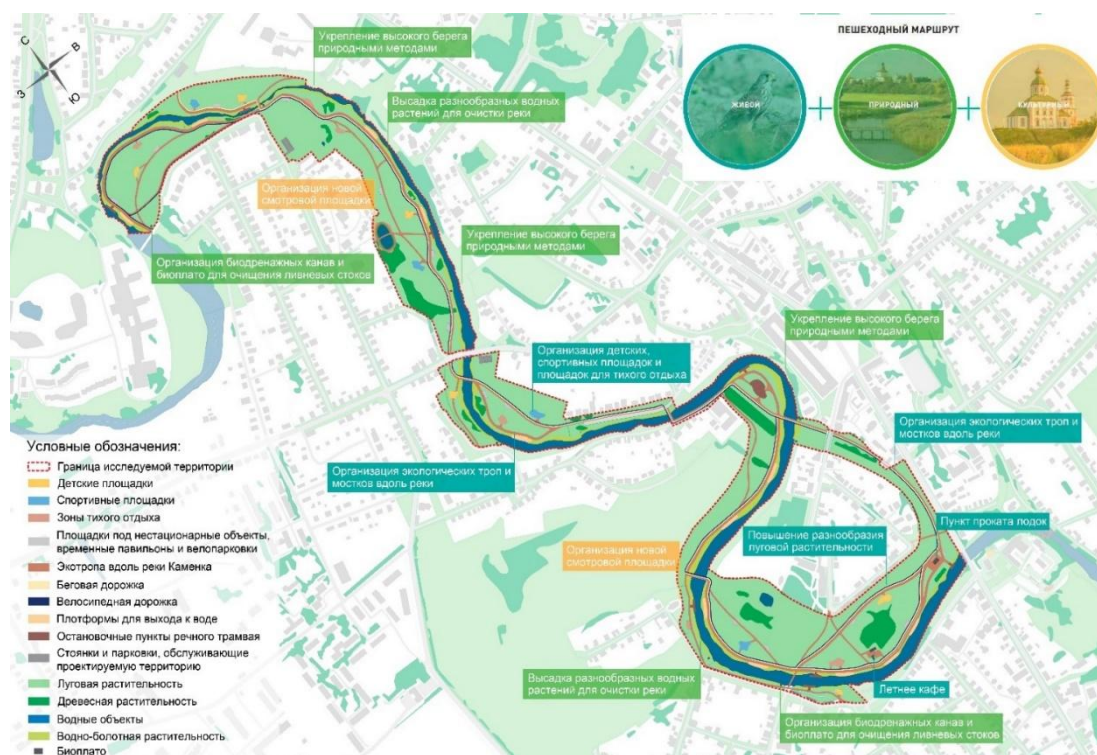


Рисунок 13 – Схема проектного предложения функционально-планировочной организации территории историко-культурных ландшафтов

Комплексный подход к насыщению рекреационных функций исследуемой территории поможет сформировать принципиально новую среду – живую, природную и культурную. Живая среда представляет собой повышение биоразнообразия флоры и фауны, обеспечение доступности реки, а также безопасности и комфорта для всех пользователей и организация экологических троп вдоль реки. В природную среду предлагается отнести укрепление высоких берегов природными методами, высадка разнообразных водных растений для очистки реки и организация биодренажных канав и биоплато для очищения ливневых стоков. Культурная среда предполагает внедрение новых смотровых площадок и навигации для знакомства с силуэтом города Суздаль.

Выводы

Выполненное авторами социально-диагностическое исследование показало, что существующее положение территории историко-культурных ландшафтов не в полной мере отвечает современным требованиям: экологической безопасности, комфортности, эстетической привлекательности в условиях контакта урбанизированной среды с природным ландшафтом. Вопрос экологической безопасности является **актуальным** первостепенным, так как природоохранная территория ландшафтов нуждается в мероприятиях по сохранению и восстановлению нарушенной природной среды.

Специфика организации природно-культурных территорий в г. Суздаль связана, прежде всего, с сохранением природного ландшафта, учитывая исторический характер территории и привлекательность места. Также, как показал соцопрос, одним из направлений достижения баланса между урбанизированной и природной средами в Суздале, является внедрение и развитие экологического туризма, с одной стороны, для предоставления возможности знакомства с окружающей природной средой и видовыми раскрытиями, а с другой - как инструмент решения проблемы негативного воздействия на историческую среду города в период массового наплыва гостей города в «пиковый туристический сезон». Формирование и развитие данной территории с помощью насыщения рекреационной и туристической функциями раскроет градостроительный потенциал города Суздаль.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исаченко А.Г. Ландшафтоведение и физико-географическое районирование: Учеб. - М.: Высш. шк., 1991. 366 с.: ил.
2. Микулина Е.М., Благовидова Н.Г. Приемы проектирования экопоселений // Academia. Архитектура и строительство. 2014. № 3. С. 90-96.
3. Нефедов В.А. Архитектурно-ландшафтная реконструкция как средство оптимизации городской среды // АСД. Архитектура. Строительство. Дизайн. 2005. № 1. С. 60-61.
4. Владимиров В.В. Урбоэкология. М., Изд-во МНЭПУ, 1999, 203 с.
5. Тетиор А.Н. Пути экореконструкции и экореставрации городов // Sciences of Europe. 2018. №. 23-1 (23). С. 69-77.
6. Реймерс Н.Ф. Природопользование. М.: «Мысль», 1990. С. 366
7. Тетиор А.Н. Экологическая инфраструктура - новое направление и новая научная дисциплина в строительстве // Жилищное строительство. 2010. № 4. С. 17-19.
8. Тарасова О.Ю., Ларина А.В. Экологическое обустройство и реконструкция селитебных ландшафтов города Темников // Современные проблемы территориального развития. 2019. № 2. С. 12.
9. Щербакова, И. В. Социологические исследования города: диагностика проблем и гражданская дипломатия // Территория и планирование. 2010. № 5(29). С. 78-82.
10. Лапочкина В.В., Косарева Н.В., Адашова Т.А. Экологический туризм в России: тенденции развития // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 5 (47) Часть 1. С. 100-105.
11. Зверькова Е.Н. Тенденции развития экологического туризма в Российской Федерации // Наука, образование и культура. 2020. №. 6 (50). С. 47-49.
12. Оборин М.С. Современная концепция развития экологического туризма в России // Сервис в России и за рубежом. 2020. Т. 14. № 4. С. 22-32. doi:10.24411/1995-042X-2020-10402.
13. Васильева М.И. К юридическому определению понятия экологического туризма // Lex russica. – 2020. Т. 73. № 4. С. 34–52. doi:10.17803/1729-5920.2020.161.4.034-052.
14. Шестакова Е.С., Рудык А.Н., Бутова Т.Г. Функции экологического туризма // Сервис в России и за рубежом 2016. № 2. С. 239-252. doi:10.12737/19737
15. Косолапов А.Б. Теория и практика экологического туризма. М.: КНОРУС. 2017. 230 с.
16. Соколова А.А. Развитие экотуризма малых городов как особая стратегия государственной инвестиционной политики // Сборник материалов XIV Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы экономических наук». Новосибирск, 2010. № 14. С. 190-195.
17. Емельянова Н.А. История развития экологического туризма в России // Мордовский заповедник. 2013. № 5. С. 26-27.
18. Романов Н.А., Бакаева Н.В. Экологический туризм как инструмент формирования историко-культурных ландшафтов в малых городах (на примере города Суздаль) // Материалы XI Международной научно-практической конференции «Среда, окружающая человека: природная, техногенная, социальная». Брянск: БГИТУ, 2022. С. 207-213.
19. Об утверждении проекта Генерального плана города Суздаля Владимирской области: решение Совета народных депутатов муниципального образования города Суздаль от 16.02.21 № 11: [Электронный ресурс]. – Доступ из системы «ФГИС ТП» (дата обращения: 12.02.2023)
20. О Правилах землепользования и застройки муниципального образования города Суздаль Владимирской области: решение Совета народных депутатов муниципального образования города Суздаль от 30.12.2009 № 118: [Электронный ресурс]. – Доступ из системы «ФГИС ТП» (дата обращения: 12.02.2023)

REFERENCES

1. Isachenko A.G. Landshaftovedenie i fiziko-geograficheskoe rajonirovanie [Landscape science and physical-geographical zoning]. Moscow: Vysshaya shkola, 1991. 366 p. (rus)
2. Mikulina E.M., Blagovidova N.G. Priemy proektirovaniya ekoposelenij [Ways of Designing Eco-Settlements]. Academia. Arhitektura i stroitel'stvo. 2014. No. 3. Pp. 90-96. (rus)
3. Nefedov V.A. Arhitekturno-landshaftnaya rekonstrukciya kak sredstvo optimizacii gorodskoj sredy [Architectural and landscape reconstruction as a means of optimizing the urban environment]. ASD. Ahitektura. Stroitel'stvo. Dizajn. 2005. No. 1. Pp. 60-61. (rus)
4. Vladimirov V.V. Urboekologiya [Urban ecology]. Moscow: MNEPU. 1999. 203 p. (rus)
5. Tetior A.N. Puti ekorekonstrukcii i ekorestavracii gorodov [Ways of ecological reconstruction and restoration of cities]. Sciences of Europe. 2018. Vol. 23. No. 23-1. Pp. 69-77. (rus)
6. Reymers N.F. Prirodopol'zovanie [Nature management]. Moscow: Mysl'. 1990. 366 p. (rus)
7. Tetior A.N. Ekologicheskaya infrastruktura - novoe napravlenie i novaya nauchnaya disciplina v stroitel'stve [The ecological infrastructure is a new direction and new scientific discipline in building]. Zhilishchnoe stroitel'stvo. 2010. No. 4. Pp. 17-19. (rus)
8. Tarasova O.Y., Larina A.V. Ekologicheskoe obustrojstvo i rekonstrukciya selitebnyh landshaftov goroda Temnikov [Ecological construction and reconstruction of residential landscapes of the town Temnikov]. Sovremennye problemy territorial'nogo razvitiya. 2019. No. 2. 12 p. (rus)

9. Shcherbakova I.V. Sociologicheskie issledovaniya goroda: diagnostika problem i grazhdanskaya diplomatiya [Sociological research of the city: diagnostics of problems and civil diplomacy]. Territoriya i planirovanie. 2010. Vol. 29. No. 5. Pp. 78-82. (rus)
10. Lapochkina V.V., Kosareva N.V., Adashova T.A. Ekologicheskij turizm v Rossii: tendencii razvitiya [Environmental tourism in Russia: trends in development]. Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal. 2016. Vol 47. No. 5. Chast' 1. Pp. 100-105. (rus)
11. Zverkova E.N. Tendencii razvitiya ekologicheskogo turizma v Rossijskoj Federacii [Trends in development of ecological tourism in Russian Federation]. Nauka, obrazovanie i kul'tura. 2020. Vol 50. No. 6. Pp. 47-49. (rus)
12. Oborin M.S. Sovremennaya koncepciya razvitiya ekologicheskogo turizma v Rossii [The modern development concept of ecological tourism in Russia]. Servis v Rossii i za rubezhom. 2020. Vol 14. No. 4. Pp. 22-32. doi:10.24411/1995-042X-2020-10402. (in Russ.)
13. Vasilyeva M.I. K yuridicheskomu opredeleniyu ponyatiya ekologicheskogo turizma [The Legal Definition of the Concept of Ecotourism]. Lex russica. 2020. Vol. 73. No. 4. Pp. 34-52. doi:10.17803/1729-5920.2020.161.4.034-052. (in Russ.)
14. Shestakova E.S., Rudyk A.N., Butova T.G. Funkcii ekologicheskogo turizma [Functions of ecotourism]. Servis v Rossii i za rubezhom. 2016. No. 2. Pp. 239-252. doi: 10.12737/19737
15. Kosolapov A.B. Teoriya i praktika ekologicheskogo turizma [Theory and practice of ecological tourism]. Moscow: KNORUS. 2017. 230 p. (rus)
16. Sokolova A.A. Razvitie ekoturizma mal'kh gorodov kak osobaya strategiya gosudarstvennoj investicionnoj politiki [Development of ecotourism of small towns as a special strategy of the state investment policy]. Sbornik materialov XIV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Aktual'nye voprosy ekonomicheskikh nauk». Novosibirsk. 2010. No. 14. Pp. 190-195. (rus)
17. Emelianova N.A. Istoriya razvitiya ekologicheskogo turizma v Rossii [The history of the development of ecological tourism in Russia]. Mordovskij zapovednik. 2013. No. 5. Pp. 26-27. (rus)
18. Romanov N.A., Bakaeva N.V. Ekologicheskij turizm kak instrument formirovaniya istoriko-kul'turnyh landshaftov v mal'kh gorodakh (na primere goroda Suzdal') [Ecological tourism as a tool for the formation of historical and cultural landscapes in small towns (on the example of the city of Suzdal)]. Materialy XI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Sreda, okruzhayushchaya cheloveka: prirodnyaya, tekhnogennaya, social'naya». Bryansk: Bryansk State Engineering and Technology University. 2022. Pp. 207-213 (rus)
19. Project General Plan of the city of Suzdal, Vladimir region: decision of the Council of People's Deputies of the municipal formation of the city of Suzdal, Febr. 16, 2021, No. 11. [Online]. URL:http://gorodsuzdal.ru/files/Genplan/16.02.2021_11.pdf (date of application: 12.02.2023)
20. Rules of land use and development of the municipal formation of the city of Suzdal, Vladimir region: decision of the Council of People's Deputies of the municipal formation of the city of Suzdal, December 30, 2009. No. 118. [Online]. URL:<http://gorodsuzdal.ru/files/Pravila%20zp/r118pr.pdf> (date of application: 12.02.2023)

Информация об авторах:

Бакаева Наталья Владимировна

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия,
доктор технических наук, профессор кафедры градостроительства.
E-mail: natbak@mail.ru

Романов Никита Альбертович

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия,
магистрант.
E-mail: nikitaromanov-1998@mail.ru

Information about authors:

Bakaeva Natalya V.

National Research University Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
doctor of technical sciences, professor departments of urban Planning.
E-mail: natbak@mail.ru

Romanov Nikita Al.

National Research University Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
student.
E-mail: nikitaromanov-1998@mail.ru

О.В. ВОЛИЧЕНКО¹, А.В. ЛИТЯГИНА¹¹ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Россия

МУЛЬТИКОМФОРТНАЯ СРЕДА В АРХИТЕКТУРЕ БЫСТРОВОЗВОДИМЫХ ЗДАНИЙ

Аннотация. Проблемы быстровозводимости, экономичности, прочности и энергоэффективности зданий жилой и гражданской архитектуры становятся особенно актуальными в настоящее время, ввиду необходимости в сжатые сроки восстановить разрушенные города и села на вновь присоединенных территориях. В целях экспериментального предложения проекта жилого дома на основе концепции мультикомфорта был проведен анализ развития индустриальных методов строительства. Обзор эволюционного развития индустриального домостроения, позволил выявить его преимущества (скорость строительства, низкая стоимость, простота конструктивных решений и др.), недостатки (низкое качество и уровень комфорта, типовые штампы и др.) и способы их ликвидации (повышение комфорта, энергоэффективность, разработка новых конструктивных решений, художественная выразительность, планировочная вариабильность и др.).

Авторами предлагается разработка проекта быстровозводимого жилого дома на основе инновационных панелей рамного типа, изготовленных в заводских условиях. Данные конструкции быстро монтируются на строительной площадке, отличаются повышенной жесткостью, живучестью и материалоемкостью. Данная конструктивная система предоставляет возможность создавать гибкие архитектурно-планировочные решения с разнообразной пластикой форм здания. Энергоэффективность и мультикомфортная среда жилого дома достигается ориентацией здания на проектируемом участке, использованием изолирующих материалов и остеклением (снижение теплопотерь и шумозащита). Форма здания также обеспечивает тепловой комфорт дворового пространства. Потoki ветра разбиваются выступающими и западающими архитектурными элементами, создающими сложные и содержательные композиционные связи. Применение новых индустриальных конструкций позволяет, используя принципы энергоэффективного проектирования, повысить уровень комфорта и экономичность жилого дома, решить проблемы жизнестойкости и быстровозводимости зданий, создать выразительный архитектурно-художественный облик жилой среды.

Ключевые слова: жилая архитектура, пространственная среда, быстровозводимые здания, мультикомфорт, энергоэффективность, конструктивная структура, ориентация, ветрозащита

O.V. VOLICHENKO¹, A.V. LITYAGINA¹¹Southwestern State University, Kursk, Russia

MULTI-COMFORT ENVIRONMENT IN THE ARCHITECTURE OF PRE-RESTRUCTURED BUILDINGS

Abstract. The problems of prefabrication, cost-effectiveness, strength and energy efficiency of buildings of residential and civil architecture are becoming especially relevant at the present time, due to the need to quickly restore the destroyed cities and villages in the newly annexed territories. For the purpose of an experimental proposal for a residential building project based on the concept of multi-comfort, an analysis of the development of industrial construction methods was carried out. A review of the evolutionary development of industrial housing construction made it possible to identify its advantages (speed of construction, low cost, simplicity of design solutions, etc.), disadvantages (low quality and comfort level, standard stamps, etc.) and ways to eliminate them (increased comfort, energy efficiency, development new constructive solutions, artistic expressiveness, planning variability, etc.).

The authors propose the development of a project for a prefabricated residential building based on innovative frame-type panels manufactured in the factory. These structures are quickly mounted on the construction site, they are characterized by increased rigidity, survivability and material consumption. This constructive system provides an opportunity to create flexible architectural and planning solutions with a variety of plastic shapes of the building. Energy efficiency and multi-comfort environment of a residential building is achieved by the orientation of the building on the designed site, the use of insulating materials and glazing (reduction of heat loss and noise protection). The shape of the building also ensures the thermal comfort of the yard space. Wind currents are broken by protruding and sinking architectural elements, creating complex and meaningful compositional connections. The use of new industrial structures allows, using the principles of energy-efficient design, to increase the level of comfort and efficiency of a residential building, solve the problems of viability and quick erection of buildings, and create an expressive architectural and artistic appearance of the residential environment.

Keywords: residential architecture, spatial environment, prefabricated buildings, multi-comfort, energy efficiency, structural structure, orientation, wind protection.

Архитектура – это способность нашего сознания закреплять в материальных формах чувство эпохи

Ле Корбюзье [1, с. 56]

Введение

Восстановление разрушенных в результате военных действий вновь присоединенных территорий Российской Федерации требует разработки методов быстрого, экономичного и качественного строительства жилых домов, формирующих комфортную и биосовместимую городскую среду. Ретроспективный взгляд на историю становления и развития индустриального домостроения помогает выявить ошибки, недочеты и положительные стороны прошлого для использования их, на более высоком технологическом уровне архитектурно-строительного опыта, в настоящем и будущем. Сборный железобетон обладает несомненными преимуществами по сравнению с монолитными или металлическими конструкциями. В условиях сжатого графика строительства и для достижения экономической эффективности, устойчивости здания и комплексной реализации всего проекта на первый план вновь выступает идея индустриального домостроения. Многочисленные исследования, направленные на изучение архитектурно-типологических, архитектурно-композиционных и конструктивно-технологических проблем массового жилищного строительства, активно велись, начиная со второй половины XX века. В настоящее время задачи быстрого возведения зданий из сборных железобетонных конструкций становятся особенно актуальны как у нас в стране [2-7], так и за рубежом [8-11]. Использование новых конструктивных систем при разработке архитектуры жилых зданий позволяет устранить недостатки типового панельного домостроения – отсутствие свободной планировки, тепло- и шумозащиты, невозможность адаптации первых этажей под функциональные процессы помещений общественного назначения, а подвальных под автопарковку, низкое качество строительства, невыразительное архитектурное решение фасадов, формирующих несовременную городскую среду. Анализ развития методов индустриального строительства с целью создания мульткомфортной среды в архитектуре быстровозводимых зданий еще не проводился, что подтверждает выбор темы статьи, ее практическую и теоретическую значимость.

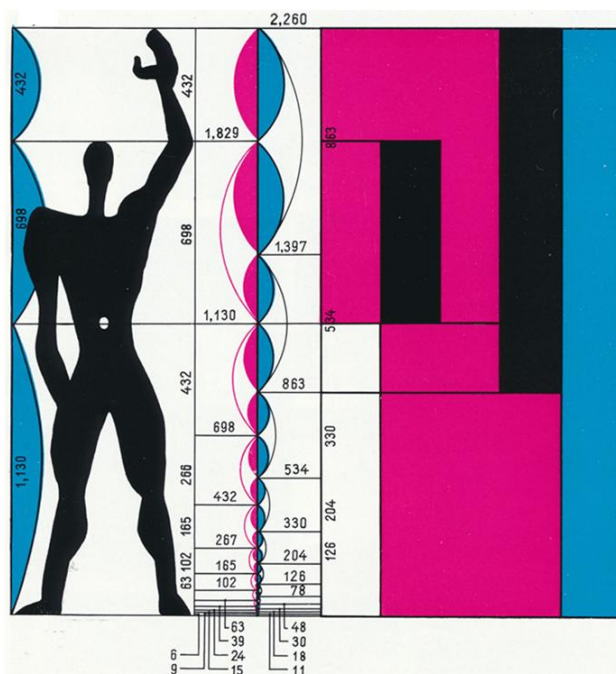
Модели и методы

В XX веке – веке индустриализации и урбанизации, – остро встала проблема быстрого увеличения жилого фонда, темпы роста которого значительно отставали от необходимого уровня. Интенсивное промышленное строительство требовало все большего количества рабочих. Резкое увеличение численности рабочих, а, следовательно, и городского населения, спровоцировало глубокий жилищный кризис. Масштабное разрушение городов, во время Второй мировой войны обострило кризисное положение. Строительная отрасль, по-

прежнему, используя старые методы возведения зданий, была отсталой и архаичной по сравнению с другими быстроразвивающимися сферами промышленности.

Необходимость применения методов конвейерной сборки на строительной площадке пропагандировал французский архитектор Ле Корбюзье – величайший теоретик архитектуры, сформировавший художественное и инженерное мировоззрение, а также архитектурный облик городов XX века [12-14]. Он говорил: «Как автомобиль Форда собирается на конвейере, так и дом должен собираться на строительной площадке» [1, с. 196]. Формула «дом – машина для жилья» предполагала достижение максимальной функциональности – «машина способная удовлетворить наши потребности в комфорте, место пригодное для размышлений, красивое место, создающее необходимый покой для ума» [1, с. 72]; внедрения элементарных геометрических форм; упрощенной конструктивной схемы и удаление декора. Ле Корбюзье рассматривает дом как жилую единицу, подключенную ко всем жизненно важным структурам современного города. Такая типовая единица составляет основу массового жилищного строительства, создавая равные условия для жизни людей. С целью унификации архитектурных и конструктивных элементов здания он разрабатывает универсальную модель пропорциональных отношений жилой единицы и размеров (пропорций) – модульор (см. рисунок 1).

а)



б)

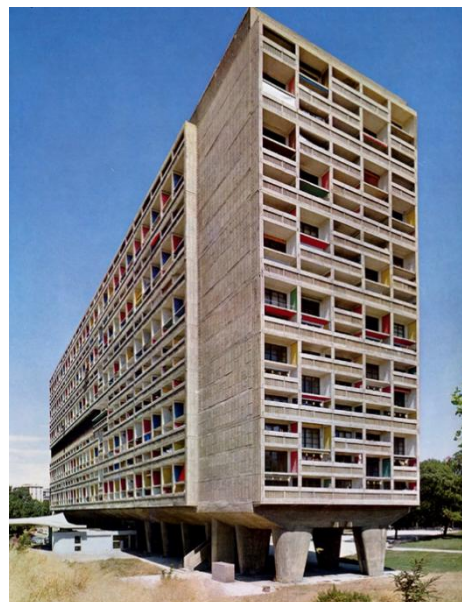


Рисунок 1 - Система типизации архитектурно-конструктивных элементов:

- а) Система гармонических величин – модульор, разработан Ле Корбюзье, 1942-48 гг.;**
б) жилая единица в Марселе, арх. Ле Корбюзье, 1952 г.

Ле Корбюзье вводит целый ряд **архитектурно-планировочных и экологических инноваций**, остающихся актуальными и сегодня – столбы-опоры, свободная планировка внутреннего пространства, ленточные окна, плоскую крышу-сад, не несущую фасадную стену (навесной фасад), инсоляцию помещений и проветриваемость, многофункциональность здания и т.п. [15, с. 330]. Тотально тиражируя по всему миру новые подходы и методы, последователи Ле Корбюзье в результате, девальвировали и обесценили декларируемые им идеи, что в конечном счете привело к их неоправданному отторжению.

В 60-е годы происходит массовый переход к индустриальным методам домостроения. Задача обеспечения населения СССР жильем решалась за счет сокращения сроков строительства (монтаж типовых конструктивных элементов на строительной площадке) и снижения его стоимости (что привело к снижению требований к качеству и комфорту) [16].

Наибольшее распространение получили серии типовых крупнопанельных многоквартирных жилых домов средней этажности (4-5 этажей). Внедрение унифицированных конструктивных элементов и стандартизированных архитектурно-планировочных решений привело к обезличиванию городской застройки, потери художественной образности и региональной уникальности. Основными требованиями строительной программы Н.С. Хрущёва были:

- простота и строгость (элементарная геометрическая форма, отсутствие декора);
- экономичность решений (снижение габаритов, минимальной площади на 1 чел., сокращение полезной и общей площади);
- быстрота строительства (серии типовых проектов, производство готовых деталей для типовых зданий на заводе, метод сборки на строительной площадке).

Жилые комплексы «хрущёвской» застройки отличались продуманной социальной инфраструктурой – наличием детских учреждений, школ, торговых помещений, кинотеатров, спорткомплексов и т. п.) и комфортной средой, организацией и благоустройством дворовых пространств (озеленение, детские и спортивные площадки для детей и взрослых и т.п.) (см. таблицу 1).

Таблица 1 – Положительные и отрицательные стороны индустриального домостроения 60-х годов XX века

Критерии	Отрицательные качества	Положительные качества
Форма	Безликость, потеря художественной образности	Простота и строгость архитектурных форм
Качество жилого фонда	Снижение – габаритов квартир, шумозащиты, теплового комфорта; удаление архитектурного декора	Экономичность решений, рациональность
	Типовое строительство, снижение уровня комфорта квартир	Быстровозводимость – жилой дом возводился за 25 дней
Социальная инфраструктура жилого комплекса	Единообразие, однородная модернистская среда	Развернутая инфраструктура (детские учреждения, школы, торговые помещения, кинотеатры, спорткомплексы и т.п.)
Благоустройство территории	Модернистская сетка, типизированная решетка	Озеленение, детские и спортивные площадки для детей и взрослых и т.п.
Образ жилых кварталов	Серость, невыразительность, безликость	Необработанный бетон

В 70-80-е годы на смену пятиэтажным приходят девяти- двенадцати- и шестнадцатиэтажные панельные жилые дома. Увеличивается площадь и высота квартир, появляется пассажирский лифт, мусоропровод, лоджии, встроенные шкафы, кладовые, отдельные санузлы и т.п. Для повышения художественной выразительности добавляются декоративные элементы на панелях, выполненные в заводских условиях [17, с. 4] (см. рисунок 2).



Рисунок 2 - Фрунзе (Киргизия). Многофункциональный 9-ти этажный жилой дом, 1981

Параллельно строились жилые дома смешанного типа с внутренним сборным несущим железобетонным каркасом и наружными несущими кирпичными стенами [18].

В настоящее время панельное домостроение использует аналогичные советским методы строительства (см. таблицу 2). Его основу составляют панели размером в высоту этажа, изготавливаемые на заводе. Отличительная черта – большая площадь и цветная облицовка панелей. Качество строительства зависит в первую очередь от качества изготовления панелей, а для этого необходимо привлекать высококвалифицированных рабочих.

Таблица 2 – Сравнительные характеристики методов индустриального домостроения 60-х гг. с настоящим временем

60-е гг. XX века	Настоящее время
Дома из панелей, изготовленных на заводе	Дома из панелей, изготовленных на заводе
Соединение палей без цемента (сварка)	Соединение палей без цемента
Комплексная застройка - жилой квартал единое пространство для жизни	Дворы без машин, комплексное благоустройство, огороженные придомовые территории
Пятиэтажная жилая застройка	Четырех- и пятиэтажные дома - стандарт комфортного жилья
Однокомнатная квартира с совмещенным санузлом (S=30 кв.м). 2-х комнатная квартира с проходными комнатами	Квартиры-студии без выделения прихожей и кухни (S=20 кв. м)
Типовой проект (серии 1-447, К-7, II-32, 1-335, 1-510)	Типовой проект (серии 349/01, ГМС-1, И-155-Б, ИП-46С, ТА-714-001)

После запуска программы массового индустриального строительства типовых многоэтажных жилых домов прошло более 60 лет, однако многие методы строительства остаются актуальными до сих пор (см. рисунок 3).



Рисунок 3 - Москва. Жилой комплекс из серии типовых домов «Град 1М», 2023

Современная практика строительства быстровозводимых жилых зданий

Мировым лидером по скорости возведения жилых зданий и разработки конструктивных модулей является Китай. Двенадцать лет назад (2011 г.) в провинции

Хунань за 15 дней был построен пятизвездочный **30-этажный отель «Т30»**. Номерной фонд отеля состоял из 316 номеров стандарт, 32 люкса, 8 полулюкса и 2 президентских люкса. Автомобильная парковка предусмотрена в подвальном этаже; на первом расположены ресторан, бар и тренажерный зал; на последнем этаже – бассейн; на кровле – вертолетная площадка. «Здание при этом признано одним из самых экологических в Китае: *внешняя солнцезащита; высокая энергоэффективность; наличие системы рекуперации тепла и современной очистки воздуха (качество воздуха внутри отеля в 20 раз лучше, чем снаружи); сейсмоустойчиво (выдерживает толчки до 9 баллов)*» [19].

Скорость возведения была обеспечена, во-первых, сборкой крупных металлических элементов заводского изготовления, выполненных заранее, во-вторых, синхронизаций разных этапов строительных работ. Например, установка опор фундаментов и нулевой цикл подвального этажа проводилась одновременно с изготовлением рам, колонн и стеновых панелей. Весь процесс строительства исключал временные и материальные издержки на складирование материалов. Все технологические этапы – проектирование, промышленное производство и транспортировка на стройплощадку конструктивных элементов, – были организованы без хранения. Моментальное использование блоков существенно сократило сроки строительства (см. рисунок 4).

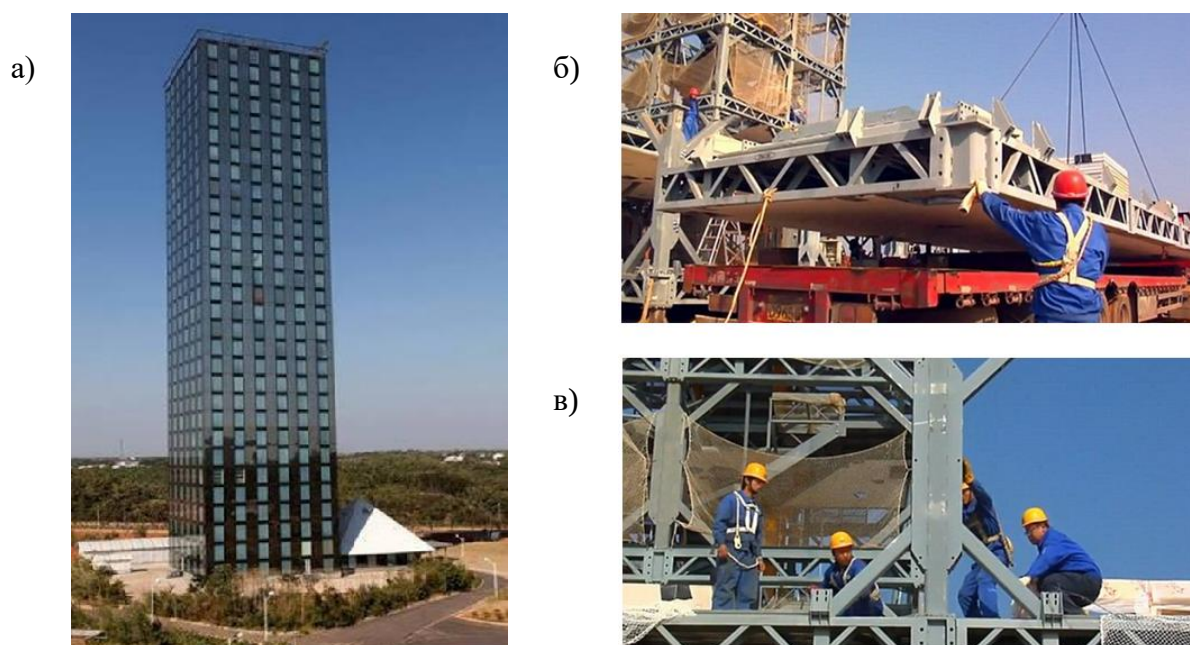


Рисунок 4 - Хунань (Китай). Отель «Т30»:
 а) общий вид; б) панель перекрытия; в) металлический каркас

Сборка **10-ти этажного здания** в городе Мохали (штат Пенджаб, Индия) из заранее изготовленных крупногабаритных стальных элементов, а также готовых инженерных систем было построено за 2 суток. Суммарный вес конструкций достигает 200 тонн. В конструктивной схеме здания была учтена высокая сейсмичность района строительства. Скорость строительства обеспечили 200 высококвалифицированных инженеров и рабочих.

57-ми этажный многофункциональный комплекс «Mini Sky City» в провинции Чанша (КНР) был построен за 19 дней. На первых 10 этажах размещаются офисные и торговые помещения; на остальных – жилые квартиры. Высокая энергоэффективность здания обеспечивается: *хорошей термоизоляцией, толщиной в 20 см; 4-х слойными мультифункциональными стеклопакетами, автоматической солнцезащитой и системой рекуперации свежего воздуха*. На изготовление в заводских условиях всех конструктивных модулей здания (в количестве – 2, 7 тыс.), включая металлический каркас, внешние

ограждающие конструкции и элементы внутренних коммуникаций, ушло 4,5 месяца. Затем 1200 рабочих, работая в 3 смены собрали конструктивные детали небоскреба, подобно лего.

Модульные блоки **10-ти этажного жилого дома «Living Building»** в Чанше (КНР), построенного за 28 ч 45 мин, изготовлены полностью в заводских условиях. Модуль – готовый фрагмент здания, выполненный с внутренней и внешней отделкой, утеплителем и остеклением, и инженерными системами (водопровод, канализация, вентиляция и др.). Затем эти модули с помощью крепежных болтов собираются в единую систему. Основу модульного блока составляют плиты из нержавеющей стали, между которыми проложено множество металлических трубок. Такие плиты в 10 раз легче и в 100 раз прочнее обычных перекрытий. Габариты модуля рассчитывались исходя из удобства его транспортировки. Здание легко собирается и разбирается, обеспечивая мобильность (перенос в другое место, перепланировка и т.п.). Энергоэффективность жилого дома обеспечивается применением «утеплителя толщиной 22 см, окнами из многослойного стекла, наружными солнцезащитными козырьками, а также системой рекуперации тепла и свежего воздуха с интеллектуальным управлением, что позволит потреблять на 80-90% электроэнергии меньше, чем в обычном здании» [20] (см. рисунок 5).

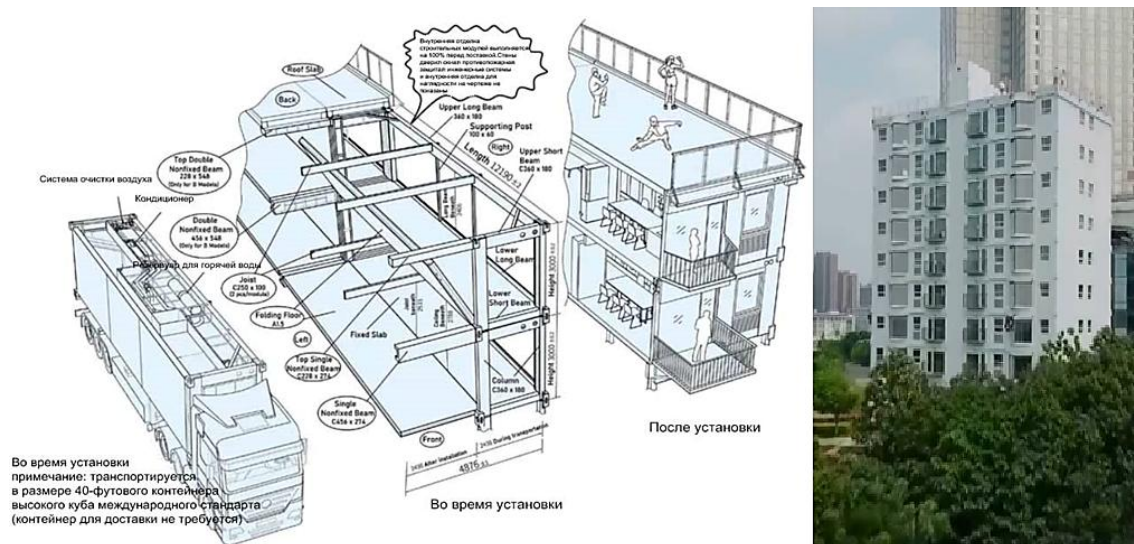


Рисунок 5 - Чанша (Китай). Многоэтажный жилой дом «Living Building» из модульных блоков

Исследование опыта строительства жилых домов из готовых конструктивных модулей, показало, что скорость возведения, жизнестойкость и экономичность системы может в то же время обеспечить высокий уровень средового комфорта, при помощи экологичной направленности проектирования. Высокое потребление энергии в зданиях в основном связано с потерями и получением энергии через ограждающие конструкции. Любое усовершенствование конструкции для повышения энергоэффективности зданий не только значительно сократит потребление энергии, но и приведет к значительным экономическим, социальным и экологическим преимуществам. Существует прямая зависимость между качеством микроклимата современных зданий и их энергосберегающим потенциалом, позволяющим минимизировать затраты на энергию, отопление, водоснабжение и т.п. Мультикомфорт создают при помощи: архитектурно-планировочного решения; инновационных конструктивных систем и строительных материалов; использования изоляционных материалов для тепло-, шумо-, паро- и гидрозащиты; двухкамерных стеклопакетов; благоприятной ориентации, обеспечивающей инсоляцию и ветрозащиту. Многие исследователи обращались к проблемам повышения энергоэффективности зданий в условиях умеренного климата региона [21-24].

Методы архитектурно-градостроительного анализа позволили установить, что концепция многофункциональности жилого дома, включающая как жилые (разнообразные типы квартир с различным планировочным решением), так и коммерческие помещения (коворкинги, досуговые и образовательные центры, кафе, предприятия бытового обслуживания и т.п.) с большим количеством зеленых насаждений, детских и спортивных площадок разных типов и видов активностей становится одним из компонентов мультикомфортной среды.

Результаты исследования и их анализ

Задачи по разработке быстровозводимого энергоэффективного многофункционального жилого дома, отвечающего современным требованиям уровня комфорта и предметно-пространственной организации городской среды, решалась совместно кафедрами «Архитектура, градостроительство и графика» и «Уникальные здания и сооружения» Юго-Западного государственного университета. Участок проектирования площадью 5 га расположен в северной части г. Курска на улице Смородиновой. На участке предполагается разместить два жилых дома и образовательный комплекс (школу и детский сад), выполненных из инновационных панельно-рамных элементов индустриального производства, обеспечивающих вариативность и многообразие архитектурно-планировочного решения, снижение расходов на их транспортировку и монтаж на строительной площадке, увеличение прочности и жесткости конструкций и т.п.

Многофункциональный жилой дом секционного типа (7 секций) объединяет вокруг вертикальных коммуникаций (лифтового и лестничного узла) от 2 до 4 квартир, первый этаж занят помещениями общественного назначения (торговыми, спортивными, досуговыми, бытовых услуг, общественного питания и т.п.) в подвальном размещается парковка для автомобилей (см. рисунок 6).



Рисунок 6 - Проектируемый многофункциональный жилой дом, общий вид

Ступенчатый силуэт периметральной застройки (от 6 до 17 этажей) определяет условия восприятия окружающей среды, размер дворового пространства, характер затенения придомовых территорий. «К определяющим условиям и параметрам архитектурно-планировочных решений относят: 1) форму дома, площадь общая и застройки, конфигурацию остекления; 2) конфигурацию и планировку внутреннего объема здания; 3) конфигурацию строения относительно сторон света, а также интеграцию с природным ландшафтом» [25, с. 246].

На композицию плана повлияло направление и характер воздействия ветров, и характер окружающей застройки, ландшафт местности. Ветровой комфорт важный показатель для общественных территорий на открытом воздухе. В городе Курске среднегодовая скорость ветра составляет 2,4 м/с. В зимнее время преобладает юго-западный и северо-восточный ветер. Как мы видим анализ показывает, что, архитектурно-планировочными средствами и формой здания удалось значительно снизить скорость (см. рисунок 7). Следуя основному принципу органической архитектуры «форма здания должна вытекать, прежде всего, из специфического назначения данного строения и, конечно, тех уникальных условий среды, в которых оно возводится, и в дальнейшем будет функционировать» [26].

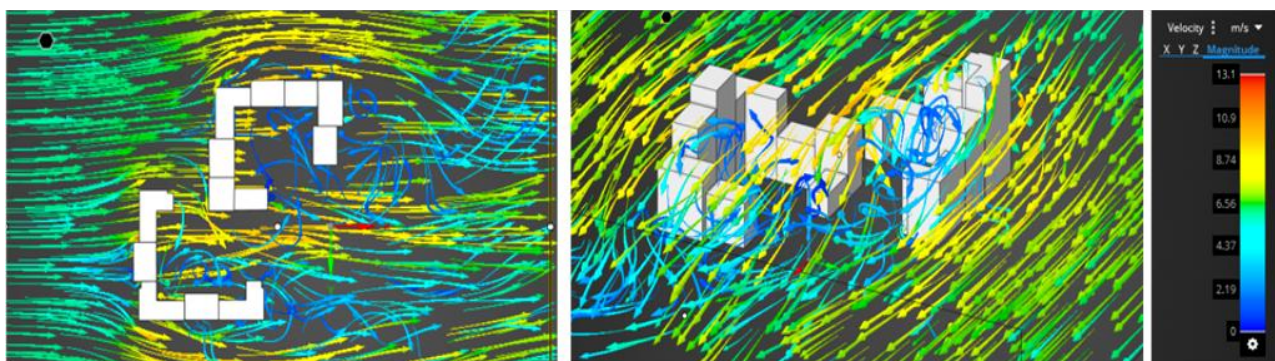


Рисунок 7 - Анализ ветрового режима на территории проектируемых зданий

При разработке концепции проекта многофункционального жилого дома руководствовались принципами – устойчивого экологичного проектирования; критериями мультикомфорта; инновационности; художественной выразительности; семейных и социальных ценностей. Проектное предложение формировалось на основе модели быстровозводимого и экологичного дома, учитывающего экономичность и жизнестойкость конструктивной структуры и материалов, а также климатические характеристики региона (см. рисунок 8).

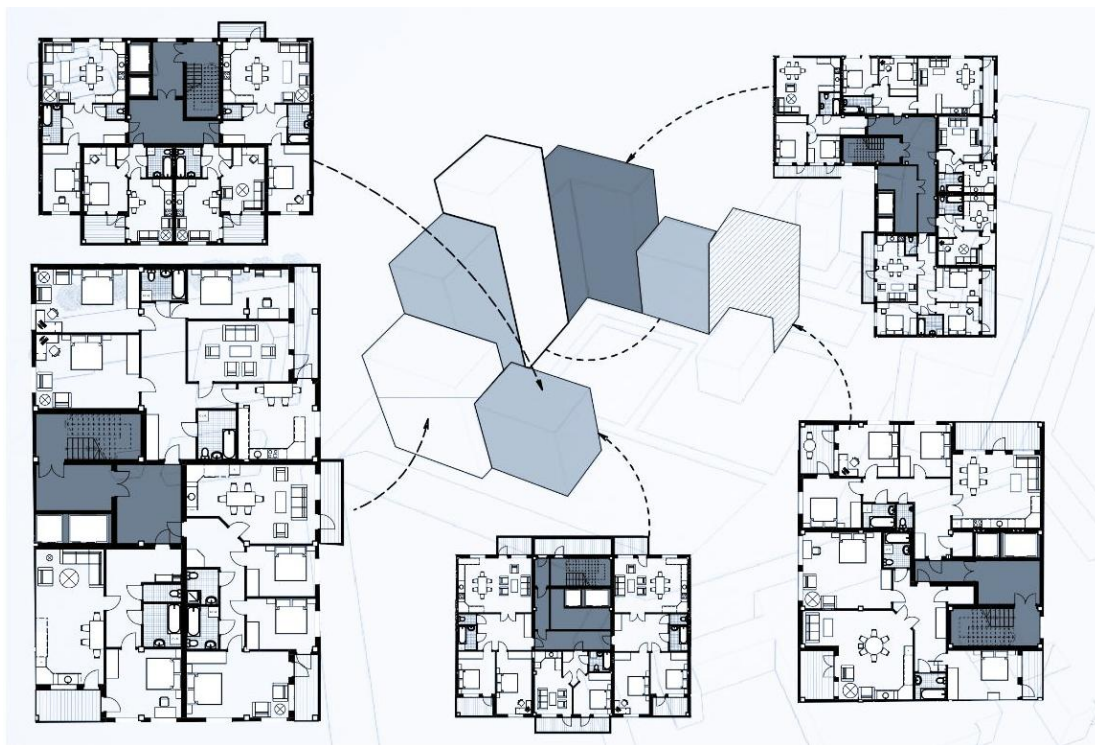


Рисунок 8 - Планировка секций и расположение в доме

Архитектурная концепция заключается в разработке инновационного, отвечающего современным требованиям жилой архитектуры здания с паркингом, зоной общественного назначения и рекреационным дворовым пространством, ориентированном для проведения досуга жителей разных возрастов. На основе использования концепции целостной жилой среды, учитывающей распределение и организацию жизненных процессов как в квартире (индивидуальные), так и в жилой среде (коллективные), решались вопросы повышения уровня комфорта в жилом доме. Оболочка дома – совокупность ограждающих конструкций, его этажность, конфигурация и детали появляется как результат внешнего окружения.

Конструктивная схема здания. В отечественной практике быстровозводимых конструктивных систем преобладает использование железобетонных панельных элементов, включающих – несущие продольные и поперечные стеновые панели, соединенные с плитами перекрытий и наружные самонесущие стены. К существенным недостаткам данной конструктивной схемы можно отнести, во-первых, материал (конструктивный бетон), из которого выполняются внутренние стеновые панели, обладающий высокой энергоемкостью и материалоемкостью. Во-вторых, платформенные стыки, получаемые при сборке панелей, снижают их несущую способность и конструктивную безопасность, что приводит к ограничению этажности.

Наиболее эффективными являются рамные железобетонные конструкции заводского изготовления предназначены для быстровозводимого строительства жилых и гражданских зданий. Они характеризуются низким расходом материала, повышенной несущей способностью, безопасностью и пространственной жесткостью. Несущие сборно-монолитные железобетонные панели-рамы выполняются в виде перевернутых «П»-образных и «L»-образных элементов. Авторы предлагаемой конструктивной системы под руководством академика РААСН В.И. Колчунова, решали проблемы «повышения защиты каркаса от прогрессирующего обрушения при внезапном изменении направления силовых потоков от особого воздействия в виде удаления одной из стоек панели рамы, а также упрощение технологии возведения и снижение материалоемкости всего каркаса здания» [27, с. 6]. Возможность индустриального производства основных несущих элементов каркаса здания: панелей-рам и панелей перекрытия, сокращает материальные затраты и сроки строительства. Здание из панельных элементов, включает – железобетонный каркас из несущих продольных и поперечных стеновых панелей-рам, заполненных внутри легким экологически чистым стеновым рециклируемым материалом; пустотные плиты перекрытия; слоистые самонесущие наружные стены (см. рисунок 9). Данная конструктивная система позволяет более свободно использовать внутренне пространство – от свободной планировки квартиры-студии до изолированных друг от друга внутренних пространств квартиры.

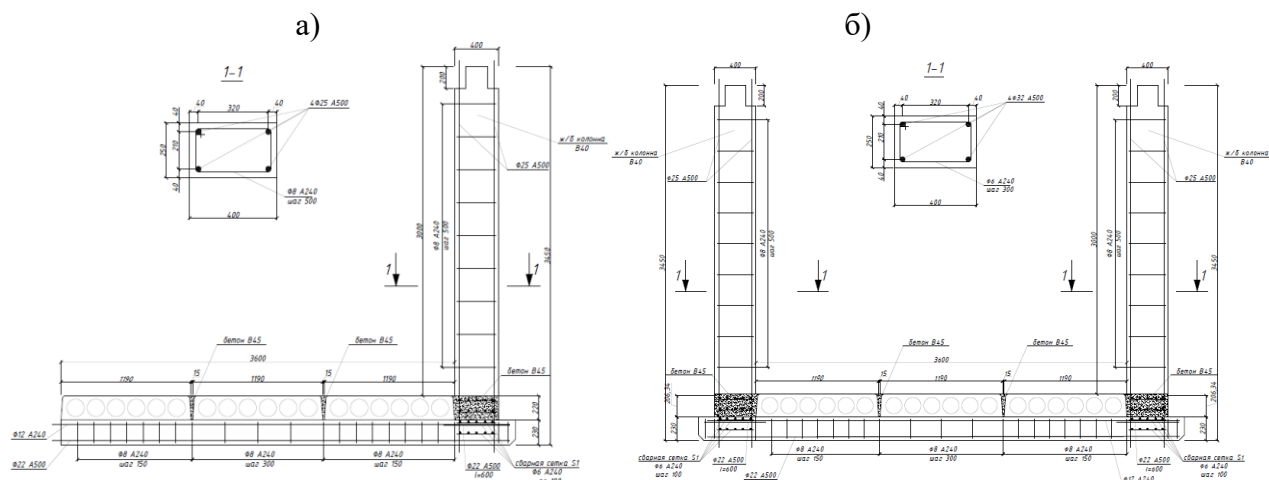


Рисунок 9 – Панели рамного типа: а) L-образная панель; б) П-образная панель

Строительные материалы. Система в виде легких наружных панелей, комплектуемых совместно с минеральными теплоизоляционными материалами и фасадной отделкой с шумопоглощающими свойствами, обеспечивающая энергоэффективность наружных ограждающих конструкций зданий. В проекте используются наружные трехслойные железобетонные стеновые панели, состоящие из трех слоев – наружного, толщиной 70 мм (защитно-декоративного слоя), среднего слоя утеплителя толщиной от 200 до 400 мм и внутреннего несущего железобетонного слоя толщиной 120 мм. Многослойная и эффективная по физико-строительным параметрам система, гарантирует высокую прочность и надежность, устойчивость к атмосферным осадкам и агрессивным воздействиям, увеличивает шумо- и теплоизоляционные показатели. Отделка фасадов позволяет «за счет чередования разномасштабных метрических рядов создавать многообразие архитектурных форм» [28, с. 33] жилой зданий, выполненных из сборных конструкций.

Изоляционные материалы и остекление. Изоляция стен считается критическим параметром, играющим важную роль в определении общих тепловых характеристик здания. Люди чувствуют себя комфортно только в определенном диапазоне влажности и температуры. Большинство людей чувствуют холод при температуре ниже 20°C и жар при температуре выше 28°C; они не чувствуют себя комфортно при влажности ниже 30% и выше 85% [29, с. 15]. Характеристики зданий могут быть значительно улучшены при правильном выборе типов и толщины изоляционных материалов. Защита от внешнего шума обеспечивается ориентацией спальных зон во внутреннее дворовое пространство. Стилобата первых этажей дома, приподнимает окна нижних жилых этажей, что также служит защитой от шума. При использовании надлежащей **теплоизоляции и типа остекления** можно сэкономить от 20% до 55% энергии [30, с. 19]. Применение оптимальной толщины изоляции, среднее энергосбережение и сокращение выбросов CO₂ могут достигать 40% и 63% [31, с. 9]. Большие потери энергии происходили через окна зданий. Поэтому следует тщательно изучить правильный тип остекления, количество слоев остекления и соотношение окон и стен для снижения энергопотребления. Оптимальная экономичная толщина теплоизоляции зависит от ориентации и отношения окна к стене здания. Использование качественных многокамерных стеклопакетов с повышенной шумоизоляцией.

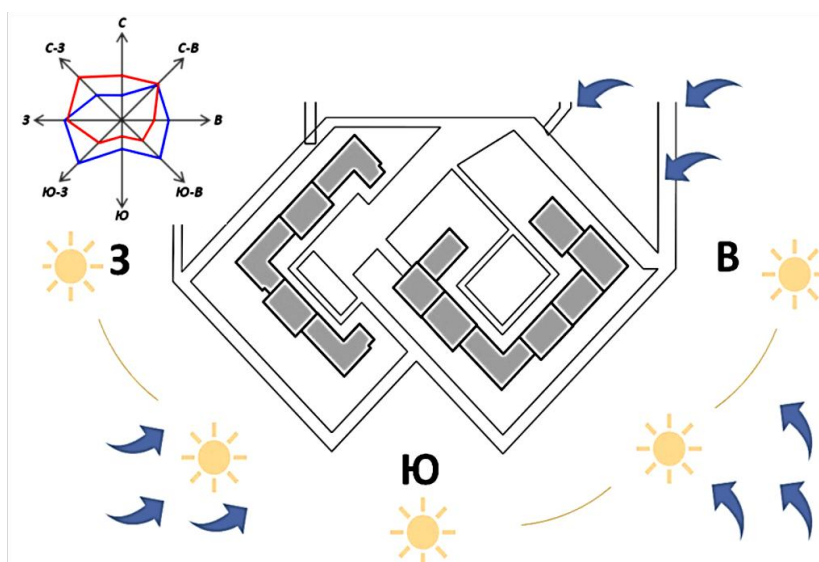


Рисунок 10 - Схема ориентации проектируемых жилых зданий

Ориентация здания играет важную роль в снижении потребления энергии. Архитектурно-планировочная композиция квартир жилого дома оказывает значительное влияние на накопление и перераспределение солнечного света и тепла. Факторы климата,

имеющие векторную направленность – солнечные лучи и ветер – регулируются формой и геометрией открытых пространств, а также планировкой помещений. Способность здания естественным образом обогревать и освещать внутренние помещения может значительно снизить потребность в искусственных системах отопления. Сокращение потребности в отопительных и осветительных приборах приведет к сокращению энергопотребления и повышению эффективности. Наиболее экономичная ориентация составляет $+180^\circ$ от базового уровня. При такой ориентации внешний фасад, обращен в южную сторону. Стекло интенсивно поглощает солнечное излучение, поэтому внешний фасад с большим количеством оконных блоков будет способствовать более высокому уровню проникновения солнечного тепла во внутреннее пространство дома. Способность естественным образом нагревать внутреннее пространство зависит от внешних компонентов здания и от того, как они взаимодействуют с солнцем. «Для обеспечения комфортного теплового режима в здании температура внутренней поверхности ограждающих конструкций должна быть, во-первых, как можно ближе к температуре внутреннего воздуха, а во-вторых, неравномерность этой температуры в различных частях здания необходимо свести к минимуму» [32, с. 92]. Оптимизация ориентации и формы здания может привести к экономии энергии на 36%, максимально используя возможности солнечной энергии для естественного обогрева помещений в холодные месяцы. Учет преимуществ ориентации расположения здания на участке потенциально могут снизить потребность здания в энергии на 20% за счет увеличения количества дневного света, попадающего во внутреннее пространство (см. рисунок 10).

Выводы

Увязывание требований энергоэффективности с целями экономичности, быстровозводимости, повышенной прочности конструктивного решения объектов индустриального домостроения позволяет выработать общие рекомендации по восстановлению разрушенного жилого фонда вновь присоединенных территорий. Методология архитектурного проектирования поддерживает минимизацию затрат в течении всего жизненного цикла здания при максимальной экологической выгоде. Экономия затрат за счет снижения энергопотребления значительно повышается. Энергоэффективная архитектура дает возможность сохранять прохладу в жаркие периоды (без необходимости использования кондиционеров), и тепло – в холодное время (практически не требуя нагревательных устройств и не потребляя энергии), минимизируя таким образом экономические затраты.

В настоящее время существует устойчивая потребность в доступном жилье, которое обеспечивается постоянно совершенствующимися материалами и сборными железобетонными рамными панелями, позволяющими сочетать вариабельность планировочные схем с выразительной архитектурной формой, так же как при монолитном строительстве, но значительно сокращая при этом скорость возведения зданий. Рамные панели намного легче традиционных, что обеспечивает значительную экономию при их транспортировке. Технологии сборных конструкций способствуют внедрению экологических решений, снижая углеродный след и давление на окружающую среду. Высокое качество строительства обеспечивает использование современных технологий и оборудования, а также контроль в заводских условиях за критериями изготовления конструктивных элементов.

Эволюционное развитие методов панельного строительства, начиная с середины прошлого века, внедряя и совершенствуя новые технологии, позволили сегодня используя его достоинства (экономичность, скорость строительства и эргономичность) минимизировать отрицательные стороны, обеспечивая комфорт, энергоэффективность и экологичность жилого дома.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ле Корбюзье. Архитектура XX века. М.: Прогресс, 1977. 306 с.
2. Воробьев В.С., Сидоренко И.Л. Крупнопанельное домостроение: историческая необходимость и перспективная технология строительной отрасли // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 1 (60). С. 130-139.
3. Калабин А.В., Куковякин А.Б., Массовая жилая застройка: проблемы и перспективы // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2017. № 3 (34). С. 55-60.
4. Казин А. С. Индустриальное домостроение: вчера, сегодня, завтра // Жилищное строительство. 2018. № 10. С. 22-26.
5. Николаев С.В. Обновление жилищного фонда страны на базе крупнопанельного домостроения // Жилищное строительство. 2018. № 10. С. 17-21.
6. Павленко Д.В., Шмелев С.Е., Кузнецов Д.В., Сапронов Д.В., Фисенко С.С., Дамрина Н.В. Универсальная система сборного домостроения РБ-Юг от идеи до воплощения на строительной площадке // Строительные материалы. 2019. № 3. С. 4-10.
7. Царитова Н.Г., Курбанов А.И., Курбанова А.А. Энергоэффективные здания на основе трансформируемых каркасов // Строительство и реконструкция. 2022. № 6(104). С. 91-103.
8. Baghdadi A. Heristchian, M. Kloft, H. Connections placement optimization approach toward new prefabricated building systems // Engineering structures. 2021. Vol. 233. [Online]. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029620342498> (date of application: 07.05.2023).
9. Duan Y., Li G. Analysis on the Quality Problems and Preventive Measures of Prefabricated Building Construction // Journal of physics. Conferens series. 2020. Vol. 1648. Is. 3. [Online]. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1648/3/032141/meta> (date of application: 07.05.2023).
10. Niemelä T., Kosonen R., Jokisalo J. Energy performance and environmental impact analysis of const-optimal renovation solutions of large panel apartment building in Finland // Sustainable cities and society. 2017. Vol. 32. Pp. 9-30.
11. Blaauwendraal J. Stringer-panel models in structural concrete: applied to D-region design / Cham: Springer, 2018. 99 p.
12. Гидион З. Пространство, время, архитектура. Москва: Стройиздат., 1984. 458 с.
13. Миронов А.В. Философия архитектуры: творчество Ле Корбюзье. Москва: Макс Пресс, 2012. 289 с.
14. Поляков Е.Н., Полякова О.П. Швейцарский период (1887–1917) в жизни и творчестве Шарля-Эдуара Жаннере-Гри (Ле Корбюзье) // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 3. С. 9-20. doi:10.31675/1607-1859-2021-23-3-9-20
15. Очерки теории и истории культуры XX века / Отв. ред. Ю В Петров. Томск: Томский государственный университет, 2007. 440 с.
16. Олейник П.П., Пахомова Л.А. Моделирование возведения жилых домов из крупногабаритных блоков. Вестник МГСУ. 2023. Т. 18 (3). С. 463-470. doi:10.22227/1997-0935.2023.3.463-470
17. Сомов Г. Ю. Пластика архитектурной формы в массовом строительстве. М.: Стройиздат, 1986. 206 с.
18. Жданова И.В. Методы повышения качества серийной жилой застройки 70-80-х гг. XX в. // Вестник МГСУ. 2012. № 1. С. 22-26.
19. Самые быстрые стройки мира [Электронный ресурс]. URL: <https://www.cre.ru/analytics/83393> (дата обращения 11.04.2023)
20. Сочалин О. Китайские инженеры возвели многоэтажный жилой дом за 28 часов [Электронный ресурс]. URL: <https://inlnk.ru/4yMPpp> (дата обращения 11.04.2023)
21. Логвинов В. От «зеленого строительства» к природоинтегрированной архитектуре. Принцип использования форм. Часть 2 // Проект Байкал. 2018. Т. 15. № 55. С. 156-163. doi:10.7480/projectbaikal.55.1310.
22. Бадьин Г.М. Технологии строительства и реконструкции энергоэффективных зданий. СПб.: БХВ-Петербург, 2017. 464 с. ISBN 978-5-9775-3819-0
23. Кустова Д., Трухачева Г. Энергоэффективная архитектура: Особенности проектирования энергоэффективных жилых комплексов для различных социальных групп населения. Лондон: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. 64 с.
24. Ильичев В.А., Емельянов С.Г., Колчунов В.И., Бакаева Н.В. Инновационные технологии в строительстве городов. Биосферная совместимость и человеческий потенциал. М.: Издательство АСВ, 2019. 208 с.
25. Прокошев С.А., Сырчин Н.А., Турбинов А.Р., Лапин В.И., Раков Н.Д. Особенности планировочной структуры многоэтажных жилых домов с возобновляемыми источниками энергии // Инновации и инвестиции. 2018. № 3. С. 245-248.
26. Воличенко О.В. Взаимное тяготение и противоречие природных и архитектурных форм (эволюционный аспект) // Архитектон: известия вузов. 2011. № 3(35). С. 6.
27. Патент № 2790148 С1 Российская Федерация, МПК E04B 1/02. Здание из панельных элементов: № 2022121477: заявл. 08.08.2022: опубл. 14.02.2023 / В.И. Колчунов, В.С. Московцева, Н.В. Федорова, С.Ю. Савин; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Юго-Западный государственный университет».

28. Воличенко О.В. Влияние мейнстримов западного авангарда в архитектуре Центральной Азии // Архитектон: известия вузов. 2013. № 1(41). С. 29-39.
29. De Garrido L. Arquitectura para la felicidad. Madrid: Institute Monsa de Ediciones, 2013. 96 p. ISBN-13: 978-8415223931
30. Binici H., Aksogan O., Demirhan C. Mechanical, thermal and acoustical characterizations of an insulation composite made of bio-based materials // Sustainable Cities and Society. 2016. V. 20. P. 17-26.
31. Yuan J., Farnham C., Emura K. Optimum insulation thickness for building exterior walls in 32 regions of China to save energy and reduce CO2 emissions // Sustainability, 2017. V. 9 (10). P. 1-13.
32. Воличенко О.В. Методы экологического проектирования жилых зданий на примере города Бишкек // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2022. № 2(38). С. 81-97.

REFERENCES

1. Le Korbyuz'e. Arhitektura XX veka [20th century architecture]. M.: Progress, 1977. 306 p. (rus)
2. Vorob'ev V.S., Sidorenko I.L. Krupnopanel'noe domostroenie: istoricheskaya neobhodimost' i perspektivnaya tekhnologiya stroitel'noj otrasli [Large-panel housing construction: historical necessity and promising technology of the construction industry] // Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya. 2022. No. 1(60). Pp. 130-139. doi:10.52170/1815-9265_2022_60_130 (rus)
3. Kalabin A.V., Kukovyakin A. B., Massovaya zhilaya zastroyka: problemy i perspektivy [Mass residential development. Problems and prospects] // Akademicheskij vuestnik UralNIiproekt RAASN. 2017. No. 3 (34). Pp. 55-60.
4. Kazin A.S. Industrial'noe domostroenie: vchera, segodnya, zavtra [Industrial housing construction: yesterday, today, tomorrow] // Zhilishchnoe stroitel'stvo. 2018. No. 10. Pp. 22-26. (rus)
5. Nikolaev S.V. Obnovlenie zhilishchnogo fonda strany na baze krupnopanel'nogo domostroeniya [Renovation of the country's housing stock on the basis of large-panel housing construction] // Zhilishchnoe stroitel'stvo. 2018. No. 10. Pp. 17-21. (rus)
6. Pavlenko D.V., SHmelev S.E., Kuznecov D.V., Sapronov D.V., Fisenko S.S., Damrina N.V. Universal'naya sistema sbornogo domostroeniya RB-YUg ot idei do voploshcheniya na stroitel'noj ploshchadke [Universal system of prefabricated housing construction RB-South from idea to implementation at the construction site] // Stroitel'nye materialy. 2019. No. 3. Pp. 4-10. doi:10.31659/0585-430X-2019-768-3-4-10 (rus)
7. Caritova N.G., Kurbanov A. I., Kurbanova A. A. Energoeffektivnye zdaniya na osnove transformiruemykh karkasov [Energy-efficient buildings based on transformable frames] // Stroitel'stvo i rekonstrukciya. 2022. No. 6(104). Pp. 91-103. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2022-104-6-91-103> (rus)
8. Baghdadi A., Heristchian M., Kloft H. Connections placement optimization approach toward new prefabricated building systems // Engineering structures. 2021. Vol. 233. [Online]. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029620342498> (date of application: 07.05.2023).
9. Duan Y., Li G. Analysis on the Quality Problems and Preventive Measures of Prefabricated Building Construction // Journal of physics. Conferens series. 2020. Vol. 1648. Is. 3. [Online]. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1648/3/032141/meta> (date of application: 07.05.2023).
10. Niemela T., Kosonen R., Jokisalo J. Energy performance and environmental impact analysis of const-optimal renovation solutions of large panel apartment building in Finland // Sustainable cites and society. 2017. Vol. 32. Pp. 9-30.
11. Blaauwendraal J. Stringer-panel models in structural concrete: applied to D-region design / Cham: Springer, 2018. 99 p.
12. Gidion Z. Prostranstvo, vremya, arhitektura [Raum, Zeit, Architektur]. Moskva: Strojizdat., 1984. 458 p. (rus)
13. Mironov A. V. Filosofiya arhitektury: tvorchestvo Le Korbyuz'e [Philosophy of architecture: the work of Le Corbusier]. Moskva: Maks Press, 2012. 289 p. (rus)
14. Polyakov E.N., Polyakova O.P. SHvejcarskij period (1887–1917) v zhizni i tvorchestve SHarlya-Eduara ZHannere-Gris (Le Korbyuz'e) [The Swiss period (1887–1917) in the life and work of Charles-Edouard Jeanneret-Gris (Le Corbusier)] // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. 2021. T. 23. No. 3. Pp. 9–20. doi:10.31675/1607-1859-2021-23-3-9-20 (rus)
15. Ocherki teorii i istorii kultury XX veka /Otv. red. YU V Petrov [Essays on the theory and history of culture of the XX century]. Tomsk: Tomskij gosudarstvennyj universitet, 2007. 440 p. (rus)
16. Olejnik P.P., Pahomova L.A. Modelirovanie vozvedeniya zhilyh domov iz krupnogabaritnyh blokov [Modeling the construction of residential buildings from large blocks]. Vestnik MGSU. 2023. T. 18 (3). Pp. 463-470. doi:10.22227/1997-0935.2023.3.463-470 (rus)
17. Somov G. YU. 1986. Plastika arhitekturnoj formy v massovom stroitel'stve [Plasticity of architectural form in mass construction]. M.: Strojizdat, 1986. 206 p. (rus)
18. Zhdanova I.V. Metody povysheniya kachestva serijnoj zhiloy zastroyki 70-80-h gg. XX v. [Methods for improving the quality of serial residential development in the 70-80s. 20th century] // Vestnik MGSU [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2012. No. 1. Pp. 22-26. (rus)
19. Samye bystrye strojki mira [The fastest construction sites in the world]. URL: <https://www.cre.ru/analytics/83393> (data obrashcheniya 11.04.2023) (rus)

20. Sochalin O. Kitajskie inzheneri vozveli mnogoetazhnyj zhiloy dom za 28 chasov [Chinese engineers built a multi-storey residential building in 28 hours]. URL: <https://inlnk.ru/4yMPpp> (data obrashcheniya 11.04.2023) (rus)
21. Logvinov V. Ot «zelenogo stroitelstva» k prirodointegrirovannoj arhitekture. Princip ispolzovaniya form. Chast 2 [From «green building» to nature-integrated architecture. The principle of using forms. Part 2] // *Proekt Bajkal*. 2018. T. 15. No. 55. Pp. 156-163. doi:10.7480/projectbaik.55.1310. (rus)
22. Badin G.M. Tekhnologii stroitelstva i rekonstrukcii energoeffektivnyh zdaniy [Technologies of construction and reconstruction of energy efficient buildings]. SPb.: BHV-Peterburg, 2017. 464 p. (rus)
23. Kustova D., Truhacheva G. Energoeffektivnaya arhitektura: Osobennosti proektirovaniya energoeffektivnyh zhilyh kompleksov dlya razlichnyh socialnyh grupp naseleniya [Energy Efficient Architecture: Features of Designing Energy Efficient Residential Complexes for Various Social Groups of the Population]. London: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. 64 p. (rus)
24. Il'ichev V. A., Emel'yanov S.G., Kolchunov V.I., Bakaeva N.V. Innovacionnye tekhnologii v stroitelstve gorodov. Biosfernaya sovmestimost i chelovecheskij potencial [Innovative technologies in the construction of cities. Biospheric Compatibility and Human Potential]: uchebnoe posobie. M.: Izdatelstvo ASV, 2019. 208 p. (rus)
25. Prokoshev S.A., Syrchin N.A., Turbinov A.R., Lapin V.I., Rakov N.D. Osobennosti planirovochnoj struktury mnogoetazhnyh zhilyh domov s vozobnovlyaemymi istochnikami energii [Features of the planning structure of multi-storey residential buildings with renewable energy sources] // *Innovacii i investicii*. 2018. No. 3. Pp. 245-248. (rus)
26. Volichenko O.V. Vzaimnoe tyagotenie i protivorechie prirodnyh i arhitekturnykh form (evolyucionnyj aspekt) [Mutual attraction and contradiction of natural and architectural forms (evolutionary aspect)] // *Arhitekton: izvestiya vuzov*. 2011. No. 3(35). Pp. 6. (rus)
27. Patent № 2790148 C1 Rossijskaya Federaciya, MPK E04B 1/02. Zdanie iz panelnykh elementov [Panel building]: № 2022121477: zayavl. 08.08.2022: opubl. 14.02.2023 / V.I. Kolchunov, V.S. Moskovceva, N.V. Fedorova, S.YU. Savin; zayavitel Federalnoe gosudarstvennoe byudzhetnoe obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Yugo-Zapadnyj gosudarstvennyj universitet». (rus)
28. Volichenko O. V. Vliyanie mejnstrimov zapadnogo avangarda v arhitekture Centralnoj Azii [Influence of mainstream Western avant-garde in the architecture of Central Asia] // *Arhitekton: izvestiya vuzov*. 2013. No. 1(41). Pp. 29-39. (rus)
29. De Garrido L. Arquitectura para la felicidad. Madrid: Institute Monsa de Ediciones, 2013. 96 p.
30. Binici H., Aksogan O., Demirhan C. Mechanical, thermal and acoustical characterizations of an insulation composite made of bio-based materials // *Sustainable Cities and Society*. 2016. V. 20. Pp. 17-26.
31. Yuan J., Farnham C., Emura K. Optimum insulation thickness for building exterior walls in 32 regions of China to save energy and reduce CO2 emissions // *Sustainability*. 2017. V. 9 (10). Pp. 1-13.
32. Volichenko O.V. Metody ekologicheskogo proektirovaniya zhilyh zdaniy na primere goroda Bishkek [Methods of ecological design of residential buildings on the example of the city of Bishkek] // *Biosfernaya sovmestimost: chelovek, region, tekhnologii*. 2022. No. 2(38). Pp. 81-97. doi:10.21869/2311-1518-2022-38-2-81-97. (rus)

Информация об авторах:

Воличенко Ольга Владимировна

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Россия,
доктор архитектуры, профессор кафедры архитектуры, градостроительства и графики.
E-mail: wolitschenko@mail.ru

Литягина Арина Вячеславовна

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Россия,
студентка кафедры архитектуры, градостроительства и графики.
E-mail: arina.lityagina@gmail.com

Information about authors:

Volichenko Olga V.

Southwest State University, Kursk, Russia,
doctor of architecture, professor of the department of architecture, urban planning and graphics.
E-mail: wolitschenko@mail.ru

Lityagina Arina V.

Southwest State University, Kursk, Russia,
student of the department of architecture, urban planning and graphics.
E-mail: arina.lityagina@gmail.com

Л.В. МОРОЗОВА¹, А.Е. ЕНИН¹¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж, Россия

СТРУКТУРА АГЛОМЕРАЦИЙ КАК ОНТОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНОВА ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ

Аннотация. Пространственная организация и регулирование деятельности человека путем территориального планирования является весьма актуальной проблемой для многих стран мира. Вопрос оптимальной сети расселения населения всегда остро стояла перед Россией по ряду причин, некоторые из которых были учтены при проведении административно-территориальной реформы. В указанном аспекте все большую актуальность приобретает определение структурно-динамических характеристик сети расселения.

В статье рассматриваются методические вопросы исследования региональной пространственной структуры агломерации. Моделирование строит ряд уровней с пространственным распределением населения по функции, по потенциалу и возможности территории реализовать рассмотренные варианты расселения. Эта иерархичность представляет собой различные стороны взаимодействия в соответствии с выбранным параметром. Построенные слои являются удобным инструментом для определения исходных агломераций и перспективных точек роста региона, стимулирование развития которых будет способствовать оптимальному использованию территориального потенциала, а также повышению экономического и инвестиционного потенциала. Изложенный подход исследования пространственной структуры агломерации может быть востребован для обоснованного территориального, градостроительного планирования и управления, для эффективной политики регионального развития и т.д.

Ключевые слова: агломерация, территориальное планирование, расселение, градостроительные связи, моделирование.

L.V. MOROZOVA¹, A.E. ENIN¹¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

STRUCTURE OF AGGLOMERATIONS AS ONTOLOGICAL BASIS OF TERRITORIAL PLANNING

Abstract. The spatial organization and regulation of human activity through territorial planning is a very urgent problem for many countries of the world. The issue of the optimal network of population resettlement has always been acute for Russia for a number of reasons, some of which were taken into account in the course of the administrative-territorial reform. In this aspect, the determination of the structural and dynamic characteristics of the settlement network is becoming increasingly important. The article deals with methodological issues of studying the regional spatial structure of the agglomeration. Modeling builds a number of levels with the spatial distribution of the population by function, by the potential and ability of the territory to implement the considered settlement options. This hierarchy represents the different sides of the interaction in accordance with the selected parameter. The constructed layers are a convenient tool for determining the initial agglomerations and promising growth points of the region, the development of which will stimulate the optimal use of the territorial potential, as well as increase the economic and investment potential. The described approach to the study of the spatial structure of the agglomeration can be in demand for sound territorial and urban planning and management, for an effective policy of regional development, etc.

Keywords: agglomeration, territorial planning, settlement, urban relations, modeling.

Введение

Агломерационная система расселения населения в силу своего исторического развития является современной составляющей развития территорий. В ней не только представлены все особенности прежних общественно-экономических формаций, но и система постоянно находится в противоречии с более новыми субъектами общественного производства, которые сформировались в последнее время. Ускорение темпов и бурное развитие процесса урбанизации в индустриальную эпоху было вызвано ростом производств в городах и вытекающей из этого необходимостью увеличения их трудового потенциала. В результате концентрация городского населения в крупнейших мегаполисах мира в XX веке достигла критического уровня [1]. Это обстоятельство обусловило существенное повышение требований к функционированию городской инфраструктуры, систем жизнеобеспечения горожан, социальной защиты и т. д. Однако начало постиндустриального развития человеческой цивилизации инициировало определенную децентрализацию производственной индустрии и дальнейшее перемещение с внутригородских территорий в пригороды, и даже в сельскую местность. Таким образом, сельская местность получила более высокий приоритет развития по сравнению с традиционной городской территорией, что было обусловлено стремительным развитием сельского рынка труда за счет спроса на сельское хозяйство. Все это коренным образом изменило существующие требования к системе расселения населения и средствам связи. В результате территориальное планирование агломераций получило наивысший приоритет.

Все процессы и явления, описанные выше, актуальны для России. Существующая структура расселения была реализована еще в советское время, и она устарела, не способна обеспечить гибкость пространственной организации. Из-за этого районы, принадлежавшие к моноцентрическому классу, стали терять свою рабочую силу. Дисбаланс между областным центром и всей прочей прилегающей территорией все больше нарастал, что постоянно искажает пространственную организацию и усложняет все составляющие регионального развития. Основное препятствие в формировании простых методов для изучения функционирования городских агломераций связано с отсутствием точного и формализованного понятия городской агломерации. Большинство исследователей сходятся во мнении, что определение городской агломерации должно следовать описанию территориальной структуры и входящих в ее состав элементов, транспортных особенностей использования территорий. Таким образом, очевидна необходимость новых подходов к территориальному планированию как инструменту, способному обеспечить оптимальный баланс между региональным центром и его периферией (дистальными частями) [2].

В отечественной и зарубежной литературе проблема взаимодействия территорий внутри агломерационных образований занимает значительное место. В дискуссии по определению понятия «агломерация» и ее критериев участвовали такие ученые как М.М. Габрель, О.А. Денисенко, Г.М. Лаппо, М.А. Хауке, Б.С. и другие. Изучению проблем по формированию и развитию агломераций, их градостроительному, территориальному планированию посвящены научные труды Ю.М. Белоконь, М.М. Габрелей, М.М. Демина, в которых освещены преимущественно градостроительные, экологические и земельные аспекты взаимодействия демоэкосистем в сфере градостроительства. Теоретические и практические вопросы формирования и функционирования данных территорий отражены в трудах В.Л. Голубевой, А.Г. Махровой, Г.М. Лаппо, Е.Н. Перцика, В.В. Хохловой и т.д.

Несмотря на большое количество работ, посвященных вопросам формирования и функционирования, развития агломераций, многие вопросы остаются недостаточно изученными и требуют дальнейших исследований. В поле зрения специалистов разных научных направлений рассматриваются вопросы определения сущности понятия «агломерация», ограниченности роста территорий, делимитация [3]. Эффективное использование территорий пригородных зон – интересная, важная и одновременно очень сложная проблема. Но достаточно внимательно не рассмотрен вопрос сущности

территориального планирования и целостного развития отдельных населенных пунктов. Онтологичность заключается в структурировании и развитии всего агломерационного образования, что влияет на каждый объект данной системы. Возникает задача сформулировать и аргументировать связь агломерированных населенных пунктов в зоне влияния крупного города, позволяющих более рационально планировать развитие и использовать территории. Рабочая гипотеза исследования состоит в том, что использование современных подходов позволит выявить агломерированные населенные пункты, способствовать стратегическому пространственному планированию, пониманию долгосрочного социального, экологического, экономического, развитию.

Дискуссия

Категория «городская агломерация» с некоторых пор официально использовалась в предметной области исследования развития территорий. У этой категории пока довольно много определений. Чаще всего имеется в виду крупный город (как центр агломерации) с его пригородами и со всеми ближайшими поселками. Все эти населенные пункты, как правило, связаны между собой различными связями, которые все вместе в конечном счете образуют новый субъект. Такое территориальное компактное образование поселений можно рассматривать как пространственно-системное образование со всеми соответствующими свойствами относящимися к демозкосистеме. Агломерации как пространственные структуры различного иерархического уровня являются распространенным способом территориального устройства. Учитывая это, можно предложить следующую иерархию расселения населения (таблица 1) [4, 5].

Таблица 1 – Агломерационная иерархия расселения населения

Уровни иерархии		Наименование градостроительных объектов исследования и проектирования. Вид проектной документации
Управления	Функциональной целостности	
Региональный	5. Административная область	Территориальная организация производительных сил административной области с учетом основной – системообразующей роли сельскохозяйственного производства. Схема районной планировки области
	4. Административный район	Территориальная организация производственных сил административных районов, аграрно-промышленных комплексов в структуре административной области. Проект районной планировки
Местный	3. Община	Территориальное планирование селитебной и производственной зон общины – взаимосвязанных по производственному, бытовому или другим признакам родовых поселений. Генеральный план, проект детальной планировки (ПДП)
	2. Родовое поселение	Родовое поселения, сельские населенные пункты. Генеральный план поселения, населенного пункта
	1. Родовая усадьба	Родовая усадьба – земельный участок, находящиеся на нем постройки и т.п. План родовой усадьбы

Таким образом, региональная система расселения представляет собой мозаику всех пяти уровней функциональной целостности, которые относятся к местному и региональному управлению системой, частично или полностью перекрывающих друг друга в пространственном отношении [6]. То есть локальные агломерации являются элементарными,

при этом можно выделить различные иерархические уровни пространственной структуры расселения населения - от административной области до родовой усадьбы. Если обобщить, то эту структуру можно представить на любой территории вектором, составляющими которого являются кластеры агломераций разного уровня. Поэтому выделение агломераций с дальнейшим исследованием является актуальным вопросом оптимизации системы (территориального управления и планирования), это обуславливает важность и необходимость ее структурно-системного анализа [7].

Вопросы агломерации рассматривались многими известными исследователями. В частности, Кс. Копполани в свое время предложил рассматривать городскую агломерацию как систему городов и деревень, связанных между собой функциональными отношениями, что выявляет определенную тенденцию объединения в одну общую городскую территорию. По мнению П. Макканна, наличие, размещение и перераспределение рабочей силы является определяющим фактором развития агломерации [8].

В работах Г.И. Лаврика рассматривались вопросы территориального деления за счет выявления градостроительных объектов по уровням, относящимся к системной иерархии [9]. Согласно с авторами в том, что агломерация — это процесс эволюционного развития форм расселения в современном мире, приводящий к концентрации населения вокруг одного или нескольких крупных поселений с последующим усложнением их специфических связей, но для понимания структуры данного образования важно базироваться на онтологии территориального планирования.

Польский исследователь Зузиак [10] подчеркивает, что развитие агломерации и ее разрастание — это форма расселения, характеризующаяся анаморфным характером городской ткани, размыванием идентичности пространства, высоким уровнем землепользования, высоким потреблением энергии и увеличением социальных издержек проживания (транспорт и инфраструктура). Проблемы, связанные с этим явлением, затрагивают практически все сферы жизни: социальные, инфраструктурные, экономические, правовые, экологические [11].

По мнению В.К. Попова «агломерация – это территория, которая объединяет в себе отдельные населенные пункты, имея экономические, пространственные, трудовые, рекреационные связи». М.М. Габрель в своей монографии дает следующее определение: «агломерация – ядро и окружающая его территория, создающая с ним функционально-пространственную целостность». По мнению автора отношения между территориями включенными в городскую агломерацию раскрываются в системе следующих связей: производственные возникают по линии кооперации предприятий города-центра и близлежащих населённых пунктов; трудовые связи с перемещениями населения к местам приложения культурно-бытовых нужд; зоны нужд социальной сферы; сельскохозяйственные возникают в результате продовольственного обеспечения города-центра; инфраструктурные связанные с размещением объектов инфраструктуры города в прилегающих территориях.

Б.Х. Балтаджи предлагает принять чисто экономические критерии исследования развития агломераций (общий уровень народного хозяйства, уровень заработной платы, производственная специализация, существующая транспортная инфраструктура) [12]. По мнению Р.В. Бабуна, «для России наибольший интерес представляет межмуниципальная хозяйственная кооперация в рамках взаимодействия соседних городов между собой (агломерации), кооперация городских округов с прилегающими муниципальными районами, формирование и совместная эксплуатация территорий пригородных зон» [13]. В.Л. Глазычев считает, что агломерация — это «высшая форма межмуниципального сотрудничества, его финальное оформление, когда повседневные связи поселений разного ранга уже достаточно крепки» [14]. На основе изложенного можно сформировать определение, городская агломерация — территория, включающая в себя один или несколько центров, представляющих собой крупные городские поселения и прилегающие периферийные зоны, которые включают в себя еще другие малые населенные пункты, более половины

трудоспособного населения которых ежедневно совершает поездки в центр городской агломерации [15].

Сущностную основу агломераций как системных образований ранее не рассматривали. Как пишет Шохнех А.В. «онтология пространственного развития территорий, как систем, это учение о сущности их бытия определяющееся категоричным отказом от всеобщей универсальности, в силу турбулентности событий и явлений, действующих на субъекты, объекты, предметы», так и в градостроительном планировании городская единица не может рассматриваться обособленно, а только в системе и с учетом влияния на нее многих факторов, поэтому перспектива в саморазвивающихся системах [16]. Саморазвивающаяся агломерация — это способность городской системы обеспечивать социально-ориентированную устойчивость и функциональное развитие мегаполиса в целом и его отдельных компонентов [17]. Посредством имеющегося внутреннего потенциала территории, а также на основе совместных действий активных промышленных, государственных и социальных структур, локализованных в целостное саморазвитие.

Модели и методы

Методологической основой исследования являются принципы и положения синергетического подхода, который предполагает, прежде всего, изучение внутреннего взаимодействия в системе, внутренних ресурсов и механизмов, определяющих эволюционный потенциал системы. Синергетический подход имеет важное значение в исследованиях градостроительных систем, потому что это принуждает принимать во внимание всевозможное количество активных факторов и процессов, чтобы охватить функциональную среду, в которой изучаемые процессы и явления встречаются настолько широко, насколько возможно. Поскольку социальные и географические системы неоднородны, сложны и сочетают в себе различные элементы и подсистемы, полнота их изучения достигается за счет рассмотрения внутренних отношений с междисциплинарных позиций, т. е. с разных точек зрения, что отвечает требованиям синергетического подхода. Позволяет получить целостную и неизменную картину взаимодействия элементов и подсистем градостроительной системы.

Еще одна особенность синергетического подхода заключается в следующем. Развитие системы рассматривается как цепочка последовательных фазовых переходов при бифуркации точки. Условия в этих точках меняются так, что система, приспосабливаясь, вынуждена перестраивать свою структуру и функции, т. е. изменить траекторию своего развития. Поэтому синергетический подход совместим с изучением сложных и неоднозначных отношений между различными подсистемами.

Также для обоснования утверждения, что онтология территориального планирования лежит в структурной основе и развитии городских агломераций были использованы следующие методы: индукции и дедукции – логическое осмысление и обработка имеющихся данных и сведений об особенностях существующих исследований; метод аналогии – для изучения отдельных аспектов развития и структуризации урбанизации и формирования агломераций; методы анализа и синтеза – для исследования работ, посвященных урбанизации и агломерациям, формирование целостного мнения о различных аспектах такого рода исследований; методы систематизации позволяют выявить общие и отличные направления в исследованиях специалистов разных отраслей по вопросу урбанизации, формирования и развития агломераций.

Результаты исследования и их анализ

Задача пространственного анализа очень часто сводится к изучению пространственно-временных отношений градостроительных объектов. Это необходимо, для оптимизации пространственной структуры различных подсистем, организовать системы социально-географического мониторинга, решить задачи улучшения инфраструктурных характеристик социальной и географических систем, изучать транспортно-логистические проблемы,

оптимизировать пространственную структуру размещения промышленных предприятий и учреждений, изучать миграционные процессы.

Крайне важно внедрить новые инструменты исследования и методы понимания специфики объекта изучения, его синергетический характер. Это комплексное исследование, учитывая параметры пространства и времени может способствовать ретроспективному анализу, определить текущее состояние и спрогнозировать перспективы развития.

Эффективными методами изучения агломерационных образований являются анализ пространственного взаимодействия, а именно моделирование на основе воздействия интегральной функции на систему. Данный способ отличается сочетанием методов градостроительного моделирования и аппроксимация полей географической оболочки. В структуру вектора геопропространственных данных входят три компонента: координаты X и Y на горизонтальной плоскости, а также значение параметра Z, а именно «высота» точки.

Специфическая особенность любой градостроительной единицы (при изучении систем расселения) – радиус зоны влияния, а именно уровень его взаимодействия с другими объектами и удаленность от населенного пункта. Расстояние изображает прекращение воздействия поселения на соседние районы и потеря "центрального места". Содержание этого понятия можно определить как радиус зоны, где этот объект воздействует на любую составляющую пространственно-градостроительного процесса. Взаимодействие социальных и географических объектов зависит от радиуса области влияния.

Другой компонент – атрибутивный – определяет интенсивность взаимодействия, а это функция числового значения параметра (мощности) объекта Z. При определении радиуса влияния площади населенного пункта, мы определяем ее как пропорциональную мощность объекта Z. Учитывая это, наименее мощный объект должен иметь наименьший радиус влияния R₀, который можно назвать основным. Напротив, радиус влияния всех других объектов может быть определен как производная функция от радиуса основания. В статье предложена следующая зависимость, это разница градостроительных объектов по величине радиуса влияния (1):

$$R_i = R_0 + k * \ln(Z_i/Z_{\min}). \quad (1)$$

где R_i — радиус влияния i-го человеко-географического объекта;

R₀ – базовый радиус воздействия;

Z_i, Z_{min} – значение параметра i-го и базовые объекты соответственно;

k - масштабный коэффициент.

Интенсивность воздействия агломерационного объекта в зоне его влияния снижается от центра к периферии. Это можно определить обратно пропорционально расстоянию до определенной степени. Целесообразно использовать нелинейный инвариант в виде следующей зависимости:

$$\text{при } L \geq R \Delta = 0; \text{ при } L < R. \quad (2)$$

где Δ – функция влияния градостроительного объекта;

L - текущее расстояние до центра зоны влияния градостроительного объекта;

R — радиус его влияния;

n - показатель степени, определенный произвольно.

Следующая формула определяет потенциал влияния агломерационного объекта на зону воздействия с учетом заданной зависимости (3):

$$p = Z * \Delta. \quad (3)$$

где Z – количественный параметр (мощность) агломерационного образования (в центре зоны влияния).

Целесообразно учитывать фактор удаленности агломерационного элемента с точки зрения пространственного анализа. Тогда возможность воздействия можно представить как функцию градостроительного объекта. Если пользователь находится в пересечение сфер влияния нескольких социально-географических объектов (фактически имеется в виду их взаимодействие, это конкуренция в данном случае), у него более широкий выбор.

Таким образом, в исследовании воспроизведена модель поля интегральной функции влияния, которая может объективно отражать все особенности воздействия и пространственного взаимодействия географических объектов, расположенные в пределах изучаемой территории.

Формула (4) осуществляет расчет интегральной функции влияния с учетом (2):

$$pF = \sum_{i=1}^n m_i (1 - L_i/R_i) \quad (4)$$

где F — интегральная функция влияния при заданной точка в агломерации;

L_i и R_i — расстояние и радиус воздействия социально-географического объекта;

m - количество градостроительных объектов, которые влияют на данную точку.

Соответствующий интегральный потенциал влияния можно определить либо путем суммирования потенциалов влияния взаимодействующих социально-географических объектов или в результате расчета средневзвешенного значений их функции влияния.

Таким образом, предметом пространственного анализа взаимодействия агломерационных объектов есть интегральные функции влияния поверхности. В то же время каждая из этих поверхности содержит свою информацию, которая в совокупности более полно характеризует пространственный характер взаимодействия социально-географических объектов. Характерной особенностью этой техники является возможность изменение радиуса влияния объектов: степень генерализации поверхности увеличивается с ростом увеличение этого параметра, т.е. его фоновая составляющая увеличивается, а локальные особенности (аномалии) нивелируется. Выбор радиуса влияния определяет уровень обобщения полученных результатов влияния ядер расселения на окружающую их территорию и населенные пункты.

Метод моделирования был апробирован при изучении региональные системы расселения агломерационного образования. Метод позволил установить влияние организационных ячеек расселения на окружающие населенные пункты, рассчитать переселенческий потенциал местных систем переселения и выявить агломерационные образования, которые только формируются или обладают ресурсами для этого), провести типирование территории Воронежской агломерации. Также данный метод моделирования, предназначен для изучения пространственных особенностей развития территории.

В качестве примера представлены интегральные функции влияния поверхности средневзвешенный потенциал переселения Воронежской агломерации по основным радиусам влияния $R_0 = 2, 10, 16$ и 24 км (рисунок 1), исходя из необходимости принимать исторически сложившиеся особенности взаимодействие поселений в системе расселения агломерации. Изменения в радиусе воздействия объекта позволяет отслеживать формирование отношений между населенными пунктами с увеличением сил взаимодействия. Он характеризует реальную динамику процессов формирования агломераций, изменения их размеров и конфигурации, пространственных отношений и пересечений. Он позволяет установить этиологические особенности изученных взаимосвязей.

Воронежскую агломерацию можно охарактеризовать гипертрофированным развитием центра и консервацией центрально-периферийных моделей развития. В структуру агломерации включены 2 города, 10 муниципальных районных образования включающих в себя 116 населенных пунктов, что лишь подчеркивает как своевременность, так и необходимость изучения данного вопроса. Смоделирована серия поверхностей для всех населенных пунктов в пределах Воронежской агломерации. Эти поверхности отображают пространственное распределение расселения населения по самой территории, по потенциалу расселения населения (P) и по средневзвешенному потенциалу расселения населения (P_w). Эти поверхности представляют различные стороны расчетных взаимодействий в соответствии с выбранным параметром. На схеме ниже (см. рисунок 1) отражены наиболее значимые поверхности, изображен радиус влияния населенного пункта на близлежащие территории, а также пересечения ретроспективных слоев.

Административные центры, развитые поселки на модели с радиусом влияния 10 км, в радиусе 20 км проявляются агломерационные образования с поселками городского типа в качестве центров. Модели радиусом от 20 км определяют основные районы полюса роста, а именно крупнейшие города со значительным поселенческим и экономическим потенциалом. Интегральные поверхности с радиусом 30 км позволяют проследить формирование агломерационных осей расселения, которые связаны с исторической сетью переселенческих и транспортных путей, пересекающих площадь территории. Легко проследить зарождение агломерации микроуровня/мезоуровня при $R_0=10-12$ км, а зарождение агломерации макроуровня – при $R_0=19-22$ км.

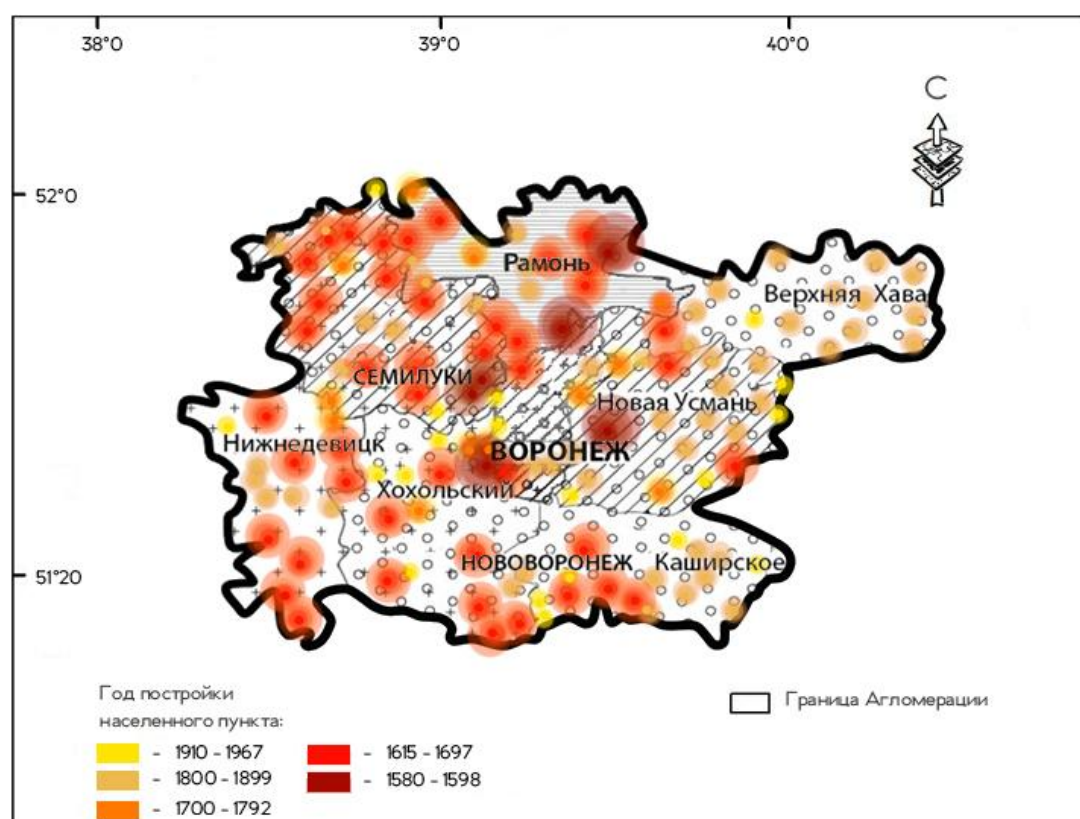


Рисунок 1- Смоделированные поверхности с базовым импакт-радиусом $R_0=2$ и 10 км воздействия по средневзвешенному потенциалу расселения населения (P)

Слой ретроспективного среза, относящиеся к начальным этапам формирования агломерации мегауровня, отличаются достаточно большими значениями R_0 . Построенная схема может быть принята как эффективный инструмент для определения исходных агломераций и перспективных точек роста, стимулирование развития которых будет способствовать оптимальному использованию территориального потенциала, при этом увеличение экономического, социального и инвестиционного ресурса. Выделение точек роста территории способствует ускорению развития агломерации в целом. Эти процессы могут поддерживаться как центральными, так и региональными властями, поскольку существует устойчивая перспектива дальнейшего развития. Точки роста способствует снижению внешней миграции, а также повышению инвестиционной привлекательности региона. Кроме того, постепенное освоение перспективных территорий внутри агломерации сильно способствует уменьшению территориального перекоса по отношению к региональному социально-экономическому росту.

Поэтому существенным аспектом современной градостроительной методологии является сравнение и определение корреляции динамики социально-географические системы

(системы расселения, агломерации и др.). Основным инструментом является структурно-системный анализ агломерационных систем, выделение зон разной степени кооперации по статистическим критериям.

Выводы

Ключевые особенности современной структуры сети расселения агломераций определены длительной историей ее формирования. Возникновение поселенческой агломерации представляет собой сложный многостадийный процесс, обусловленный многими факторами. Этот процесс следует рассматривать как последовательное осуществление функций развития и самоорганизации географического пространства. Её реализация привела к созданию обособленных одиночных поселений, создавших исходную основу для дальнейшего расселения. После были последовательно реализованы несколько других функций географического пространства (функция расстояния, функция градиента, функция переноса, функция взаимодействия). Необходимо подчеркнуть, что реализации этих функций препятствовало немало мешающих факторов, как естественных, так и искусственных (например, государственные границы). Крупнейшие и наиболее быстро развивающиеся поселения постепенно становились общепризнанными лидерами и центрами агломерации на взаимосвязях в отношении развития промышленной и деловой специализации, роста торговли и культурного развития. Агломерации инициировались, как только вновь возникшие поселения пытались вписаться в уже существующую пространственную инфраструктуру на данной территории. Дальнейшие изменения первоначальных агломераций определялись демографическими процессами «населения - депопуляции» (увеличение/уменьшение числа жителей), а также миграционными процессами в порядке непрерывной территориальной самоорганизации.

Оптимальное использование интегрированного территориального потенциала на сегодняшний день является одной из ключевых задач в управлении региональным планированием. Эта задача требует комплексного исследования пространственной структуры агломераций, а также их эволюционного потенциала для выявления возможных перекосов развития и оптимизации региональной производственной пространственной структуры. Выделение указанной пространственной структуры и последующая оценка агломерационных взаимодействий - от локального уровня до мега-уровня - является первым шагом решения указанной ключевой задачи.

Проблема оптимальной сети расселения всегда остро стояла перед Россией по ряду причин, некоторые из которых были учтены в ходе административно-территориальной реформы, проведенной в нашей стране. Таким образом, выполнение исследований по расселению населения региона можно считать чрезвычайно актуальным вопросом. Изложенный подход может быть востребован для обоснованного территориального планирования и управления, для эффективной политики регионального планирования и т. д. Можно сделать следующие выводы: внутри региона прослеживается поляризующее воздействие, которое касается не только крупных агломераций, но и региональных, только формирующихся образований; модель базового радиуса 20 км демонстрирует возникновение некоторой вытянутой зоны воздействия организационных ядер расселения населения и значительные искажения в соответствующем региональном планировании; явление концентрации населения прослеживается в местах, которые можно рассматривать как упомянутые выше «точки роста»; сельские территории с наименьшим средневзвешенным потенциалом расселения населения могут быть признаны наиболее перспективными для опережающего развития в рамках градостроительного планирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калашникова О.Е. Управление потенциалом агломерации на примере Ростовской агломерации // Экономический потенциал. 2017. № 1. С. 12-14.
2. Хуснутдинова С.Р. Изменения функционально-территориальной структуры городской агломерации на рубеже XX-XXI веков (на примере Казанской агломерации) // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. 2019. № 3(35). С. 68-78.
3. Pujiati A., Bowo P., Nihayah D. The Urban Sustainability Index in Urban Agglomeration. JEJAK: Jurnal Ekonomi. 2018. No. 7. Pp. 32.
4. Нежданов В.А. Актуализация процесса развития Обнинской агломерации (северо-восточной агломерации Калужской области) // Вестник образовательного консорциума Среднерусский университет. Серия: Экономика и управление. 2020. № 16. С. 19-20.
5. Яроцкая Е.В. Влияние городской агломерации на устойчивость развития сельских территорий в аграрном регионе (на примере Краснодарского края) // Краснодар : Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина. 2022. 193 с.
6. Zuziak Z.K. Strefa podmiejska w architekturze miasta w stron ę nowej architektowniki regionu miejskiego. Biblioteka Urbanisty: Warszawa, Poland. 2005. Vol. 7. No. 3. Pp. 17–32.
7. Авдеева Т.Т. Проблемы интеграции сельских территорий в городские агломерации (на примере Краснодарской агломерации) // Modern Economy Success. 2020. № 4. С. 240-246.
8. Моисеенко А.А. Формирование инновационной инфраструктуры городской агломерации (на примере Ростовской агломерации) // Наука и образование: хозяйство и экономика; предпринимательство; право и управление. 2014. № 6(49). С. 37-42.
9. Ворошилов Н.В. Подходы к оценке развитости агломераций на территории России // Проблемы развития территории. 2019. № 4 (102). С. 40-54.
10. Niemets K, Niemets L. Prostorovyi analiz u suspilnii heohrafiic novi pidkhody, metody. Spatial analysis in social geography: new approaches, methods, models. 2013. No. 13. Pp. 228.
11. Niemets K., Schida K., Niemets L. Bahatovymymi analiz u suspilni heohrafiic (netradytsaini metody). Multidimensional analysis in social geography (non-traditional methods). 2016. No. 4. Pp. 120.
12. Дончевский Г.Н., Игнатъева А.В. Актуальные проблемы развития городских агломераций в Российской Федерации // "Спутник+". 2014. С. 8-15.
13. Демьяненко А.Н. Городские агломерации и стратегия пространственного развития: взгляд географа // Регионалистика. 2020. № 3. С. 43-52.
14. Енин А.Е. Ретроспектива формирования Воронежской агломерации // Гуманитарные науки в XXI веке: научный Интернет-журнал. 2022. № 19. С. 65-75.
15. Колясников В.А. Развитие понятия «городская агломерация» // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2015. №2. С. 13.
16. Combes P.P., Gobillon L. The Empirics of Agglomeration Economies. Handbook of Urban and Regional Economic. 2015. No. 7. Pp. 247-348.
17. Polge E., Torre A. Territorial governance and proximity dynamics. The case of twopublic policy arrangements in the Brazilian Amazon. Papers in Regional Science. 2017. No. 6. Pp. 47-48.

REFERENCES

1. Kalashnikova O.E. Upravlenie potencialom aglomeracii na primere Rostovskoj aglomeracii [Управление потенциалом агломерации на территории Ростовской агломерации] // Ekonomicheskij potencial. 2017.No. 1. Pp. 12-14. (rus)
2. Husnutdinova S.R. Izmeneniya funkcional'no-territorial'noj struktury gorodskoj aglomeracii na rubezhe XX-XXI vekov (na primere Kazanskoj aglomeracii) [Changes in the functional-territorial structure of the urban agglomeration at the turn of the 20th-21st centuries (on the example of the Kazan agglomeration)] // Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Prikladnaya ekologiya. Urbanistika. 2019. No. 3(35). Pp. 68-78. (rus)
3. Pujiati A., Bowo P., Nihayah D. The Urban Sustainability Index in Urban Agglomeration. JEJAK: Jurnal Ekonomi. 2018. No. 7. Pp. 32.
4. Nezhdanov V.A. Aktualizaciya processa razvitiya Obninskoj aglomeracii (severo-vostochnoj aglomeracii Kaluzhskoj oblasti) [Actualization of the development process of the Obninsk agglomeration (north-eastern agglomeration of the Kaluga region)] // Vestnik obrazovatel'nogo konsorciuma Srednerusskij universitet. Seriya: Ekonomika i upravlenie. 2020. No. 16. Pp. 19-20. (rus)
5. Yarockaya E.V. Influence of the urban agglomeration on the sustainability of the development of rural areas in the agricultural region (on the example of the Krasnodar Territory) [Vliyanie gorodskoj aglomeracii na

- ustojchivost' razvitiya sel'skih territorij v agrarnom regione (na primere Krasnodarskogo kraja)]. Krasnodar: Kubanskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet imeni I.T. Trubilina. 2022. 193 p. (rus)
6. Zuziak Z.K. Strefa podmiejska w architekturze miasta w stronę nowej architektoniki regionu miejskiego. Biblioteka Urbanisty: Warszawa, Poland. 2005. Vol. 7. No. 3. Pp. 17–32.
7. Avdeeva T.T. Problemy integracii sel'skih territorij v gorodskie aglomeracii (na primere Krasnodarskoj aglomeracii) [Problems of integration of rural areas into urban agglomerations (on the example of the Krasnodar agglomeration)] // Modern Economy Success. 2020. No. 4. Pp. 240-246. (rus)
8. Moiseenko A.A. Formirovanie innovacionnoj infrastruktury gorodskoj aglomeracii (na primere Rostovskoj aglomeracii) [Formation of the innovative infrastructure of the urban agglomeration (on the example of the Rostov agglomeration)] // Nauka i obrazovanie: hozyajstvo i ekonomika; predprinimatel'stvo; pravo i upravlenie. 2014. No. 6(49). Pp. 37-42. (rus)
9. Voroshilov N.V. Podhody k ocenke razvitosti aglomeracij na territorii Rossii [Approaches to assessing the development of agglomerations in Russia] // Problemy razvitiya territorii. 2019. No. 4 (102). Pp. 40-54. (rus)
10. Niemets K, Niemets L. Prostorovyi analiz u suspilnij heohrafic novi pidkhody, metody. Spatial analysis in social geography: new approaches, methods, models. 2013. No. 13. Pp. 228.
11. Niemets K., Schida K., Niemets L. Bahatovymymi analiz u suspilni heohrafii (netradytsaini metody). Multidimensional analysis in social geography (non-traditional methods). 2016. No. 4. Pp. 120.
12. Donchevskij G.N., Ignat'eva A.V. Aktual'nye problemy razvitiya gorodskih aglomeracij v Rossijskoj Federacii [Actual problems of development of urban agglomerations in the Russian Federation] // "Sputnik+". 2014. Pp. 8-15. (rus)
13. Dem'yanenko A.N. Gorodskie aglomeracii i strategiya prostranstvennogo razvitiya: vzglyad geografa [Urban agglomerations and spatial development strategy: a geographer's view] // Regionalistika. 2020. No. 3. Pp. 43-52. (rus)
14. Enin A.E. Retrospektiva formirovaniya Voronezhskoj aglomeracii [Retrospective of the formation of the Voronezh agglomeration] // Gumanitarnye nauki v XXI veke: nauchnyj Internet-zhurnal. 2022. No. 19. Pp. 65-75. (rus)
15. Kolyasnikov V.A. Razvitie ponyatiya «gorodskaya aglomeraciya» [Development of the concept of "urban agglomeration"] // Akademicheskij vestnik UralNIIproekt RAASN. 2015. No. 2. Pp. 13. (rus)
16. Combes P.P., Gobillon L. The Empirics of Agglomeration Economies. Handbook of Urban and Regional Economic. 2015. No. 7. Pp. 247-348.
17. Polge E., Torre A. Territorial governance and proximity dynamics. The case of twopublic policy arrangements in the Brazilian Amazon. Papers in Regional Science. 2017. No. 6. Pp. 47-48.

Информация об авторах:

Морозова Любовь Владимировна

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж, Россия,
аспирантка кафедры основ проектирования и архитектурной графики.
E-mail: morozvalyubov@gmail.com

Енин Александр Егорович

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж, Россия,
кандидат архитектуры, профессор, декан факультета архитектуры и градостроительства.
E-mail: a_yenin@mail.ru

Information about authors:

Morozova Lyubov V.

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia,
postgraduate student of the department of fundamentals of design and architectural graphics.
E-mail: morozvalyubov@gmail.com

Enin Alexander E.

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia,
candidate of architecture, professor, dean of the faculty of architecture and urban planning.
E-mail: a_yenin@mail.ru

С.Г. ШЕИНА¹, А.А. ФЕДОРОВСКАЯ¹¹ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», г. Ростов-на-Дону, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ НА ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ ТЕРРИТОРИИ СУБЪЕКТА РФ

Аннотация. В статье рассматривается процесс и значение многокритериальной оценки территории для обеспечения ее устойчивого развития, а также выбора возобновляемых источников энергии (далее – ВИЭ) и места их размещения с точки зрения сохранения экологического потенциала ландшафта территории субъекта РФ. Ключевой особенностью является определение влияния ВИЭ на экологический потенциал территории ввиду многокомпонентности составляющих для оценки. Известно, что одно из преимуществ возобновляемой энергетики – это уменьшение негативного воздействия на окружающую среду, однако разные виды ВИЭ оказывают различное влияние на природную систему территории и прямое, и косвенное. Комплексная оценка территории субъекта РФ предлагается как инструмент, позволяющий интегрировать различные виды информации о состоянии потенциала территории для применения ВИЭ, экологического ландшафта, антропогенной нагрузки и прочих данных в единую систему для качественного пространственного анализа региональной системы.

Ключевые слова: территориальное планирование, градостроительство, устойчивое развитие территорий, комплексная оценка территории, возобновляемые источники энергии, экологический ландшафт, экологический потенциал.

S.G. SHEINA¹, A.A. FEDOROVSKAYA¹¹Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

STUDY FOR THE IMPACT OF RENEWABLE ENERGY SOURCES ON THE ENVIRONMENTAL POTENTIAL OF THE TERRITORY OF THE RUSSIAN FEDERAL SUBJECT

Abstract. The article discusses the process and significance of a multi-criteria assessment of the territory to ensure its sustainable development, as well as the choice of renewable energy sources (hereinafter referred to as RES) and their location in terms of preserving the ecological potential of the landscape of the territory of the subject of the Russian Federation. The key feature is the determination of the impact of RES on the ecological potential of the territory due to the multicomponent components for evaluation. It is known that one of the advantages of renewable energy is to reduce the negative impact on the environment, however, different types of renewable energy have different effects on the natural system of the territory, both direct and indirect. A comprehensive assessment of the territory of a constituent entity of the Russian Federation is proposed as a tool that allows integrating various types of information on the state of the potential of the territory for the use of renewable energy sources, the ecological landscape, anthropogenic load and other data into a single system for a qualitative spatial analysis of the regional system.

Keywords: territorial planning, urban planning, sustainable development of territories, integrated assessment of the territory, renewable energy sources, ecological landscape, ecological potential.

Введение

Стратегией пространственного развития территории Российской Федерации (далее – Стратегия РФ) на период до 2025 года [1] на региональном уровне предполагается решение проблем инфраструктурных ограничений федерального значения, а также обеспечения доступности и качества магистральной инфраструктуры (транспортной, энергетической и пр.). Данные проблемы становится возможным решить за счет развития распределенной генерации, в том числе на основе возобновляемых источников энергии (далее – ВИЭ) для труднодоступных мест, обладающих значительным природно-ресурсным потенциалом. Наряду с этим сокращение уровня межрегиональной дифференциации в социально-экономическом развитии субъектов РФ и обеспечение устойчивого развития территорий предполагается за счет:

- обеспечения комфортности городской среды;
- развития системы транспортной инфраструктуры;
- сохранения экологического потенциала ландшафта, развития зеленых территорий;
- повышения сельскохозяйственной пригодности земель, восстановления земель лесного фонда и сохранения водных ресурсов.

Сбалансированное пространственное развитие территории субъекта РФ обеспечивается за счет планирования по направлениям Стратегии РФ и может быть обеспечено только при внедрении системного подхода к анализу существующей и прогнозированию будущей ситуации (рисунок 1).



Рисунок 1 – Сбалансированное пространственное развитие территории субъекта РФ

Одна из 17 целей устойчивого развития ООН - обеспечение всеобщего доступа к недорогим, надежным, устойчивым и современным источникам энергии [10]. Осуществление данной цели возможно за счет увеличения доли ВИЭ.

Причинами необходимости использования системного и интегрированного подходов при сбалансированном пространственном развитии территории субъекта РФ являются:

- разнохарактерность компонентов обеспечения устойчивого территориального развития;
- многокритериальность территориальной системы;
- взаимное влияние всех подсистем внутри территориальной системы – субъект РФ.

Особое внимание следует уделить последнему пункту в части вопросов, связанных с сохранением чистой окружающей среды и развитию энергетической инфраструктуры, в частности использованию ВИЭ. С одной стороны, улучшению экологической ситуации на территории субъекта РФ способствуют развитие зеленых технологий, возобновляемой энергетики и уменьшение воздействия хозяйственной деятельности путем внедрения энергоэффективных технологий [2]. С другой стороны, ВИЭ-оборудование при строительстве, производстве, эксплуатации и утилизации, а также в технологической цепочке применения «зеленых» энергоносителей, оказывает прямое и косвенное влияние на экологический потенциал ландшафта территории [3].

Экологический потенциал – совокупность климатических условий и природных ресурсов, доступных для населения, позволяющих без ущерба отдавать нужную для человеческой деятельности продукцию и производить полезную для него работу. Объективно возникает потребность в сохранении функционирования экосистемы, обеспечения рационального природопользования в интересах общества.

Анализ выбросов и воздействия ВИЭ на окружающую среду приведено в таблице 1.

Таблица 1 – Удельные выбросы загрязнителей от ВИЭ при получении единицы энергии, г/(кВт·ч) [4]

Вид возобновляемого источника энергии	Загрязнитель окружающей среды		
	CO ₂	SO ₂	NO _x
Биотопливо	15 – 18	0,06 – 0,08	0,35 – 0,51
Малые гидроэлектростанции	9	0,03	0,07
Традиционные гидроэлектростанции	3,6 – 11,6	0,009 – 0,024	0,003 – 0,006
Солнечные фотоэлементы	98 – 167	0,20 – 0,34	0,18 – 0,30
Солнечные коллекторы	26 – 38	0,13 – 0,27	0,06 – 0,13
Ветровые установки	7 – 9	0,02 – 0,07	0,02 – 0,06
Геотермальные установки	79	0,02	0,28

Исходя из таблицы можно сделать вывод, что приоритетными ВИЭ в рамках низкоуглеродного развития являются: ветровые установки, объекты гидроэнергетики и биотопливные установки. Тем не менее, стоит отметить, что в целом выбросы при работе ВИЭ значительно меньше выбросов, чем при использовании традиционных источников энергии, таких как газ и природный, уголь.

Модели и методы

В качестве инструмента для систематизации информации о состоянии территории субъекта РФ, сохранения ее экологического потенциала и развития возобновляемой энергетики целесообразно использовать методику комплексной оценки. Суть комплексной оценки территории заключается в многокритериальном анализе качественных и количественных показателей состояния территорий с последующим формированием обобщающего вывода о:

- текущем состоянии экологического ландшафта и потенциала территории субъекта РФ;
- текущем развитии возобновляемой энергетики на территории субъекта РФ;
- приоритетных территориях для развития возобновляемой энергетики различных типов (функциональная приоритетность территории) [5-7].

Рассмотрим систему факторов комплексной оценки территории для сохранения ее экологического потенциала и развития возобновляемой энергетики на примере развития ветроэнергетики, гидроэнергетики и биотопливных установок, представленную в таблице 2.

Таблица 2 – Система факторов комплексной оценки территории для сохранения ее экологического потенциала и развития возобновляемой энергетики [8]

Группа факторов	Ф	Фактор	Оценка в баллах
Природные (климатообразующие)	Ф1	Скорость ветра	0-1
	Ф2	Перепады высот земной поверхности	0-1
Инфраструктурные	Ф3	Водоснабжение и водоотведение	0-1
	Ф4	Газоснабжение	0-1
	Ф5	Транспорт	0-1
	Ф6	Наличие биотопливного сырья (радиус влияния)	0-1
Пространственно-экономические	Ф7	Инвестиционная привлекательность региона	0-1
	Ф8	Расстояние до крупных региональных центров	0-1
Экологические	Ф9	Антропогенная нагрузка	0-1
	Ф10	Экологический потенциал	0-1

Исходной информацией для многокритериальной оценки территории субъекта РФ с целью анализа существующей ситуации и определения пригодности ее для размещения ВИЭ нужно проанализировать следующие виды исходной информации являются:

- тематические климатические карты субъекта РФ;
- схема территориального планирования;
- результаты экологического мониторинга субъекта РФ;
- стратегия социально-экономического развития до 2050 года с учетом низкоуглеродного развития;
- ежегодный (квартальный) отчет информационный обзор рынка ВИЭ в России (источник – Ассоциация возобновляемой энергетики);
- статистические данные Росстата;
- архивные данные по климатологии субъекта РФ.

Сопоставление и учет такого объема данных на уровне субъекта РФ становится возможным при использовании геоинформационных систем, которые позволяют интегрировать полученную информацию в единую среду.

Примерами на уровне России являются следующие карты, представленные на рисунках 2 и 3:

а)

б)



Рисунок 2 – Карты Российской Федерации о состоянии ветроэнергетики:
а) Карта ветроэнергетического потенциала РФ, б) Карта ветропарков РФ [9]

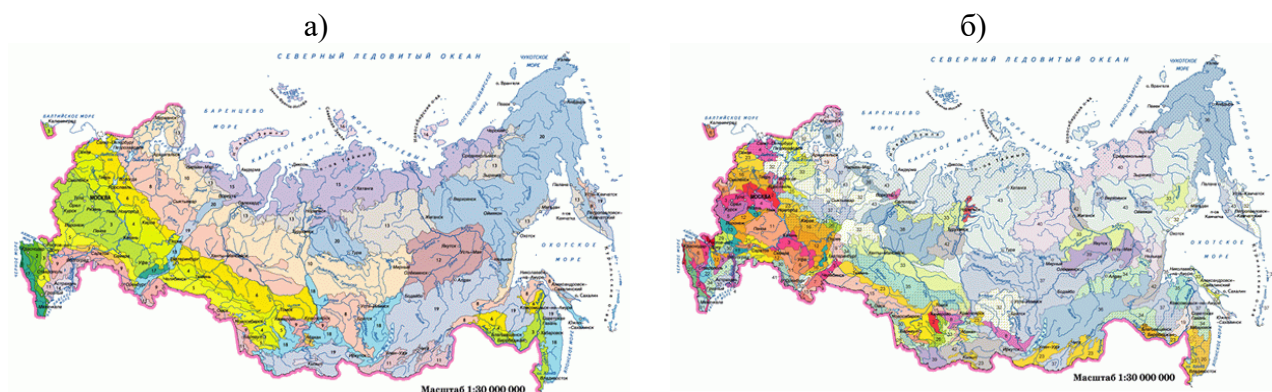


Рисунок 3 – Карты состояния окружающей среды на территории Российской Федерации:
 а) Карта экологического потенциала ландшафта РФ, б) Карта антропогенной нагрузки РФ [10]

Результаты исследования и их анализ

На уровне субъекта РФ выполнена комплексная оценка территории Ростовской области по всем десяти факторам, результатом которой являются тематические карты из четырех групп:

- природные (климатообразующие),
- инфраструктурные,
- пространственно-экономические
- экологические.

Примеры карт Ростовской области по трем факторам комплексной оценки территории приведены на рисунке 4.

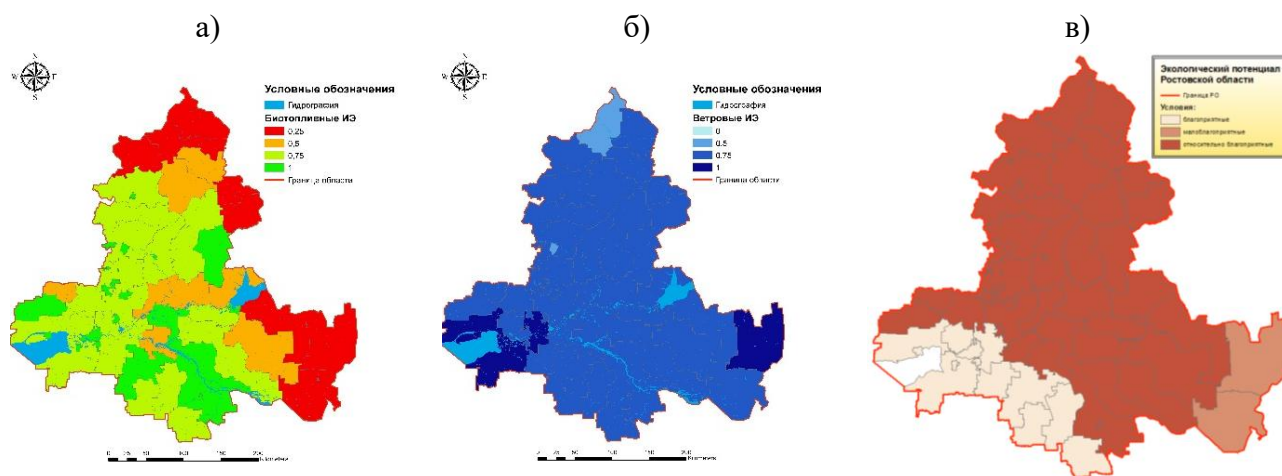


Рисунок 4 – Факторы комплексной оценки территории субъекта РФ:
 а) Источники биотопливного сырья, б) Ветровой потенциал в) Экологический потенциал

Карты комплексной оценки территории по совокупности факторов позволяют оптимизировать выбор территории для развития той или иной отрасли возобновляемой энергетики с учетом определенных особенностей каждой из них.

Экологический потенциал территории определяется:

- климатом (ветер и его скорость, влажность воздуха, теплообеспеченность, осадки т.д);
- водообеспеченностью (достаточностью и качеством питьевой воды);
- растительным и животным миром, а также его многообразием [10, 11].

Стоит уделить особое внимание косвенным факторам, оказывающим влияние на экологический потенциал территории при развитии возобновляемой энергетики по трем рассматриваемым приоритетным для Ростовской области направлениям (таблица 3).

Таблица 3– Косвенные факторы влияния ВИЭ на окружающую среду [12-15].

N	Отрасль энергетики	Влияние	Решение части проблем
1	Ветроэнергетика	шумовой эффект, вибрация, угроза летающим птицам, препятствие распространению радиосигналов, угроза гибели птиц, металлоемкость ветроустановок (загрязнение при производстве металла)	Шум и вибрация: увеличение зоны вокруг ВЭС и ее удаленности от населенных пунктов в пределах нормируемых значений по шуму и вибрации. вариантный выбор скорости вращения ветроколеса и профилей лопастей для решения проблемы – ультразвуковое загрязнение. Препятствие распространению радиосигналов: вместо металлических и деревянных изготовление лопастей без металлических включений из стекловолокна.
2	Биоэнергетика	Чистая энергетика за счет: — улучшения микроклимата благодаря использованию воды и рециркуляционных механизмов; — улучшения структуры грунта и снижение загрязнения воды; — снижения эмиссии в объеме вырабатываемой энергии.	Часть технологий получения биотоплива является природоохранной исходя из того, что является источником отходов: — отрасль животноводства, — отрасль пищевой промышленности. Рассматриваемые виды технологий переработки отходов позволяют предотвратить загрязнение воздуха, воды и почв.
3	Гидроэнергетика	Малые гидроэлектростанции: крайне ограничено влияют на окружающую среду	комплекс природоохранных и защитных мероприятий, позволяющий снизить влияние малых ГЭС на водную экосистему, а также исключить подтопление земель и сократить площадь отводимых земель.
		Приливные электростанции: негативно влияют на флору и фауну рек за счет изменения водного режима	комплекс природоохранных и компенсационных мероприятий; использование беспилотных электростанций, использующих скоростную энергию прилива.

Определение факторов, оказывающих влияние на экологический потенциал территории и природного ландшафта при развитии возобновляемой энергетики является центральной проблемой, которая решается с помощью методического инструментария: многокритериальная оценка территории, информационное моделирование пространственного развития субъекта РФ и применение геоинформационных систем.

Следующим этапом развития данного исследования является разработка имитационной модели устойчивого развития территории субъекта РФ при внедрении ВИЭ с учетом экологических мероприятий для сохранения экологического потенциала ландшафта [16-20].

Выводы

Основная цель оценки экологического потенциала территории субъекта РФ - формирование общего представления о среде жизнедеятельности человека и создание научного обоснования для ведения грамотной и рациональной градостроительной политики.

Многокритериальная оценка территории субъекта РФ, как инструмент пространственного планирования, позволяет учитывать развитие различных отраслей возобновляемой энергетики, совершенствовать систему расселения, учитывать экологическое состояние ландшафта, обеспечивать рациональную организацию труда и отдыха и другие социальные аспекты региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Об утверждении Стратегии пространственного развития до 2025 года [Электронный ресурс]. URL: <http://government.ru/docs/35733/> (дата обращения: 22.06.2022).
2. Что климат грядущий нам готовит [Электронный ресурс]. URL: <https://globalenergyprize.org/ru/2022/06/14/chto-klimat-gryadushhij-nam-gotovit/> (дата обращения: 22.06.2022).
3. Экологическая оценка использования возобновляемых источников энергии [Электронный ресурс]. URL: <https://www.agroxxi.ru/zhurnal-agroxxi/fakty-mneniya-komentarii/yekologicheskaya-ocenka-ispolzovaniya-vozobnovljajemyh-istochnikov-yenerгии.html> (дата обращения: 22.06.2022).
4. Sologubova G.S., Prospects for the development of renewable energy sources in the Russian Federation J. Technical and technological problems of service. 2020. № 2 (52). Pp. 55-63.
5. Шеина С.Г., Хамазова А.А., Сердюкова А.А. Разработка методики планирования сельских территорий в рамках развития агропромышленного комплекса Ростовской области // Недвижимость: экономика, управление. 2018. № 1. С. 41-46.
6. Теличенко В.И., Щербина Е.В. Социально-природно-техногенная система устойчивой среды жизнедеятельности // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 6. С. 5-12. doi:10.33622/0869-7019.2019.06.5-12.
7. Вильнер М.Я. О градостроительных основах инновационного развития России // БСТ: бюллетень строительной техники. 2009. № 1. С. 38-40.
8. Шеина С.Г., Федоровская А.А., Шевелева А.А. Комплексная оценка территории как механизм выбора местоположения и вида альтернативного источника энергии // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2017. № 10(998). С. 38-41.
9. Российская Ассоциация Ветроиндустрии, РАВИ [Электронный ресурс]. URL: <https://rawi.ru/> (дата обращения: 25.06.2022).
10. Национальный атлас России [Электронный ресурс]. URL: <https://nationalatlas.ru/> (дата обращения: 25.06.2022).
11. Преобразование нашего мира: Повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 года. — ООН, Нью-Йорк, сентябрь 2015 г. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/about/development-agenda/> (дата обращения: 25.06.2022).
12. Balat M., Usage of Energy Sources and Environmental Problems // J. Energy Exploration & Exploitation. 2005. № 23(2). Pp. 141-167.
13. Uzun V.Y., State Program for the Comprehensive Development of Rural Areas: Analysis of the Project // J.Economic Development of Russia. 2019. № 26(5). Pp. 30-34.
14. Kurbatova S.M., State program "Comprehensive development of rural areas": general characteristics // Problems of modern agricultural science Materials of Intern. scientific. conf. Krasnoyarsk: Publishing house of the Krasnoyarsk GAU. 2020. Pp. 437-440.
15. Энергетика: история, настоящее и будущее. [Электронный ресурс]. URL: <http://energetika.in.ua/ru/books/book-5/part-3/section-5> (дата обращения: 25.06.2022).
16. Щербина Е.В., Данилина Н.В. Градостроительные аспекты проектирования устойчивой городской среды // Вестник ИргТУ. 2014. № 11(94). [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/gradostroitelnye-aspekty-proektirovaniya-ustoychivoy-gorodskoy-sredy> (дата обращения: 30.06.2022).
17. Король Е.А., Журавлева А.А. Improvement of organizational and technological design of low-rise residential buildings with consumption of fuel and energy resources // Недвижимость: экономика, управление. 2021. № 2. С. 63-68.
18. Щербина Е.В., Горбенкова Е.В. Оценка факторов, обеспечивающих устойчивое развитие сельских поселений // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2016. № 4 (16). С. 97-105.
19. Graboviy P. Environmental aspects of substantiation of the production decision efficiency // MATEC Web Conf. 2018, 193, 05017. doi:<https://doi.org/10.1051/mateconf/201819305017>.

20. Phillis A., Grigoroudis E., Kouikoglou V. Assessing national energy sustainability using multiple criteria decision analysis // *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*. 2021. No. 28(1). Pp. 18-35. doi:10.1080/13504509.2020.1780646/

REFERENCES

1. Ob utverzhdenii Strategii prostranstvennogo razvitija do 2025 goda [Elektronnyj resurs]. URL:<http://government.ru/docs/35733/> (data obrashhenija: 22.06.2022).
2. Chto klimat grjadushhij nam gotovit [Elektronnyj resurs]. URL:<https://globalenergyprize.org/ru/2022/06/14/chto-klimat-gryadushhij-nam-gotovit> (data obrashhenija: 22.06.2022).
3. Jekologicheskaja ocenka ispol'zovanija vozobnovljaemyh istochnikov jenergii [Elektronnyj resurs]. URL:<https://www.agroxxi.ru/zhurnal-agroxxi/fakty-mnenija-komentarii/yekologicheskaja-ocenka-ispolzovanija-vozobnovljaemyh-istochnikov-yenergii.html> (data obrashhenija: 22.06.2022).
4. Sologubova G.S. Prospects for the development of renewable energy sources in the Russian Federation J. Technical and technological problems of service. 2020. No. 2 (52). Pp. 55-63.
5. Sheina S.G., Hamavova A.A., Serdjukova A.A. Razrabotka metodiki planirovaniya sel'skih territorij v ramkah razvitija agrarnopromyshlennogo kompleksa Rostovskoj oblasti // *Nedvizhimost': jekonomika, upravlenie*. 2018. No. 1. Pp. 41-46.
6. Telichenko V.I., Shherbina E.V. Social'no-prirodno-tehnogennaja sistema ustojchivoj sredy zhiznedejatel'nosti // *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2019. No. 6. Pp. 5-12. doi:10.33622/0869-7019.2019.06.5-12.
7. Vil'ner M. Ja. O gradostroitel'nyh osnovah innovacionnogo razvitija Rossii // *BST: bjulleten' stroitel'noj tehniki*. 2009. No. 1. Pp. 38-40.
8. Sheina S.G., Fedorovskaja A.A., Sheveleva A.A. Kompleksnaja ocenka territorii kak mehanizm vybora mestopolozhenija i vida al'ternativnogo istochnika jenergii // *BST: Bjulleten' stroitel'noj tehniki*. 2017. No. 10(998). Pp. 38-41.
9. Rossijskaja Associacija Vetroindustrii, RAVI [Elektronnyj resurs]. URL:<https://rawi.ru/> (data obrashhenija: 25.06.2022).
10. Nacional'nyj atlas Rossii [Elektronnyj resurs]. URL <https://nationalatlas.ru/> (data obrashhenija: 25.06.2022).
11. Preobrazovanie nashego mira: Povestka dnja v oblasti ustojchivogo razvitija na period do 2030 goda. — OON, N'ju-Jork, sentjabr' 2015 g. [Elektronnyj resurs]. URL:<https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/about/development-agenda/> (data obrashhenija: 25.06.2022).
12. Balat M., Usage of Energy Sources and Environmental Problems // *J. Energy Exploration & Exploitation*. 2005. No. 23(2). Pp. 141-167.
13. Uzun V.Y., State Program for the Comprehensive Development of Rural Areas: Analysis of the Project // *J.Economic Development of Russia*. 2019. No. 26(5). Pp. 30-34.
14. Kurbatova S.M., State program "Comprehensive development of rural areas": general characteristics // *Problems of modern agricultural science Materials of Intern. scientific. conf. Krasnoyarsk: Publishing house of the Krasnoyarsk GAU*. 2020. Pp.4 37-440.
15. Jenergetika: istorija, nastojashhee i budushhee. [Elektronnyj resurs]. URL:<http://energetika.in.ua/ru/books/book-5/part-3/section-5> (data obrashhenija: 25.06.2022).
16. Shherbina E.V., Danilina N.V. Gradostroitel'nye aspekty proektirovaniya ustojchivoj gorodskoj sredy // *Vestnik IrGTU*. 2014. No. 11 (94). [Elektronnyj resurs]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/gradostroitelnye-aspekty-proektirovaniya-ustoychivoy-gorodskoy-sredy> (data obrashhenija: 30.06.2022).
17. Korol' E.A., Zhuravleva A.A. Improvement of organizational and technological design of low-rise residential buildings with consumption of fuel and energy resources // *Nedvizhimost': jekonomika, upravlenie*. 2021. No. 2. Pp. 63–68.
18. Shherbina E.V., Gorbenkova E.V. Ocenka faktorov, obespechivajushhih ustojchivoje razvitie sel'skih poselenij // *Biosfernaja sovместimost': chelovek, region, tehnologii*. 2016. No. 4 (16). Pp. 97-105.
19. Graboviy P. Environmental aspects of substantiation of the production decision efficiency // *MATEC Web Conf*. 2018, 193, 05017. doi:<https://doi.org/10.1051/mateconf/201819305017>.
20. Phillis A., Grigoroudis E., Kouikoglou V. Assessing national energy sustainability using multiple criteria decision analysis // *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*. 2021. No. 28(1). Pp.18-35, doi:10.1080/13504509.2020.1780646/.

Информация об авторах:

Шейна Светлана Георгиевна

ФГБОУ ВО Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия,
доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Городское строительство и хозяйство».
E-mail: rgsu-gsh@mail.ru

Федоровская Альбина Ахмедовна

ФГБОУ ВО Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия,
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Городское строительство и хозяйство».
E-mail: bina-87@mail.ru

Information about authors:

Sheina Svetlana G.

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia,
doctor of technical science, professor, head of the department «Urban engineering and facilities».
E-mail: rgsu-gsh@mail.ru

Fedorovskaya Albina A.

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia,
candidate of technical science, Associate Professor of the Department of «Urban engineering and facilities».
E-mail: bina-87@mail.ru

А.В. КРУТСКИХ¹, В.Б. ПЕТРОПАВЛОВСКАЯ¹, К.С. ПЕТРОПАВЛОВСКИЙ¹,
Т.Б. НОВИЧЕНКОВА¹

¹ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», г. Тверь, Россия

МОДИФИЦИРОВАННЫЕ ЦЕМЕНТНЫЕ БЕТОНЫ С ДИСКРЕТНЫМ АРМИРОВАНИЕМ

Аннотация. Вопросы, связанные с повышением качества эксплуатационных свойств железобетонных и бетонных конструкций путем введения дискретного армирования – фиброармирования являются актуальными задачами строительного материаловедения. Получение высокотехнологичных бетонов с повышенными огнезащитными свойствами путем введения оптимального сочетания компонентов фибрового армирования являлось целью исследования. Проанализировано изменение прочности бетона на сжатие после огневых испытаний в зависимости от процентного содержания полипропиленовой фибры. При расчете контрольных составов фибробетонов была использована программа ТСП-27-25, разработанная в Тверском государственном техническом университете позволяющая моделировать различные составы бетонов. Установлено, что добавление фибры позволяет повысить огнестойкость бетонов при оптимальном её количестве. Дана оценка прочностных характеристик исследуемых образцов после огневого воздействия. Исследовано влияние содержания полипропиленовой фибры на характер разрушений бетонов.

Ключевые слова: бетон, модифицирование, дискретное армирование, фибра, огнестойкость.

A.V. KRUTSKIKH¹, V.B. PETROPAVLOVSKAYA¹, K.S. PETROPAVLOVSKIY¹,
T.B. NOVICHENKOVA¹

¹Tver State Technical University, Tver, Russia

MODIFIED CEMENT CONCRETE WITH DISCRETE REINFORCEMENT

Abstract. Issues related to improving the quality of the operational properties of reinforced concrete and concrete structures by introducing discrete reinforcement - fiber reinforcement are topical tasks of building materials science. The aim of the study was to obtain high-tech concretes with increased flame retardant properties by introducing an optimal combination of fiber reinforcement components. The change in the compressive strength of concrete after fire tests, depending on the percentage of polypropylene fiber, is analyzed. The TSP-27-25 program, developed at the Tver State Technical University, which allows modeling various concrete compositions, was used in the calculation of the control compositions of fiber-reinforced concrete. It has been established that the addition of fiber makes it possible to increase the fire resistance of concrete with an optimal amount of it. An assessment of the strength characteristics of the studied samples after fire exposure is given. The influence of polypropylene fiber content on the nature of concrete destruction is investigated.

Keywords: concrete, modification, discrete reinforcement, fiber, fire resistance.

Введение

Фибробетон представляет собой композиционный материал, включающий дополнительно распределенную в объеме фибровую арматуру [1].

© Крутских А.В., Петропавловская В.Б., Петропавловский К.С., Новиченкова Т.Б., 2023

Фиброармирование получило в настоящее время широкое распространение в производстве строительных изделий благодаря комплексному улучшению свойств бетонных и железобетонных конструкций. Чаще всего фиброармирование применяется при комбинированном армировании вместе с традиционным стержневым армированием [1].

Переход к получению конструкций с «чистым» дисперсным армированием является одной из важнейших задач строительной отрасли. Дисперсное фибровое армирование позволяет в большой степени компенсировать главные недостатки бетона - низкую прочность при растяжении и хрупкость разрушения [1].

Фибра нашла свое широкое применение и в качестве армирующего элемента при различных способах усиления [2], прежде всего – ж/б конструкций, а также в ремонтных составах для аварийных случаев. Фибробетон имеет в несколько раз более высокую прочность при растяжении и на срез, ударную и усталостную прочность, трещиностойкость и вязкость разрушения, морозостойкость, водонепроницаемость, сопротивление кавитации, жаропрочность и пожаростойкость. Вышеперечисленные показатели обеспечивают высокую технико-экономическую эффективность применения фибробетона в строительных конструкциях и их ремонте.

В отечественной науке вопросам фибробетона посвящены труды Ю.В. Пухаренко, В.П. Некрасова, И.В. Волкова и др. [3–5], огнестойкости строительных конструкций: методам расчета: А.И. Яковлева, В.Г. Олимпиева, А.А. Гвоздева, В.А. Пчелинцева, М.Я. Ройтман, В.М. Ройтмана и др. [4–11]. Исследования фибробетонов проводили многие зарубежные ученые: Xu M., Song S., B. Gordon, G.B. Batson, M. Jeffrey, I.A. Mandel, I.L. Carson, W.F. Chen и др. [12–17].

Современный накопленный опыт эксплуатации зданий и сооружений показывает, что не на последний план должно выходить такое свойство как огнестойкость конструкции. С помощью различных добавок и оптимального процента применения фибры в бетонах мы можем улучшить этот показатель.

Установлены области рационального применения фибробетонов:

➤ монолитные конструкции и сооружения - автомобильные дороги, перекладка покрытия, промышленные полы, выравнивающие полы, мостовые настилы, ирригационные каналы, взрыво- и взломоустойчивые сооружения, водоотбойные дамбы, огнезащитная штукатурка, емкости для воды и других жидкостей, обделки тоннелей, пространственные покрытия и сооружения, оборонные сооружения, ремонт монолитных конструкций полов, дорог и др.;

➤ сборные элементы и конструкции - железнодорожные шпалы, трубопроводы, склепы, балки, ступени, стеновые панели, кровельные панели и черепица, модули плавающих доков, морские сооружения, взрыво- и взломоустойчивые конструкции, плиты аэродромных, дорожных, тротуарных покрытий и креплений каналов, карнизные элементы мостов, сваи, шпунт, обогревательные элементы, элементы пространственных покрытий и сооружений, уличная фурнитура.

Практически все вышеуказанные конструкции из фибробетона широко применяются за рубежом, имеется положительный опыт их эффективного использования и в отечественном строительстве. Конструкции могут изготавливаться как с фибровым, так и с комбинированным армированием, когда имеется фибра и стержневая или проволочная арматура.

Повысить эксплуатационные качества бетона с дисперсным армированием можно увеличением отношения пределов прочности при растяжении и сжатии (R_{bt}/R_b).

Учитывая относительно высокую стоимость и дефицитность волокон, этот показатель решит вопрос о конкурентоспособности фибробетонов по сравнению с другими видами армированных бетонов. Имеются мнения, что для этого потребуется достижение величины $(R_{bt}/R_b) = 0,5 - 0,6$. Практически такое соотношение прочностей возможно только при дисперсном фибровом армировании бетона-матрицы [16].

Интегральные свойства фибробетона, как и любого композита, обуславливаются свойствами его компонентов (фибры и бетона-матрицы), а также наличием и степенью их совместной работы. В фибробетоне такая работа обеспечивается за счет сцепления и анкеровки фибры в бетоне.

За последние годы разработано множество новых перспективных технологий получения высокопрочных удобоукладываемых бетонов [16, 17]. Одна из них основана на применении комплексного модификатора бетона в виде порошка на органоминеральной основе, включающей микрокремнезем, суперпластификатор и регулятор твердения бетона [16, 17].

Экспериментально-теоретические исследования показали, что модифицированный высокопрочный бетон - наиболее приемлемая матрица для фибробетона с современной фиброй различных видов [16].

Для получения фибробетона с высокими эксплуатационными характеристиками и долговечностью необходимо выполнить следующее:

- достигнуть технологической совместимости фибры и бетона - матрицы (высокая однородность распределения фибры по объему композита; иметь необходимое количество растворной части бетона для размещения в ней фибры и обеспечения ее анкеровки, а также достаточную удобоукладываемость фибробетонной смеси из условий технологии производства изделий, конструкций или возведения сооружений);
- обеспечить коррозионную стойкость фибры в среде бетона-матрицы и требуемую долговечность получаемого фибробетона;
- создать максимальное заанкеривание фибры в бетоне-матрице с целью наиболее эффективного использования ее прочностных свойств;
- выбрать оптимальное сочетание агрегатного состояния (вида), прочности и деформативности фибры и бетона-матрицы для получения наиболее эффективного по эксплуатационным свойствам композита (фибробетона) на их основе.

В настоящее время имеются практически все возможности для создания высокопрочных фибробетонов нового поколения на основе отечественных материалов. Наличие современных эффективных видов фибры позволяет упростить ее введение и перемешивание в бетонной смеси, что, в свою очередь, дает возможность в большей степени использовать технологическое оборудование, применяемое для обычных бетонов. При этом могут быть получены и использованы фибробетонные смеси высокой подвижности [16–19].

В отношении пожаробезопасности бетон относится к безопасным, огнестойким материалам, но это не означает, что высокие температуры никак на него не влияют. Если воздействие пламени не продолжительно, вследствие низкой теплопроводности бетон не успевает прогреться настолько значительно, чтобы это привело к его повреждению, но при более-менее длительном воздействии высоких температур происходит его повреждение. Так, всего при +250 °С бетон теряет 25 % своей прочности, и эта прочность не восстановится уже никогда, а при 500-550 °С обычный бетон полностью разрушается [5–7].

Ещё губительнее резкое охлаждение и увлажнение нагретого бетона, например, при ликвидации возгораний. Возникают трещины, обнажается арматура, появляются не устранимые, значительные разрушения.

При высоких температурах разрушается структура цементного камня, это связано с разложением одного из основных компонентов цемента, гидрата окиси Са. Температура выше 550 °С повреждает даже традиционные заполнители, кварц превращается в тридомит, имеющий больший объем, что приводит к трещинам между элементами заполнителя и цементным камнем.

Для определения предела огнестойкости железобетонных конструкций необходимо знать распределение температур по бетону поперечного сечения элемента от воздействия стандартного пожара. Согласно нормативным положениям температура стандартного пожара изменяется в зависимости от времени огневого воздействия и выражается уравнением:

$$t = 345 \lg(8\tau + 1) + t_e \quad (1)$$

где τ - время нагрева, мин; t_e - начальная температура, °С.

Решение задачи нестационарной теплопроводности сводится к определению температуры бетона в любой точке поперечного сечения элемента в заданный момент времени. Функциональная зависимость температуры от времени описывается дифференциальным уравнением теплопроводности Фурье при нелинейных граничных условиях и сложном процессе тепло- и массопереноса.

Алгоритм расчета представляет собой систему уравнений для определения температуры в каждом узле накладываемой на сечение координатной сетки. Координатная сетка накладывается так, чтобы ее узлы располагались не только в толщине сечения, но и по его периметру, а также в центре стержней для конструкций с гибкой арматурой, и по длине полок и стенки в середине их толщины для конструкций с жесткой арматурой. Шаг сетки рекомендуется задавать в пределах 0,01 - 0,03 м, но обязательно больше максимального диаметра рабочей арматуры.

Модели и методы

В работе в качестве исходных материалов в составе бетона применялись цемент ПЦ 500-Д0, производства ООО «Евроцемент групп», а также фибра полипропиленовая ВСМ-II-12, производства ООО «Си-Айрлайд» (рисунок 1).

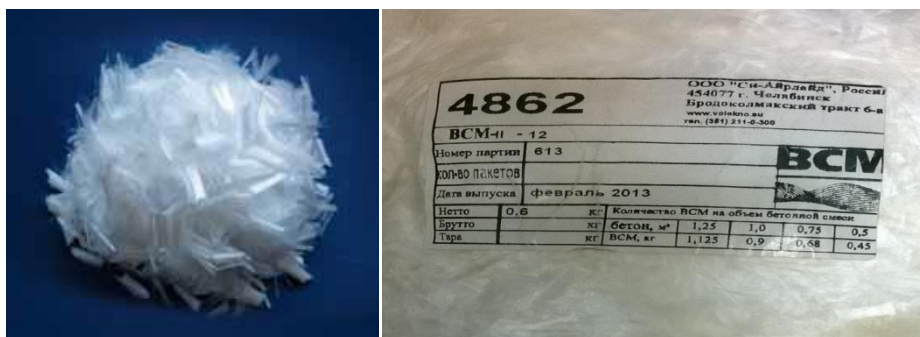


Рисунок 1– Фибра ВСМ-II-12 применяемая в ходе эксперимента

Состав тяжелого бетона (таблица 1) получен расчетным методом с помощью компьютерного моделирования в программе ТСП-27-25, разработанной в Тверском государственном техническом университете.

Подготовленные компоненты бетонной смеси, взвешенные с точностью до 100 г, загружались последовательно в емкость для перемешивания. Смешивание компонентов производилось вручную, по достижению однородности смеси она укладывалась в предварительно смазанные машинным маслом формы размером 100×100×100 мм. Стандартные формы-кубы заполнялись на 1/3 объема формы, затем после штыкования форма заполнялась на оставшиеся 2/3 объема, с последующим штыкованием и заполнялась полностью, после чего поверхность бетона заглаживалась вручную. Твердение образцов осуществлялось в нормальных условиях в течение 28 суток.

В процессе огневых испытаний и калибровки в печи создавался стандартный температурный режим, характеризуемый вышеприведенной зависимостью (1).

В процессе огневых испытаний регистрировались:

- время наступления предельных состояний и их вид;
- температуру в печи, на необогреваемой поверхности конструкции, а также в других предварительно установленных местах;
- избыточное давление в печи при испытании конструкций, огнестойкость которых определяется по предельным состояниям;
- деформации несущих конструкций;
- время появления пламени на необогреваемой поверхности образца;
- время появления и характер трещин, отверстий, отслоений, а также другие явления (например нарушение условий опирания, появление дыма).

Испытание продолжалось до наступления одного или последовательно всех предельных состояний, нормируемых для данной конструкции.

Таблица 1 – Составы применяемых бетонных смесей

Показатели	Контрольный состав	Фибробетон 1	Фибробетон 2	Фибробетон 3
1	2	3	4	5
Класс бетона	25	25	25	25
Фибра	отсутствует	ВСМ-II-12	ВСМ-II-12	ВСМ-II-12
Расход материалов, кг/м ³				
Фибра	0	1	3,5	6
Цемент М500	314	314	314	314
Щебень фр. 5-20мм	1154	1154	1154	1154
Песок	718	718	718	718
В/Ц	0,619	0,619	0,619	0,619
Вода	177	177	177	177
Маркировка образцов	1-12	37-48	25-36	13-23

После полного охлаждения образцы были подвергнуты испытаниям прочности на сжатие на гидравлическом прессе МС–500 по стандартной методике.

Результаты исследования и их анализ

Результаты испытаний (таблица 2, рисунок 2) показывают, что:

- при отсутствии воздействия огня фибра повышает прочность бетона, причем наибольшее значение прочности образцов соответствует рекомендуемому расходу фибры в 1 кг/м³ (прочность возросла на 35 %);
- при 15 минутном воздействии огня образцы составов 2 и 3 показывают прочность, мало отличающуюся от контрольного, добавление фибры в составе 1 повышают прочность бетона на 15 %;
- при 30 минутном воздействии огня образцы фибробетона показали прочность ниже эталонного образца без применения дисперсного армирования (рисунок 3).

Таблица 2 – Свойства бетона

№ п/п	Номера составов	Средняя прочность серии образцов, МПа	Длительность воздействия огня, мин	Изменение прочности в процентном отношении от контрольного состава (без фибры)
Без огневых испытаний				
	Контрольный состав	26,32	0	—
	Состав 3	26,32	0	0
	Состав 2	27,12	0	+3 %
	Состав 1	35,63	0	+35 %
Продолжительность огневых испытаний 15 мин.				
	Контрольный состав	26,32	15	—
	Состав 3	26,79	15	+1,7 %
	Состав 2	25,51	15	- 3 %
	Состав 1	30,35	15	+15 %
Продолжительность огневых испытаний 30 мин.				
	Контрольный состав	27,88	30	—
	Состав 3	19,14	30	-31%
	Состав 2	19,19	30	-31%
	Состав 1	24,99	30	-12%
Продолжительность огневых испытаний 45 мин.				
	Контрольный состав	28,03	45	—
	Состав 3	13,35	45	-52%
	Состав 2	19,81	45	-29%
	Состав 1	23,75	45	-15%

Установлено, что после 45-минутного воздействия огня образцы исследованных составов фибробетона показали прочность ниже контрольного состава, без применения дисперсного армирования. Это вызвано выгоранием фибры и как следствие увеличением пор и пустот в образце.

Отмечается, что при меньшем расходе фибры наблюдается увеличение прочности. Это, по-видимому, связано с наиболее оптимальным распределением дисперсного волокна по объему образца.



Рисунок 2 – Образцы до огневых испытаний (вверху) и после (внизу)

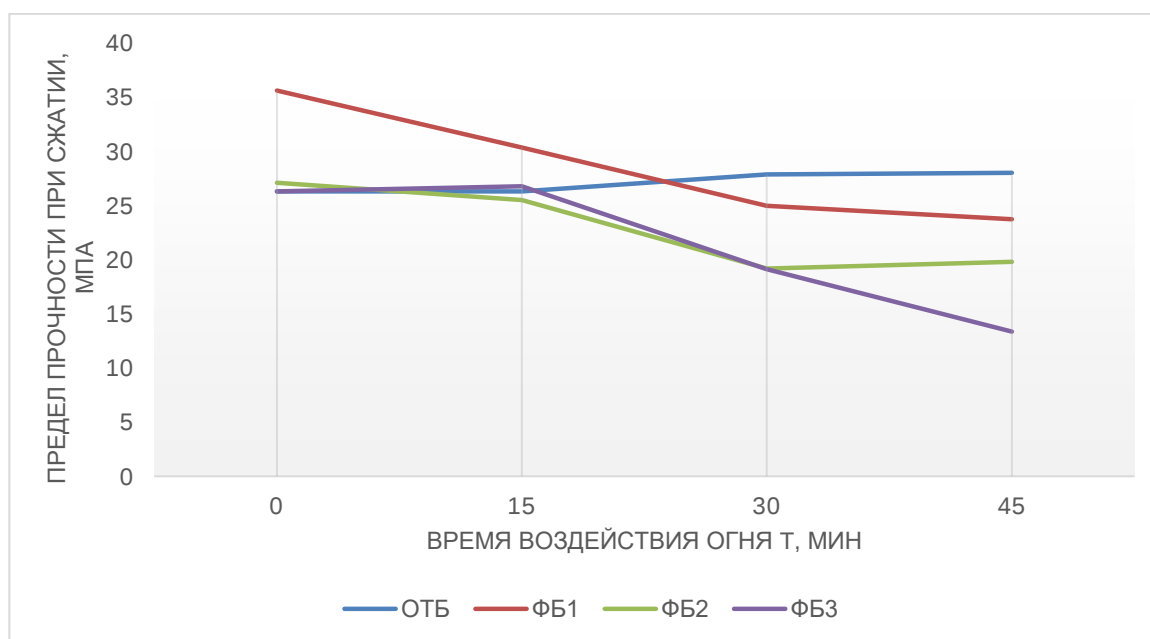


Рисунок 3 – Изменение предела прочности при сжатии бетонов после огневого воздействия

Выводы

Таким образом, рассматривая изменение прочности бетона по сериям огневых испытаний (т.е. при одинаковой продолжительности огневого воздействия), следует отметить, что:

– для конструкции без воздействия температуры и при огневом воздействии в течении 15 мин фибра повышает прочность бетона, причем при уменьшении количества фибры в составе бетона от 6 кг/м^3 до 1 кг/м^3 прочность возрастает.

– при воздействии температур в диапазоне длительности от 30 мин до 45 мин меньшее количество фибры способствует увеличению прочности, однако значительного увеличения прочности она не дает, причем прочность контрольного состава бетона выше прочности фибробетона;

– фибра влияет на характер разрушения образцов-кубов: образцы без фибры разрушались внезапно, тогда как в случае добавления фибры в состав бетона повышается связность всего бетонного массива, поэтому характер разрушения менее внезапный – перед окончательным разрушением массива в нем развиваются значительные трещины;

Повышение огнестойкости конструкций за счет применения дисперсного армирования бетона является одним из важнейших направлений исследований в области строительного материаловедения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дербасова Е.М. Основные барьеры и перспективы применения инновационных технологий и строительных материалов (на примере бетона) при возведении жилья // *Перспективы развития строительного комплекса*. 2012. Т. 1. С. 211-215.
2. Соловьёв В.Г., Шувалова Е.А. Эффективность применения различных видов фибры в бетонах // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2017. № 9 (63). С.78-81.
3. Пухаренко Ю.В., Пантелеев Д.А., Жаворонков М.И. Влияние вида фибры и состава матрицы на их сцепление в фибробетоне // *Вестник СибАДИ*. 2022. Т.19. № 3 (85). С. 436-445.
4. Пухаренко Ю.В., Пантелеев Д.А., Жаворонков М.И. Определение вклада фибры в формирование прочности сталефибробетона // *Вестник гражданских инженеров*. 2017. № 1(60). С. 172–176.
5. Рябова А.А. Оценка стеклофибробетона как конструкционного материала // *Фундаментальные исследования*. 2015. № 11-3. С. 500-504.
6. Ройтман В.М. Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий. Ассоциация «Пожарная безопасность и наука», 2001. 382 с.
7. Романов Н.Н., Кузьмин А.А., Пермяков А.А., Федоров А.В., Симонова М.А. Методика расчета режимов прогрева строительных конструкций в условиях внутреннего пожара // *Вестник Международной академии холода*. 2021. № 1. С. 84–93.
8. Новиков Н.С. Огнестойкость конструкций из фибробетона для автодорожных тоннелей и метрополитена // Автореферат к диссертации. М. 2019
9. Еремина Т.Ю., Корольченко Д.А. Обзор программного обеспечения расчета огнестойкости строительных конструкций для различных моделей пожаров // *Пожаровзрывобезопасность*. 2020. Т. 29. № 3. С. 44–53.
10. Федоров В.С., Левицкий В.Е., Соловьев И.А. Проблемы расчета фактической огнестойкости зданий и сооружений // *Международный научный семинар «Перспективы развития программных комплексов для расчета несущих систем зданий и сооружений»: сборник научных трудов*. Курск, 2013. С. 32-37.
11. Белов В.В., Семенов К.В. Огнестойкость железобетонных конструкций: модели и методы расчета // *Инженерно-строительный журнал*. № 6. С. 58-61.
12. Еналеев Р.Ш., Теляков Э.Ш., Тучкова О.А., Осипова Л.Э. Огнестойкость элементов конструкций при пожарах на предприятиях нефтегазового комплекса // *Известия ВУЗов. Проблемы энергетики*. 2010. № 11–12. С. 23–34.
13. Пашковский П.С., Зинченко И.Н., Богомаз А.М. Математическая модель тепломассообменных процессов при пожаре в здании // *Научный вестник НИИГД «Респиратор»*. 2015. № 52. С. 51–59.
14. Xu M., Song S., Feng L., Zhou J., Li H., Li V. C. Development of basalt fiber engineered cementitious composites and its mechanical properties // *Construction and Building Materials*. 2021. Т. 266. P. 121173.
15. Красникова Н.М., Хозин В.Г., Кашапов Р.Р. Исследование эксплуатационных характеристик тяжелых цементных бетонов с полифункциональной добавкой // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2017. № 4. С. 296-302.

16. Волков И.В. Фибробетон: технико-экономическая эффективность применения // Промышленное и гражданское строительство. 2002. № 9.
17. Енджиевская И.Г., Демина А.В., Енджиевский А.С., Дубровская С.Д. Оценка взаимодействия добавок в бетоне // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. № 24(3). С. 128-137.
18. Altynbekova A., Lukpanov R., Dyussembinov D., Askerbekova A., Tkach E. (2022). Effect of a complex modified additive on the setting time of the cement mixture. *Kompleksnoe Ispolzovanie Mineralnogo Syra*, 325(2), 29–38. <https://doi.org/10.31643/2023/6445.15>
19. Lukpanov R., Dyussembinov D., Yenkebayev S., Yenkebayeva A., Tkach E. (2022). Additive for improving the quality of foam concrete made on the basis of micro silica and quicklime. *Kompleksnoe Ispolzovanie Mineralnogo Syra*, 323(4), 30–37. <https://doi.org/10.31643/2022/6445.37>

REFERENCES

1. Derbasova E.M. The main barriers and prospects for the use of innovative technologies and building materials (for example, concrete) in the construction of housing// Prospects for the development of the construction complex. 2012. Vol. 1. Pp. 211-215.
2. Solovyov V.G., Shuvalova E.A. The effectiveness of the use of various types of fiber in concrete // International Research Journal. 2017. No. 9 (63). <https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.63.065>
3. Pukhareno Yu.V., Panteleev D.A., Zhavoronkov M.I. The influence of the type of fiber and the composition of the matrix on their adhesion in fibroconcrete. *Bulletin of SibADI*. 2022. Vol.19. No. 3 (85). Pp. 436-445. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-3-436-445>
4. Pukhareno Yu.V., Panteleev D.A., Zhavoronkov M.I. Determination of the contribution of fiber to the formation of the strength of steel fiber concrete // *Bulletin of Civil Engineers*. 2017. No. 1(60). Pp. 172-176.
5. Ryabova A.A. Evaluation of fiberglass as a structural material // *Fundamental research*. 2015. No. 11-3. Pp. 500-504.
6. Roitman V.M. Engineering solutions for assessing the fire resistance of designed and reconstructed buildings. Association "Fire Safety and Science", 2001. 382 p.
7. Romanov N.N., Kuzmin A.A., Permyakov A.A., Fedorov A.V., Simonova M.A. Method of calculation of heating modes of building structures in conditions of internal fire. *Bulletin of the International Academy of Cold*. 2021. No. 1. Pp. 84-93. [doi:10.17586/1606-4313-2021-20-1-84-93](https://doi.org/10.17586/1606-4313-2021-20-1-84-93)
8. Novikov N.S. Fire resistance of fiber-reinforced concrete structures for road tunnels and metro // Abstract to dissertation. M.2019
9. Eremina T.Yu., Korolchenko D.A. Review of software for calculating the fire resistance of building structures for various models of fires // *Pozharovzryvobezопасnost/pozharovzryvobasopasnost*. 2020. T. 29. No. 3. Pp. 44-53. <https://doi.org/10.22227/PVB.2020.29.03.44-53>
10. Fedorov V.S., Levitsky V.E., Soloviev I.A. Problems of calculating the actual fire resistance of buildings and structures // *Collection of scientific papers of the International Scientific Seminar on September 19-20, 2013, Kursk*. 2013.
11. Belov V.V., Semenov K.V. Fire resistance of reinforced concrete structures: models and calculation methods. *Civil Engineering Journal*. No. 6. Pp. 58-61.
12. Enaleev R.S., Telyakov E.S., Tuchkova O.A., Osipova L.E. Fire resistance of structural elements during fires at oil and gas complex enterprises. *News of universities. Energy problems*. 2010. No. 11-12. Pp. 23-34.
13. Pashkovsky P.S. Mathematical model of heat and mass transfer processes during a fire in a building / P.S. Pashkovsky, I.N. Zinchenko, A.M. Bogomaz // *Scientific Bulletin of NIIGD "Respirator"*. 2015. No. 52. Pp. 51-59.
14. Xu M., Song S., Feng L., Zhou J., Li H., Li V. S. Development of cement composites based on basalt fiber and their mechanical properties // *Construction and building materials*. 2021. T. 266. P. 121173.
15. Krasnikova N.M., V Khozin.G., Kashapov R.R. Investigation of operational characteristics of heavy cement concretes with a multifunctional additive// *KGASU, Kazan, Russia, Izvestiya Kazan State University of Architecture and Civil Engineering*. 2017. No. 4. Pp. 296-302.
16. Volkov I.V. Fibrobeton: technical and economic efficiency of application // *Industrial and civil construction*. 2002. No. 9.
17. Yendzhievskaya I.G., Demina A.V., Yendzhievsky A.S., Dubrovskaya S.D. Evaluation of the interaction of additives in concrete. *Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2022. No. 24(3). Pp. 128-137.
18. Altynbekova A., Lukpanov R., Dyussembinov D., Askerbekova A., Tkach E. (2022). Effect of a complex modified additive on the setting time of the cement mixture. *Kompleksnoe Ispolzovanie Mineralnogo Syra*, 325(2), 29–38. <https://doi.org/10.31643/2023/6445.15>
19. Lukpanov R., Dyussembinov D., Yenkebayev S., Yenkebayeva A., Tkach E. (2022). Additive for improving the quality of foam concrete made on the basis of micro silica and quicklime. *Kompleksnoe Ispolzovanie Mineralnogo Syra*, 323(4), 30–37. <https://doi.org/10.31643/2022/6445.3>

Информация об авторах:

Крутских Андрей Викторович

ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», г. Тверь, Россия,
старший преподаватель кафедры конструкций и сооружений.

E-mail: mister.krutskih@mail.ru

Петропавловская Виктория Борисовна

ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», г. Тверь, Россия,
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры производства строительных изделий и конструкций.

E-mail: victoriapetrop@gmail.com

Петропавловский Кирилл Сергеевич

ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», г. Тверь, Россия,
кандидат технических наук, доцент кафедры конструкций и сооружений.

E-mail: kspetropavlovsky@gmail.com

Новиченкова Татьяна Борисовна

ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», г. Тверь, Россия,
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры производства строительных изделий и конструкций.

E-mail: tanovi.69@mail.ru

Information about the author:

Krutskikh Andrey V.

Tver State Technical University, Tver, Russia,
senior lecturer of the Department of structures and constructions.

E-mail: mister.krutskih@mail.ru

Petropavlovskaya Victoria B.

Tver State Technical University, Tver, Russia,
doctor in technical sciences, docent, professor of the department of production of building products and structures.

E-mail: victoriapetrop@gmail.com

Petropavlovskii Kirill S.

Tver State Technical University, Tver, Russia,
candidate in technical sciences, associate professor of the department of structures and constructions.

E-mail: kspetropavlovsky@gmail.com

Novichenkova Tatiana B.

Tver State Technical University, Tver, Russia,
candidate in technical sciences, docent, associate professor of the department of production of building products and structures.

E-mail: tanovi.69@mail.ru

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

- Представляемый материал должен быть **оригинальным, не опубликованным ранее** в других печатных изданиях.
- Объем материала, предлагаемого к публикации, измеряется числом знаков с учетом пробелов. Рекомендуемый объем статей: **от 15000 до 45000 знаков с пробелами**.
- Статья должна быть набрана на листах формата А4 шрифтом Times New Roman, размер 12 pt с одинарным интервалом, текст выравнивается по ширине; абзацный отступ – 1,25 см, правое поле – 2 см, левое поле – 2 см, поля внизу и сверху – 2 см; все страницы рукописи должны иметь сплошную нумерацию.
- Статья предоставляется в электронном виде по электронной почте или через систему электронной редакции.
- В одном сборнике может быть опубликована только **одна статья одного автора**, включая соавторство.
- Если статья возвращается автору на доработку, исправленный вариант следует прислать в редакцию повторно, приложив письмо с ответами на замечания рецензента. Доработанный вариант статьи рецензируется и рассматривается редакционной коллегией вновь. Датой представления материала считается дата поступления в редакцию окончательного варианта исправленной статьи.
- Аннотации всех публикуемых материалов, ключевые слова, информация об авторах, списки литературы будут находиться в свободном доступе на сайте соответствующего журнала и на сайте Российской научной электронной библиотеки – РУНЭБ (Российский индекс научного цитирования).

В тексте статьи не рекомендуется применять:

- обороты разговорной речи, техницизмы, профессионализмы;
- для одного и того же понятия различные научные термины, близкие по смыслу (синонимы), а также иностранные слова и термины при наличии равнозначных слов и терминов в русском языке;
- произвольные словообразования;
- сокращения слов, кроме установленных правилами русской орфографии, соответствующими стандартами.
- Сокращения и аббревиатуры должны расшифровываться по месту первого упоминания (вхождения) в тексте статьи.

Обязательные элементы:

- **заглавие (на русском и английском языке)** публикуемого материала должно быть точным и емким, слова, входящие в заглавие, должны быть ясными сами по себе, а не только в контексте; следует избегать сложных синтаксических конструкций, новых словообразований и терминов, а также слов узкопрофессионального и местного значения;
- **аннотация (на русском и английском языке)** кратко описывает объект исследования, мотивацию к проведению исследования, результаты исследования (рекомендуется указывать конкретные результаты и зависимости, полученные в исследовании), выводы (кратко); рекомендуемый объем – от 200 до 250 слов;
- **ключевые слова (на русском и английском языке)** – это текстовые метки, по которым можно найти статью при поиске и определить предметную область текста; обычно их выбирают из текста публикуемого материала, достаточно 5-10 ключевых слов.
- **список литературы**, на которую автор ссылается в тексте статьи; рекомендуемый объем списка литературы – не менее 20 источников.

В информации об авторах рекомендуется указывать ORCID, Scopus ID и SPIN-код, присвоенный в РИНЦ.

Редакция не взимает плату с авторов за подготовку, рецензирование и размещение в открытом доступе статей.

Право использования произведений предоставлено авторами на основании п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации.

С полной версией требований к оформлению научных статей
Вы можете ознакомиться на сайте <https://construction.elpub.ru/jour/index>

Адрес издателя:

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

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

Адрес редакции

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»
302030, Орловская область, г. Орел, ул. Московская, 77.
+79065704999
<http://oreluniver.ru/science/journal/sir>
E-mail: str_and_rek@mail.ru

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

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

Подписано в печать
Дата выхода в свет
Формат 70×108/16. Печ. л. 8,8
Цена свободная. Тираж 500 экз.
Заказ №

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