

Научно-технический журнал
Издается с 2003 года.
Выходит шесть раз в год.
№5 (85) 2019
сентябрь-октябрь

Главный редактор:
Колчунов В.И., акад. РААСН, д.т.н., 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)
Скobelева Е.А., канд. техн. наук, доц. (Россия)

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

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

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

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

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

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

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

Мелькумов В.Н., д-р техн. наук, проф. (Россия)
Орлович Р.Б., д-р техн. наук, проф. (Польша)

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

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

Сергейчук О.В., д-р техн. наук, проф. (Украина)
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)

Чернышов Е.М., акад. РААСН, д-р техн. наук,
проф. (Россия)

Шах Р., д-р техн. наук, проф. (Германия)
Исполнительный редактор:
Юрова О.В., (Россия)

Адрес редакции:
302006, Россия, г. Орел, ул. Московская, 77
Тел.: +7 (4862) 73-43-49
<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.

Подписанной индекс 86294 по объединенному
каталогу «Пресса России»

© ОГУ имени И.С. Тургенева, 2019

СТРОИТЕЛЬСТВО И РЕКОНСТРУКЦИЯ

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

Содержание

Теория инженерных сооружений. Строительные конструкции

Демьянов А.И. Особенности трещинообразования в конструкциях из высокопрочного железобетона при сложном сопротивлении – кручении с изгибом	3
Дёминов П.Д. Оценка вероятностных характеристик плотности вероятности предельной поперечной силы в изгибаемых железобетонных элементах	11
Люблинский В.А. К испытанию вертикальных сварных стыковых соединений панельных зданий	17
Мамиева И.А., Гбагуи - Айссе Ж.Л. Влияние геометрических исследований редких типов поверхностей на создание новых и уникальных сооружений	23
Надольский В.В., Мартынов Ю.С., Веревка Ф.А. Стеновые панели на основе кассетных профилей. Часть 2 Экспериментальные исследования	35
Трещёв А.А., Кузнецова В.О. Моделирование процесса влияния наводороживания на НДС пологоизферической оболочки из титанового сплава	48

Безопасность зданий и сооружений

Колчунов Вл.И., Дьяков И.М., Гречишников С.В., Дьяков М.И. Способ усиления каркаса многоэтажного здания при неравномерных осадках фундаментов	63
Тур В.В., Яловая Ю.С. Анализ технического состояния эксплуатируемых железобетонных конструкций с использованием нечеткой логики на основе экспертной системы оценки	74
Соловьев С.А., Уткин В.С. Надежность буроинъекционной сваи с уширением по критерию осадки	85

Архитектура и градостроительство

Гурьева Е.И., Яньшина Н.А. Социально-психологические факторы в градостроительной политике на примере воронежской агломерации ..	96
Холодова Е.В. Архитектура усадебных зданий Курской губернии XVIII – первой половины XIX вв.	108

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

№5 (85) 2019

September-October

BUILDING AND RECONSTRUCTION

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

Editor-in-Chief
Kolchunov V.I., Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Editor-in-Chief Assistants:
Gordon V.A., Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)
Korobko V.I., Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)
Savin S.Yu., Candidate Sc. Tech., Docent (Russia)
Skobeleva 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)
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)
Sergeychuk O.V., Doc. Sc. Tech., Prof. (Ukraine)
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. (Belarus)
Turkov A.V., Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)
Fedorov V.S., Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)
Fedorova N.V., Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)
Chernyshov E.M., Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)
Schach R., Doc. Sc. Tech., Prof. (Germany)

Managing Editor:
Yurova O.V. (Russia)

The edition address:
302006, Orel, Moskovskaya Street, 77
+7 (4862) 73-43-49
<http://oreluniver.ru/science/journal/sir>
E-mail: str_and_rek@mail.ru

Journal is registered in Russian federal service for monitoring communications, information technology and mass communications
The certificate of registration:
ПИ №ФС 77-67169 from 16.09.2016 г.

Index on the catalogue of the «Pressa Rossii»
86294

© Orel State University, 2019

Contents

Theory of engineering structures. Building units

Demyanov A.I. Crack formation in high-strength reinforced concrete structures at complex resistance - torsion with bending	3
Demirov P.D. Estimation of the probabilistic characteristics of the probability density of the ultimate transverse force in bending concrete elements	11
Lyublinskiy V.A. To test vertical welded butt joints of panel buildings	17
Mamieva I.A., Gbaguidi-Aisse G.L. Influence of the geometrical researches of rare type surfaces on design of new and unique structures	23
Nadolski V.V., Martynov Y.S., Viarouka F.A. Wall panels based on cassette profiles. Part 2. Experimental researches	35
Treschev A.A., Kuznetsova V.O. Simulation of the process of influence of fluiding on stress-strain state of the flag spherical shell made of titanium alloy	48

Building and structure safety

Kolchunov V.I., Diakov I.M., Grechishnikov S.V., Diakov M.I. Method for strengthening the frame of a multi-storey building under dimensional sediments of foundations	63
Tur V.V., Yalavaya Y.S. Assessment of existing reinforced concrete structures with usage of the fuzzy logic – based expert system	74
Solovyev S.A., Utkin V.S. Reliability analysis of cfa piles with under-ream on settlement	85

Architecture and town-planning

Gureva E. I., Yanshina N. A. Socio-psychological factors in urban policy by example Voronezh agglomeration	96
Kholodova E.V. The architecture of manor houses in Kursk province XVIII-first half of XIX century	108

ОСОБЕННОСТИ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ В КОНСТРУКЦИЯХ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОНА ПРИ СЛОЖНОМ СОПРОТИВЛЕНИИ – КРУЧЕНИИ С ИЗГИБОМ

ДЕМЬЯНОВ А.И.

Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия

Аннотация. Приведены некоторые результаты экспериментальных исследований и дан анализ полученных опытных данных об особенностях трещинообразования и раскрытия трещин в опытных конструкциях балок сплошного и полого сечений из высокопрочного железобетона при сложном напряженном состоянии – кручении с изгибом. Установлено, что при количественно сопоставимых отношениях крутящего и изгибающего моментов в рассматриваемых конструкциях в зоне кручения с изгибом возможно образование одной или нескольких пространственных трещин. Полученные опытные значения ширины раскрытия трещин для балок сплошного и полого сечения существенно отличаются между собой. Максимальное раскрытие прогрессирующих трещин, по которым происходило разрушение опытных конструкций наблюдалось не по оси растянутой арматуры, а на расстоянии порядка двух диаметров от этой оси. Полученные результаты экспериментальных исследований позволяют выполнить проверку и сопоставительный анализ расчетных моделей предложенных для расчета трещиностойкости стержневых железобетонных конструкций при кручении с изгибом.

Ключевые слова: железобетон, кручение с изгибом, трещиностойкость, деформации, прочность, сплошное и полое сечение.

CRACK FORMATION IN HIGH-STRENGTH REINFORCED CONCRETE STRUCTURES AT COMPLEX RESISTANCE - TORSION WITH BENDING

DEMYANOV A.I.

Southwest State University, Kursk, Russia

Abstract. The paper presents experimental results and an analysis on the features of crack formation and crack opening in beams of solid and hollow cross sections made of high-strength reinforced concrete at a complex stress state - torsion with bending. It has been established that one or more spatial cracks can form at quantitatively comparable ratios of torque and bending moments in the considered structures in the zone of torsion with bending. The obtained experimental values of the crack opening width for beams of solid and hollow sections significantly differ from each other. The maximum opening of progressing cracks along which the destruction of the experimental structures occurred was observed not along the axis of the tensile reinforcement, but at a distance of about two diameters from this axis. The obtained results of experimental studies make it possible verification and comparative analysis of the calculation models proposed for calculating the crack resistance of rod reinforced concrete structures under torsion with bending.

Keywords: reinforced concrete, bending with torsion, crack resistance, deformation, strength, solid and hollow section.

Введение

Расчет железобетонных конструкций при сложном сопротивлении – кручении с изгибом остается одним из малоисследованных направлений современной теории железобетона. Известные результаты теоретических и экспериментальных исследований носят фрагментарный характер и далеко не отражают все важные особенности деформирования, трещинообразования и разрушения железобетонных конструкций при таком напряженном состоянии, в особенности для новых видов бетона и фибробетона, широкого диапазона соотношений изгибающего и крутящего моментов, форм и структуры поперечных сечений, граничных условий и других факторов. В проведенных в последние годы экспериментальных исследованиях (см., например, работы [1-7]) рассматривались в большинстве случаев конструкции из традиционных бетонов и фиброжелезобетона относительно невысокой прочности. В связи с этим интерес представляет экспериментальное исследование железобетонных конструкций из высокопрочного бетона, причем не только прямоугольного, но и коробчатого, круглого и кольцевого сечений. Такие формы сечений все чаще используются при проектировании конструкций ядер жесткости высотных зданий и инженерных сооружений. Проведенные, с участием автора экспериментальные исследования железобетонных балок из высокопрочного железобетона при совместном действии изгибающего и крутящего моментов [8,9] позволили не только выявить ряд важных особенностей деформирования и разрушения таких конструкций для проверки предложенной для их расчета новой расчетной модели [10-12], но и установить принципиальные особенности трещинообразования и деформирования таких конструкций при рассматриваемом напряженном состоянии до и после образования трещин.

Особенности образования, развития и раскрытия трещин

Объектом исследований явились железобетонные конструкции балок прямоугольного, коробчатого, круглого и кольцевого поперечного сечения длиной 1200мм с размерами поперечного сечения $b=h=200\text{мм}$ – для квадратных сечений балок и диаметром 200 мм - для круглого и кольцевого сечений. Кубиковая прочность бетона R к моменту испытаний (в возрасте 60 сут.) Составляла 109,5 МПа - для балок квадратного и коробчатого сечений и 130 МПа – для балок круглого и кольцевого сечений.

Конструкции опытных балок прямоугольного и коробчатого сечения армировались сварными пространственными каркасами с продольными стержнями диаметром 6мм из арматуры класса А - 240С (рис. 1 а, б). В качестве поперечной арматуры принятые стержни диаметром 6мм Класса А-240С установленные с шагом 70 мм. Для обеспечения надежной передачи крутящего момента от нагружочных устройств на конструкции балки в торцах опытных конструкций устанавливались металлические пластины толщиной 8мм с отверстиями диаметром 14 мм под анкера в виде арматурных стержней диаметром 10 мм выпускаемые из конструкции.

Конструкции опытных балок круглого и кольцевого сечений армировались также пространственным каркасом, но круглого сечения (рис. 1 в, г). Торцовые пластины выполнялись в виде восьмигранника, вписанного в круглое поперечное сечение опытного образца с аналогичными анкерами в виде арматурных стержней диаметром 10мм. До начала испытаний опытных конструкций по ГОСТ 18105-2010 «Бетоны. Правила контроля и оценки прочности», ГОСТ 22690-2015 «Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля» и ГОСТ 12004-81 «Сталь арматурная. Методы испытания на растяжение (с Изменениями N 1, 2)» были определены физико-механические характеристики высокопрочного бетона и арматурной стали.

Испытание опытных конструкций проводилось с помощью пресса и специально сконструированных нагрузочных устройств. Каждый образец опытных конструкций испытывался в горизонтальном положении по перевернутой двухконсольной схеме, со свободным доступом к растянутой зоне конструкции (рис. 2).

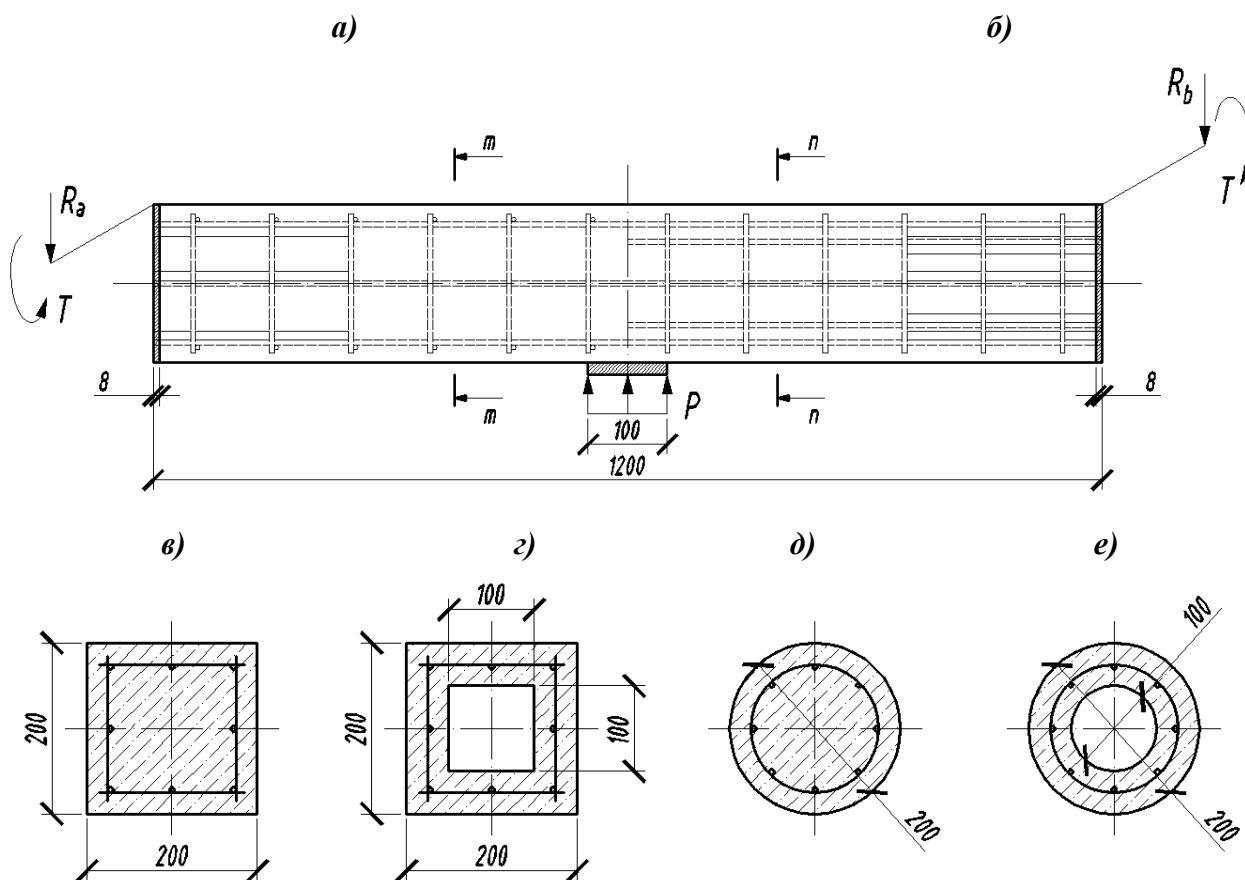


Рисунок 1 – Конструкции опытных образцов балок: а – опалубочная схема для железобетонных конструкций квадратного и коробчатого сечений; б – то же, для конструкций круглого и кольцевого сечений; в, г, д, е – форма поперечного сечения, соответственно

Все балки испытаны с доведением до разрушения. Приложение нагрузки осуществлялось через специальную траверсу ступенями равными 0,1 от нагрузки трещинообразования с выдержкой на каждой ступени. При этом показания приборов (индикаторы прогибомеров) снималось на каждой ступени дважды до и после выдержки. Ширина раскрытия трещин измерялась с помощью микроскопа МПБ-3М. Фиксировалось развитие и раскрытие трещин на всех этапах нагрузки, отмечалось также появление новых трещин, развитие уже имевшихся. Измерялась ширина раскрытия трещин на боковых гранях в разных уровнях вдоль оси продольной и поперечной арматуры, а также на расстоянии двух диаметров от оси арматуры в характерных точках вдоль всего профиля трещин.

Результаты проведенных испытаний и проведенный анализ позволяют отметить следующее.

В конструкциях из высокопрочного бетона сплошного сечения образовывалась как правило лишь одна магистральная пространственная трещина, в которой по мере увеличения нагрузки увеличивалось ее раскрытие и по которой происходило разрушение конструкции (рис. 3а).

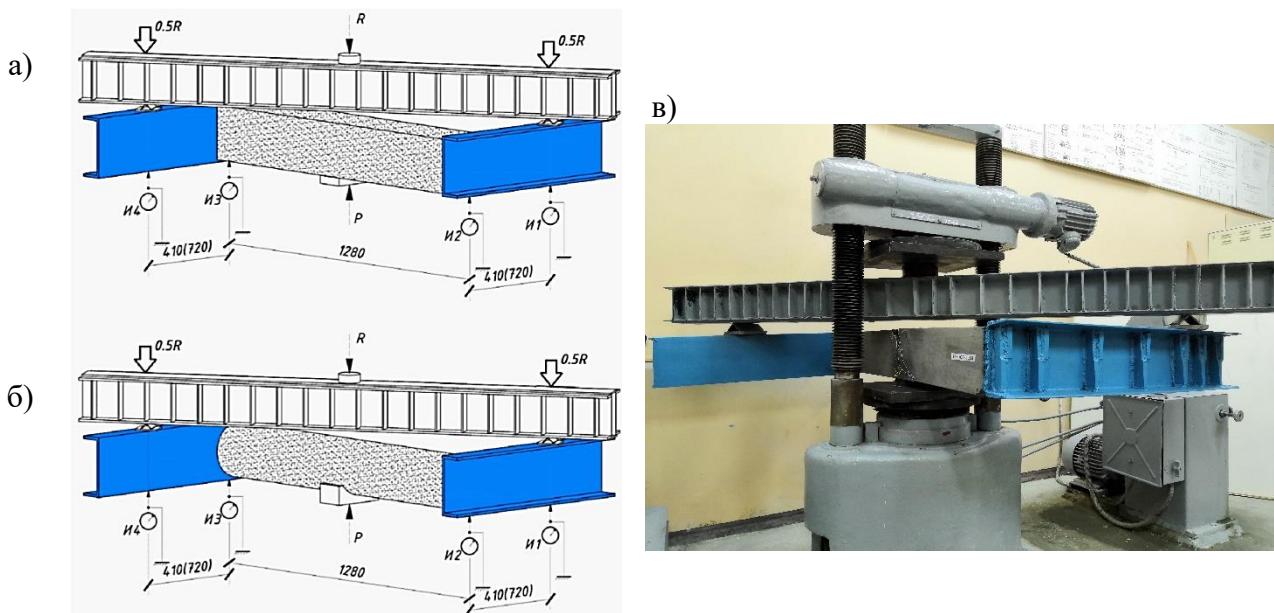
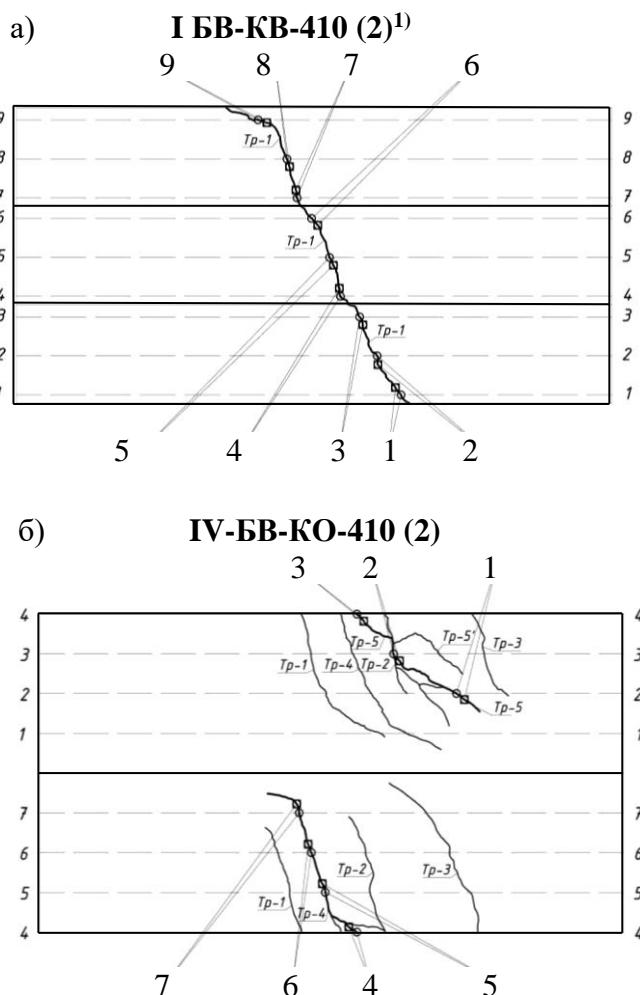


Рисунок 2 - Схемы (а, б) и общий вид испытаний (в) конструкций балок из высокопрочного железобетона



№ этапа	a _{crс} , мм на уровне оси арматуры / на расстоянии 2-х диаметров от оси							
	1	2	3	4	5	6	7	8
IV				0,2/ 0,5	0,2/ 0,5	0,2/ 0,5		
V		0,4/ 0,9	0,15/ 0,39	0,8/ 1,5	0,8/ 1,5	0,7/ 1,7	0,8/ 1,4	0,3/ 0,7
VI	0,8/ 1,6	1,5/ 3,1	2,0/ 4,2	2,0/ 4,1	3,5/ 7,2	2,0/ 4,1	2,3/ 5,2	1,9/ 4,0
VII	1,0/ 2,0	3,0/ 5,9	3,0/ 6,1	4,0/ 8	4,0/ 2	4,0/ 6,9	3,0/ 7,9	3,0/ 5,8
VIII	1,5/ 2,9	4,5/ 9,2	4,9/ 9,9	9,0/ 17	9,2/ 20,1	9,3/ 18,0	4,6/ 9,2	4,0/ 8,2

№ этапа	a _{crс} , мм на уровне оси арматуры / на расстоянии 2-х диаметров от оси						
	1	2	3	4	5	6	7
VIII			0,2/ 0,42	0,18/ 0,4	0,2/ 0,5	0,2/ 0,38	0,1/ 0,2
IX			0,6/ 1,1	0,56/ 1,1	0,67/ 1,1	0,55/ 1,5	0,6/ 1,2
X	0,1/ 0,2	0,8/ 1,7	2,7/ 5,9	2,7/ 6,1	3,3/ 6,8	3,2/ 7,0	1,7/ 3,4
XI	0,4/ 0,9	1,1/ 2,1	3,2/ 6,5	3,3/ 6,5	4,0/ 8,2	3,9/ 8,1	4,5/ 9,1

¹⁾Шифр конструкции включает: БВ – балка высокопрочная; КВ – квадратное сечение; КО – круглое полое; I, II, III, IV – номер серии; 410-520 – значение эксцентрикитета; (2) – номер опытного образца

Рисунок 3 - Схемы трещинообразования и ширина раскрытия трещин в опытных конструкциях балок прямоугольного сплошного (а) и круглого полого (б) поперечного сечения; 1, 2, 3, ...9 – оси рабочих арматурных стержней

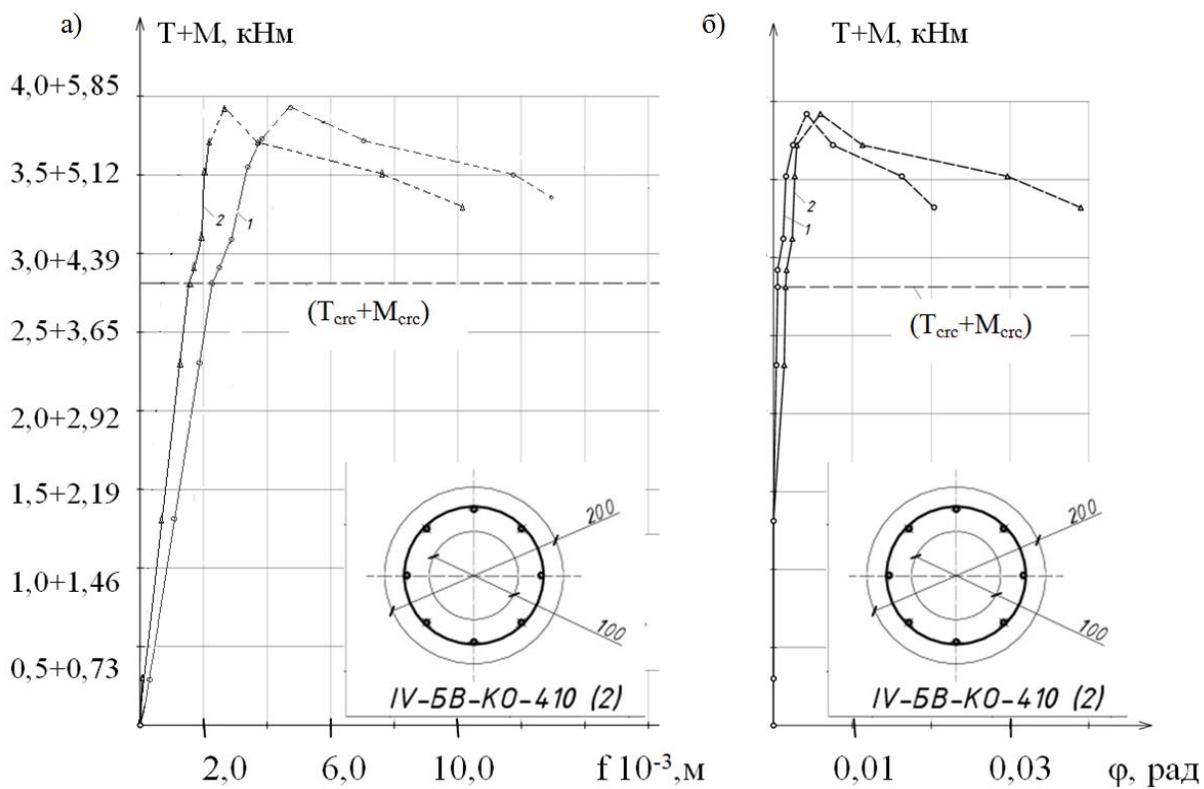


Рисунок 4 – Графики прогибов (а) и углов поворота (б) опытной конструкции IV-БВ-КО-410 (2), вычисленные по показаниям индикаторов И2 - И3

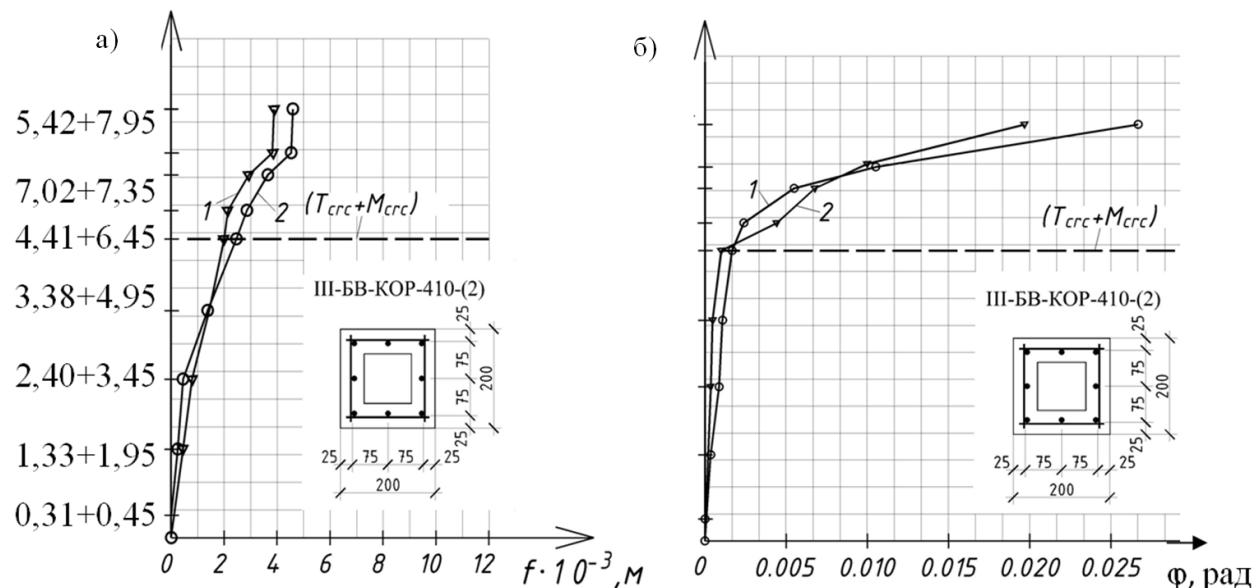


Рисунок 5 – Графики прогибов (а) и углов поворота (б) опытной конструкции III-БВ-КОР-410-(2), вычисленные по показаниям индикаторов И2 - И3

В опытных конструкциях коробчатого и кольцевого сечений характерно образование нескольких трещин по траектории пространственной поверхности (рис. 3б). По мере увеличения нагрузки из этих трещин выделяется одна, с прогрессирующим ее раскрытием, по которой и происходит разрушение конструкции. Количественный анализ ширины раскрытия трещин в опытных конструкциях прямоугольного и круглого сплошного сечения, а также в

конструкциях коробчатого и кольцевого сечения показал (см. таблицы рис. 3), что ширина раскрытия трещин, измеренная вдоль осей 1, 2, 3 ... 9 рабочей арматуры в два и более раз меньше ширины раскрытия трещин в этом же направлении на удалении двух диаметров от этих осей.

Такие различия в ширине раскрытия трещин на уровне рабочей арматуры и на удалении двух диаметров от оси арматуры свидетельствует о депланации пространственной поверхности трещины вызванной реакцией в арматурных стержнях. Из этого следует, что традиционно используемая модель теории железобетона для расчета ширины раскрытия трещин, когда ширина раскрытия трещин определяется на уровне оси рабочей арматуры и требует корректировки, например, в рамках модели предложенной в работах [10-13]. Сказанное подтверждает количественный анализ и сопоставление значений ширины раскрытия трещин в конструкциях из высокопрочного железобетона сплошного сечения - первой и третьей серии, и полого сечения - второй и четвертой серий (см. рис. 3).

Уместно отметить, что деформативность конструкций из высокопрочных бетонов существенно меньше, чем конструкций из обычных бетонов, что подтверждается и существенно большим модулем деформации таких бетонов. Для испытанных конструкций модуль деформаций высокопрочного бетона класса 110 -130 составлял 4,6 – 4,8 МПа. Это качественно меняет характер трещинообразования в таких конструкциях, когда как уже отмечалось образуется одна или несколько пространственных трещин, в отличии от трещинообразования в конструкциях из обычного бетона – когда при рассматриваемом напряженном состоянии образуется целая сеть трещин в зоне совместного действия крутящего и изгибающего моментов (см., например, опыты [4,7]).

Специфика такого деформирования конструкции из высокопрочного бетона подтверждается и характером диаграмм «нагрузка-прогиб» и «нагрузка-угол поворота» (рис 4.).

Силовое сопротивление конструкции до образования трещин имеет характер близкий к линейному, а уровень нагрузки трещинообразования составлял 0,75-0,85 от разрушающей – в конструкциях сплошного сечения и 0,6-0,7 от разрушающей – в конструкциях коробчатого и кольцевого сечения (см. рис. 4 и рис. 5). Это свидетельствует о том, что стадия II работы железобетонных конструкций из высокопрочного бетона значительно короче, чем в конструкциях из обычных бетонов и, следовательно, критерии несущей способности конструкций из высокопрочного бетона требуют соответствующей корректировки. Анализируя полученные опытные диаграммы «нагрузка-прогиб» и «нагрузка-угол поворота» до уровня трещинообразования ($T_{crc}+M_{crc}$) происходит незначительно так, в опытных конструкциях сплошного квадратного и круглого сечения снижение начальной жесткости составляло - 20-24%, а в конструкциях коробчатого и кольцевого сечений – 35-40%. Образование пространственной трещины в опытных конструкциях балок вызывает резкий рост раскрытия трещин, деформации в арматуре в сечении с трещиной, нарастание прогибов и углов поворота. Из этого следует вывод о том, что в конструкциях из высокопрочного железобетона пластические деформации до образования трещин значительно меньше, чем в конструкциях из обычного железобетона. Образование практически единичной или прогрессирующей трещины вызывает резкий рост деформаций в растянутой арматуре и поперечных стержнях при незначительном увеличении нагрузки после образования трещин свидетельствует о необходимости корректировки традиционной модели расчета жесткости сечений с трещинами и соответственно параметров расчетной модели ψ_s и ψ_b .

Выводы

1. Приведенные результаты испытаний и анализ трещиностойкости и ширины раскрытия трещин в опытных конструкциях из высокопрочного железобетона позволили выявить особенности сопротивления таких конструкций при кручении с изгибом.

2. Экспериментально установлено, что в конструкциях из высокопрочного железобетона сплошного и полого сечений при кручении с изгибом образуется одна или несколько

трещин, развивающихся по пространственной поверхности. В случае образования нескольких трещин, в одной из них по мере увеличения нагрузки происходит прогрессирующее раскрытие по которой происходит затем разрушение.

3. Используемые для конструкции из обычного бетона расчетные модели по определению ширины раскрытия трещин при кручении с изгибом, в случае конструкций из высокопрочного бетона требует корректировки основных расчетных параметров теории железобетона, в их числе ψ_s , ψ_b и l_{csc} .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колчунов Вл. И., Сальников А.С. Экспериментальные исследования трещинообразования железобетонных конструкций при кручении с изгибом // Строительство и реконструкция. 2016. № 3(65). С. 24–32.
2. Salnikov A., Kolchunov Vl., Yakovenko I. The computational model of spatial formation of cracks in reinforced concrete constructions in torsion with bending // Applied Mechanics and Materials. Vols. 725–726 (2015), pp 784–789.
3. Iakovenko I., Kolchunov Vl. The development of fracture mechanics hypotheses applicable to the calculation of reinforced concrete structures for the second group of limit states // Journal of Applied Engineering Science. 2017. Vol. 3. Pp. 366–375.
4. Морозов В.И., Бахотский И.В. К расчету фиброжелезобетонных конструкций, подверженных совместному воздействию кручения с изгибом // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 5. URL: <http://www.science-education.ru/111-10408>.
5. Khaldoun Rahal. Combined Torsion and Bending in Reinforced and Prestressed Concrete beams Using Simplified Method for Combined Stress-Resultants // ACI Structural Journal. 2007. Vol. 104. No 4. Pp. 402–411.
6. Vishnu H. Jariwala, Paresh V. Patel, Sharadkumar P. Purohit. Strengthening of RC Beams subjected to Combined Torsion and Bending with GFRP Composites // Procedia Engineering. 2013. Vol. 51. Pp. 282–289.
7. Родевич В.В., Арзамасцев С.А. Экспериментальные исследования железобетонных элементов, работающих на изгиб с кручением, при статическом и кратковременном динамическим воздействиях // Жилищное строительство. 2014. №10. С. 15-18.
8. Травуш В.И., Карпенко Н.И., Колчунов Вл.И., Каприлов С.С., Демьянов А.И., Конорев А.В. Результаты экспериментальных исследований конструкций квадратного и коробчатого сечений из высокопрочного бетона при кручении с изгибом // Строительство и реконструкция. 2018. №6. С. 32-43.
9. Травуш В.И., Карпенко Н.И., Колчунов Вл.И., Каприлов С.С., Демьянов А.И., Конорев А.В. Основные результаты экспериментальных исследований железобетонных конструкций из высокопрочного бетона В100 круглого и кольцевого сечений при кручении с изгибом // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. №15(1). С.51-61.
10. Колчунов В.И., Демьянов А.И. Неординарная задача о раскрытии трещин в железобетоне // Инженерно-строительный журнал. 2019. № 4(88). С. 60–69. DOI: 10.18720/MCE.88.6.
11. Колчунов Вл.И., Демьянов А.И., Наумов Н.В. Теория "растворения" и "конденсации" физико-геометрических характеристик поперечного сечения произвольной формы при кручении стержней // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. №15(4), С.261-270.
12. Колчунов В.И., Колчунов Вл.И., Федорова Н.В. Деформационные модели железобетона при особых воздействиях // Промышленное и гражданское строительство. 2018. №8. С.54-60.

REFERENCES

1. Kolchunov VL. I., Salnikov A. S. Eksperimental'nyye issledovaniya treshchinoobrazovaniya zhelezobetonnykh konstruktsiy pri kruchenii s izgibom [Experimental studies of crack formation of reinforced concrete structures under torsion with bending]. Stroitel'stvo i rekonstruktsiya. 2016. No. 3 (65). Pp. 24-32.
2. Salnikov A., Kolchunov Vl., Yakovenko I. the computational model of spatial formation of cracks in reinforced concrete constructions in torsion with bending. Applied Mechanics and Materials. Vols. 725-726 (2015). Pp. 784-789.
3. Iakovenko I., Kolchunov Vl. The development of fracture mechanics hypotheses applicable to the calculation of reinforced concrete structures for the second group of limit states. Journal of Applied Engineering Science. 2017. Vol. 3. Pp. 366-375.
4. Morozov V. I., Bakhotsky I. V. To the calculation of fiber-reinforced concrete structures exposed to the joint effect of torsion with bending. Modern problems of science and education. 2013. No. 5. <http://www.science-education.ru/111-10408>.
5. Khaldoun Rahal. Combined Torsion and Bending in Reinforced and Prestressed Concrete beams Using Simplified Method for Combined Stress-Resultants. ACI Structural Journal. 2007. Vol. 104. No 4. Pp. 402-411.

6. Vishnu H. Jariwala, Paresh V. Patel, Sharadkumar P. Purohit. Strengthening of RC Beams subjected to Combined Torsion and Bending with GFRP Composites. *Procedia Engineering*. 2013. Vol. 51. Pp. 282-289.
7. Rodevich V. V., Arzamastsev S. A. Eksperimental'nyye issledovaniya zhelezobetonnykh elementov, rabotayushchikh na izgib s krucheniyem, pri staticheskem i kratkovremennom dinamicheskem vozdeystviyakh [Experimental studies of reinforced concrete elements working on bending with torsion, under static and short-term dynamic effects]. *Zhilishchnoye stroitel'stvo*. 2014. No. 10. Pp. 15-18.
8. Travush V. I., Karpenko N. I., Kolchunov VL.I., Kaprielov S. S., Demyanov A. I., Konorev A.V. Rezul'taty eksperimental'nykh issledovaniy konstruktsiy kvadratnogo i korobchatogo secheniy iz vysokoprochnogo betona pri kruchenii s izgibom [Results of experimental studies of square and box-section structures made of high-strength concrete under torsion with bending]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2018. No. 6. Pp. 32-43.
9. Travush V. I., Karpenko N. I., Kolchunov VL.I., Kaprielov S. S., Demyanov A. I., Konorev A.V. Osnovnyye rezul'taty eksperimental'nykh issledovaniy zhelezobetonnykh konstruktsiy iz vysokoprochnogo betona B100 kruglogo i kol'tsevogo secheniy pri kruchenii s izgibom [Main results of experimental studies of reinforced concrete structures made of high-strength concrete in the form of round and ring sections during torsion with bending]. *Construction mechanics of engineering structures and structures*. 2019. No. 15(1). Pp. 51-61.
10. V. I. Kolchunov, A. I. Dem'yanov The modeling method of discrete cracks and rigidity in reinforced concrete. *Magazine of Civil Engineering*. 2019, 88(4), Pp.60-69. DOI: 10.18720/MCE.88.6.
11. Kolchunov VL.I., Demyanov A. I., Naumov N. V. Teoriya "rastvorenija" i "kondensatsii" fiziko-geometricheskikh kharakteristik poperechnogo secheniya proizvol'noy formy pri kruchenii sterzhney [Theory of "dissolution" and "condensation" of physical and geometric characteristics of the cross-section of an arbitrary shape during torsion of rods]. *Construction mechanics of engineering structures and structures*. 2019. No. 15(4). Pp. 261-270.
12. Kolchunov V. I., Kolchunov VL.I., Fedorova N. V. Deformatsionnyye modeli zhelezobetona pri osobykh vozdeystviyakh [Deformation models of reinforced concrete under special influences]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo*. 2018. No. 8. Pp. 54-60.

Информация об авторах:

Демьянов Алексей Иванович

ФГБОУ ВО «ЛГТУ», г. Курск, Россия,
канд. техн. наук, доцент кафедры уникальных зданий и сооружений

E-mail: speccompany@gmail.com

Information about authors:

Demianov Alexey I.

Southwest State University, Kursk, Russia,
Candidate of tech. science, associated professor of the department of unique buildings and structures,
E-mail: speccompany@gmail.com

ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛОТНОСТИ ВЕРОЯТНОСТИ ПРЕДЕЛЬНОЙ ПОПЕРЕЧНОЙ СИЛЫ В ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

ДЕМИНОВ П.Д.

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

Аннотация. Прочностные параметры, определяющие предельную несущую изгибающего железобетонного элемента по наклонному сечению от действия поперечной силы, носят явный случайный характер. Для того чтобы построить плотность распределения вероятности предельной поперечной силы, нужно найти параметры этого распределения. Если предположить, что распределение предельной поперечной силы близко к гауссовому закону, то достаточно знать математическое ожидание и дисперсию этого распределения плотности вероятности. Построены вероятностные характеристики предельной поперечной силы в железобетонном изгибающем элементе. Предельная поперечная сила является нелинейной функцией прочности бетона и арматуры, которые рассматриваются как случайные нормально распределенные величины. Показано, что нелинейная функция предельной поперечной силы может быть линеаризована путем разложения в ряд Тейлора в окрестностях математических ожиданий прочности бетона на растяжение и предела текучести арматуры с достаточной для практических расчетов точностью. Плотность распределения предельной поперечной силы при этом можно считать подчиняющейся нормальному закону.

Ключевые слова: математическое ожидание, дисперсия, предельная поперечная сила, плотность распределения вероятности, железобетонный элемент.

ESTIMATION OF THE PROBABILISTIC CHARACTERISTICS OF THE PROBABILITY DENSITY OF THE ULTIMATE TRANSVERSE FORCE IN BENDING CONCRETE ELEMENTS

DEMINOV P.D.

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

Abstract. Strength parameters that determine the ultimate load-bearing of a bent reinforced concrete element along an oblique section from the action of a transverse force are clearly random. In order to construct the probability density distribution of the ultimate transverse force, it is necessary to find the parameters of this distribution. If we assume that the distribution of the ultimate transverse force is close to the Gaussian law, then it suffices to know the mathematical expectation and variance of this probability density distribution. The probabilistic characteristics of the ultimate transverse force in a reinforced concrete bending element are constructed. The ultimate transverse force is a nonlinear function of the strength of concrete and reinforcement, which are considered as random, normally distributed quantities. It is shown that the nonlinear function of the ultimate transverse force can be linearized by expanding in a Taylor series near the mathematical expectations of the tensile strength of concrete and the yield strength of the reinforcement with sufficient accuracy for practical calculations. The distribution density of the ultimate transverse force in this case can be considered obeying the normal law.

Keywords: expected value, dispersion, ultimate transverse force, probability density, reinforced concrete element.

Введение

Для обеспечения надёжной и безопасной работы железобетонных конструкций необходимо знать распределения параметров, необходимые для оценки несущей способности. В ряде работ представлены подходы для определения надёжности и риска [1-4].

В работе [5] были получены статистические характеристики распределения предельных изгибающих моментов в железобетонной балке со случайными прочностными характеристиками материалов; в данной работе рассмотрены вероятностные характеристики распределения предельной поперечной силы.

Прочностные параметры, определяющие предельную несущую изгибающего железобетонного элемента по наклонному сечению от действия поперечной силы, носят явный случайный характер. Для того чтобы построить плотность распределения вероятности предельной поперечной силы, нужно найти параметры этого распределения. Если предположить, что распределение предельной поперечной силы близко к гауссовому закону, то достаточно знать математическое ожидание и дисперсию этого распределения плотности вероятности.

Методика

Из условия равновесия железобетонного изгибающего элемента в сечении с наклонной трещиной, имеющей проекцию с наименьшей несущей способностью, получаем несущую способность изгибающего элемента по поперечной силе, обеспечивающую сопротивлением бетона сжатой зоны и сопротивлением хомутов, пересекаемых трещиной, в виде:

$$Q_{sw} = 2 \sqrt{\frac{\varphi_b b h_0^2 \tilde{R}_{bt} \varphi_{sw} R_{sw} A_{sw}}{s_w}}, \quad (1)$$

где $\varphi_b = 1,5$, $\varphi_{sw} = 0,75$ - коэффициенты, если походить строго, являющиеся случайными величинами, чем в дальнейших выкладках мы пренебрежём, чтобы упростить расчётный аппарат, и будем считать их детерминированными величинами; остальные обозначения в (1) и далее соответствуют [6].

Несущая способность железобетонного изгибающего элемента является функцией двух случайных нормально распределённых аргументов: прочности бетона на растяжение \tilde{R}_{bt} с математическим ожиданием $\langle R_{bt} \rangle$ и дисперсией $D_{R_{bt}}$ и прочности арматуры хомутов $\tilde{R}_{sw} = \gamma_{s1} \tilde{\sigma}_t$ с математическим ожиданием предела текучести арматуры $\langle \sigma_t \rangle$ и его дисперсией D_{σ_t} .

Перепишем выражение (1) следующим образом:

$$Q_{sw}(\tilde{R}_{bt}, \tilde{\sigma}_t) = 2 \sqrt{\frac{\varphi_b b h_0^2 \tilde{R}_{bt} \gamma_{s1} \tilde{\sigma}_t \varphi_{sw} A_{sw}}{s_w}}, \quad (2)$$

Как видно из выражения (2) зависимость несущей способности железобетонного элемента по наклонному сечению от прочностей бетона и арматуры носит нелинейный характер. Для того чтобы найти вероятностные характеристики нелинейной функции двух случайных переменных $f(x, y)$, воспользуемся линеаризацией этой функции путём разложения её в ряд Тейлора [7] в окрестности некоторой точки x_0, y_0 , тогда в операторной форме без учета остаточного члена разложение запишется в виде [8]:

$$f(x, y) \approx \sum_{k=0}^n \frac{T^{(k)} f(x_0, y_0)}{k!}, \quad (3)$$

где T – дифференциальный оператор вида

$$T = (x - x_0) \frac{\partial}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial}{\partial y}. \quad (4)$$

В нашем случае будем линеаризовать функцию предельной поперечной силы $Q_{sw}(\tilde{R}_{bt}, \tilde{\sigma}_t)$ в окрестностях математических ожиданий прочностей бетона и арматуры, сохраняя в разложении (3) члены не выше второго порядка:

$$\begin{aligned} Q_{sw} &\approx Q_{sw}(< R_{bt} >, < \sigma_t >) + \\ &+ \frac{\partial Q_{sw}(< R_{bt} >, < \sigma_t >)}{\partial R_{bt}} (R_{bt} - < R_{bt} >) + \frac{\partial Q_{sw}(< R_{bt} >, < \sigma_t >)}{\partial \sigma_t} (\sigma_t - < \sigma_t >) + \\ &+ \frac{1}{2} \left[\frac{\partial^2 Q_{sw}(< R_{bt} >, < \sigma_t >)}{\partial R_{bt}^2} (R_{bt} - < R_{bt} >)^2 + \frac{\partial^2 Q_{sw}(< R_{bt} >, < \sigma_t >)}{\partial \sigma_t^2} (\sigma_t - < \sigma_t >)^2 \right] + \\ &+ \frac{\partial^2 Q_{sw}(< R_{bt} >, < \sigma_t >)}{\partial R_{bt} \partial \sigma_t} (R_{bt} - < R_{bt} >) (\sigma_t - < \sigma_t >). \end{aligned} \quad (5)$$

Применив способы определения числовых характеристик линейных функций [9], для математического ожидания предельной поперечной силы будем иметь:

$$\begin{aligned} < Q_{sw} > &\approx Q_{sw}(< R_{bt} >, < \sigma_t >) + \\ &+ \frac{1}{2} \left[\frac{\partial^2 Q_{sw}(< R_{bt} >, < \sigma_t >)}{\partial R_{bt}^2} D_{R_{bt}} + \frac{\partial^2 Q_{sw}(< R_{bt} >, < \sigma_t >)}{\partial \sigma_t^2} D_{\sigma_t} \right] + \\ &+ \frac{\partial^2 Q_{sw}(< R_{bt} >, < \sigma_t >)}{\partial R_{bt} \partial \sigma_t} K_{R_b \sigma_t}. \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь $K_{R_b \sigma_t}$ – корреляционный момент случайных величин \tilde{R}_{bt} и \tilde{R}_{sw} ; т.к. прочность бетона и прочность арматуры являются не только некоррелированными случайными величинами, но и независимыми, то в дальнейшем принимаем $K_{R_b \sigma_t} = 0$.

Подставляя в уравнение (6) функцию поперечной силы (2), получаем для математического ожидания предельной поперечной силы:

$$\begin{aligned} < Q_{sw} > &\approx 2 \sqrt{\frac{\varphi_b b h_0^2 < R_{bt} > \gamma_{s1} < \sigma_t > \varphi_{sw} A_{sw}}{s_w}} - \\ &- \frac{1}{4} \sqrt{\frac{\varphi_b b h_0^2 \varphi_{sw} A_{sw}}{s_w}} \left(\sqrt{\frac{\gamma_{s1} < \sigma_t >}{< R_{bt} >^3}} D_{R_{bt}} + \sqrt{\frac{< R_{bt} >}{\gamma_{s1} < \sigma_t >^3}} D_{\sigma_t} \right). \end{aligned} \quad (7)$$

Дисперсия предельной поперечной силы запишется в виде:

$$\begin{aligned} D_{Q_{sw}} &\approx \left[\frac{\partial Q_{sw}(< R_{bt} >, < \sigma_t >)}{\partial R_{bt}} \right]^2 D_{R_{bt}} + \left[\frac{\partial Q_{sw}(< R_{bt} >, < \sigma_t >)}{\partial \sigma_t} \right]^2 D_{\sigma_t} + \\ &+ \frac{1}{4} \left\{ \left[\frac{\partial^2 Q_{sw}(< R_{bt} >, < \sigma_t >)}{\partial R_{bt}^2} \right]^2 [\mu_4(R_{bt}) - D_{R_{bt}}] + \right. \\ &+ \left. \left[\frac{\partial^2 Q_{sw}(< R_{bt} >, < \sigma_t >)}{\partial \sigma_t^2} \right]^2 [\mu_4(\sigma_t) - D_{\sigma_t}] \right\} + \left[\frac{\partial^2 Q_{sw}(< R_{bt} >, < \sigma_t >)}{\partial R_{bt} \partial \sigma_t} \right]^2 D_{R_{bt}} D_{\sigma_t} + \\ &+ \frac{\partial Q_{sw}(< R_{bt} >, < \sigma_t >)}{\partial R_{bt}} \cdot \frac{\partial^2 Q_{sw}(< R_{bt} >, < \sigma_t >)}{\partial R_{bt}^2} \mu_3(R_{bt}) + \\ &+ \frac{\partial Q_{sw}(< R_{bt} >, < \sigma_t >)}{\partial \sigma_t} \cdot \frac{\partial^2 Q_{sw}(< R_{bt} >, < \sigma_t >)}{\partial \sigma_t^2} \mu_3(\sigma_t), \end{aligned} \quad (8)$$

где $\mu_3(R_{bt})$, $\mu_3(\sigma_t)$ и $\mu_4(R_{bt})$, $\mu_4(\sigma_t)$ – третий и четвертый центральные моменты случайных величин – прочности бетона на растяжение \tilde{R}_{bt} и предела текучести арматуры $\tilde{\sigma}_t$.

Учитывая, что \tilde{R}_{bt} и $\tilde{\sigma}_t$ распределены нормально, то третий центральные моменты будут равны нулю:

$$\mu_3(R_{bt}) = \mu_3(\sigma_t) = 0, \quad (9)$$

а четвертые центральные моменты будут равны:

$$\mu_4(R_{bt}) = 3D_{R_{bt}} \text{ и } \mu_4(\sigma_t) = 3D_{\sigma_t}. \quad (10)$$

Подставляя выражения (9) и (10) в выражение (8) получаем после несложных упрощений дисперсию предельной поперечной силы в следующем виде:

$$D_{Q_{sw}} \approx \left[\frac{\partial Q_{sw}(< R_{bt} >, < \sigma_t >) }{\partial R_{bt}} \right]^2 D_{R_{bt}} + \left[\frac{\partial Q_{sw}(< R_{bt} >, < \sigma_t >) }{\partial \sigma_t} \right]^2 D_{\sigma_t} + \\ + \frac{1}{2} \left\{ \left[\frac{\partial^2 Q_{sw}(< R_{bt} >, < \sigma_t >) }{\partial R_{bt}^2} \right]^2 D_{R_{bt}}^2 + \right. \\ \left. + \left[\frac{\partial^2 Q_{sw}(< R_{bt} >, < \sigma_t >) }{\partial \sigma_t^2} \right]^2 D_{\sigma_t}^2 \right\} + \left[\frac{\partial^2 Q_{sw}(< R_{bt} >, < \sigma_t >) }{\partial R_{bt} \partial \sigma_t} \right]^2 D_{R_{bt}} D_{\sigma_t}. \quad (11)$$

Подставляя в выражение (11) выражение для поперечной силы (2), получаем для дисперсии предельной поперечной силы следующее выражение:

$$D_{Q_{sw}} \approx \frac{\varphi_b b h_0^2 A_{sw} \gamma_{s1} \varphi_{sw}}{S_w} \left[\frac{< \sigma_t >}{< R_{bt} >} D_{R_{bt}} + \frac{< R_{bt} >}{< \sigma_t >} D_{\sigma_t} + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \left(\frac{< \sigma_t >}{< R_{bt} >^3} D_{R_{bt}}^2 + \frac{< R_{bt} >}{< \sigma_t >^3} D_{\sigma_t}^2 \right) + \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{< R_{bt} > < \sigma_t >} D_{R_{bt}} D_{\sigma_t} \right]. \quad (12)$$

Оценим влияние нелинейных членов в выражениях (7) и (12) на точность вычисления математического ожидания и дисперсии предельной поперечной силы.

Действующие нормативные документы допускают принимать прочность бетона и арматуры, распределёнными по нормальному закону. Тогда, как показано в [10], математические ожидания $< R_{bt} >$, $< \sigma_t >$, дисперсии $D_{R_{bt}}$, D_{σ_t} , коэффициенты вариации $v_{R_{bt}}$, v_{σ_t} прочности бетона на растяжение и предела текучести арматуры можно записать в следующем виде:

$$< R_{bt} > = R_{bt,n} \frac{\gamma_{R_{bt}}^p - \frac{\gamma_{R_{bt}}^n}{\gamma_{bt}}}{\gamma_{R_{bt}}^p - \gamma_{R_{bt}}^n}, \quad D_{R_{bt}} = \left(R_{bt,n} \frac{1 - \frac{1}{\gamma_{bt}}}{\gamma_{R_{bt}}^p - \gamma_{R_{bt}}^n} \right)^2, \\ < \sigma_t > = R_{sn} \frac{\gamma_{\sigma_t}^p - \frac{\gamma_{\sigma_t}^n}{\gamma_s}}{\gamma_{\sigma_t}^p - \gamma_{\sigma_t}^n}, \quad D_{\sigma_t} = \left(R_{sn} \frac{1 - \frac{1}{\gamma_s}}{\gamma_{\sigma_t}^p - \gamma_{\sigma_t}^n} \right)^2, \\ v_{R_{bt}} = \frac{1 - \frac{1}{\gamma_{bt}}}{\gamma_{R_{bt}}^p - \frac{\gamma_R^n}{\gamma_{bt}}}, \quad v_{\sigma_t} = \frac{1 - \frac{1}{\gamma_s}}{\gamma_{\sigma_t}^p - \frac{\gamma_{\sigma_t}^n}{\gamma_s}}, \quad (11)$$

где $R_{bt,n}$, R_{sn} – нормативное значение кубиковой прочности бетона и нормативное сопротивление арматуры;

$\gamma_{R_{bt}}^n, \gamma_{R_{bt}}^p, \gamma_{\sigma_t}^n, \gamma_{\sigma_t}^p$ – число средних квадратических отклонений кубиковой прочности бетона и предела текучести арматуры, позволяющих достичь требуемых обеспеченностей нормативных и расчетных значений прочностей. Для нормального распределения вероятностей для нормативных значений прочностных характеристик $\gamma_{R_{bt}}^n = \gamma_{\sigma_t}^n = 1,645$, а для расчетных значений $\gamma_{R_{bt}}^p = \gamma_{\sigma_t}^p = 3$;

γ_{bt}, γ_s – коэффициенты надёжности по бетону и арматуре, они принимаются в соответствии с действующими нормативными документами [5].

Для примера рассмотрим железобетонную балку размером $b = 0,2$ м, $h_0 = 0,365$ м, $A_{sw} = 0,566 \cdot 10^{-4}$ м², $s_w = 0,15$ м, $a_1 = 1,5$; бетон В20 с $R_{bt,n} = 1,35$ МПа, $\gamma_{bt} = 1,3$, $\langle R_{bt} \rangle = 1,76$ МПа, $D_{R_{bt}} = 0,058$ МПа²; арматура А300 с $R_{sn} = 300$ МПа, $\gamma_{s1} = 0,8$, $\gamma_s = 1,1$, $\langle \sigma_t \rangle = 341,9$ МПа, $D_{\sigma_t} = 403$ МПа². Тогда для линейного члена математического ожидания предельной поперечной силы имеем $\langle Q_{sw} \rangle = 128$ кН, нелинейные члены равны 0,419 кН, что составляет 0,33%. Для дисперсии предельной поперечной силы имеем: только линейные члены равны $D_{Q_{sw}} = 133$ кН², нелинейные члены равны 1,15 кН², что составляет 0,86%.

Таким образом, для практических целей нелинейными членами разложения можно пренебречь и оставить только линейные члены ряда Тейлора, тогда математическое ожидание предельной поперечной силы приобретает вид:

$$\langle Q_{sw} \rangle = 2 \sqrt{\frac{\varphi_b b h_0^2 \langle R_{bt} \rangle \gamma_{s1} \langle \sigma_t \rangle \varphi_{sw} A_{sw}}{s_w}}, \quad (12)$$

а дисперсия предельной поперечной силы будет иметь вид:

$$D_{Q_{sw}} = \frac{\varphi_b b h_0^2 \gamma_{s1} \varphi_{sw} A_{sw}}{s_w} \left(\frac{\langle \sigma_t \rangle}{\langle R_{bt} \rangle} D_{R_{bt}} + \frac{\langle R_{bt} \rangle}{\langle \sigma_t \rangle} D_{\sigma_t} \right). \quad (13)$$

Учитывая, что для любой линейной функции случайных аргументов, имеющих нормальные распределения, на выходе получается случайная величина, распределённая тоже нормально, то после линеаризации плотность распределения предельной поперечной силы в изгибаемом элементе можно принять гауссовой и записать в виде:

$$p_{Q_{sw}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_{Q_{sw}}}} \exp \left[-\frac{(Q_{sw} - \langle Q_{sw} \rangle)^2}{2D_{Q_{sw}}} \right]. \quad (14)$$

Выводы

Получены статистические параметры распределения предельной поперечной силы в изгибаемом железобетонном элементе, прочности бетона и арматуры которой являются случайными величинами. Показано, что функцию предельной поперечной силы в изгибаемом железобетонном элементе можно линеаризовать без ущерба для точности вероятностных расчетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тамразян А.Г., Фаликман В.Р. Основные требования к проектированию железобетонных конструкций по модельному кодексу ФИБ // Строительство и реконструкция. 2016. № 3 (65). С. 71-77.
2. Тамразян А.Г. Оценка риска и надежности несущих конструкций и ключевых элементов – необходимое условие безопасности зданий и сооружений // Вестник ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко "Исследования по теории сооружений". 2009. № 1. С. 160-171.
3. Тамразян А. Г. [и др.] Снижение рисков в строительстве при чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера. под общ. ред. Тамразяна А. Г. М.: Издательство АСВ, 2012. 304 с.
4. Тамразян А.Г. Расчет элементов конструкций при заданной надежности и нормальному распределении нагрузки и несущей способности // Вестник МГСУ. 2012. № 10. С. 109-115.

5. Деминов П.Д. К оценке статистических параметров железобетонной балки на упругом основании, имеющем стохастические характеристики // Строительство и реконструкция. № 5. 2018. С. 5-12.
6. СП 52-101-2003 Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры, М.: ГУП "НИИЖБ", ФГУП ЦПП, 2004.
7. Пискунов Н.С. Дифференциальное и интегральное исчисление. В 2 т. СПб.: Мирил., Гл. ред. физ.-мат.лит., 1996. Т.1, С. 128-131.
8. Кудрявцев Л.Д. Краткий курс математического анализа. В 2 т. Т.2. Дифференциальное и интегральное исчисление функций многих переменных. Гармонический анализ. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. С. 172-173.
9. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1969. С. 255-262.
10. Рекомендации по оценке и обеспечению надежности транспортных сооружений. М.: ЦНИИС Минтрансстроя СССР, 1989.

REFERENCES

1. Tamrazyan A.G., Falikman V.R. Osnovnyye trebovaniya k proyektirovaniyu zhelezobetonnykh konstruktsiy po model'nomu kodeksu FIB [Basic requirements for the design of reinforced concrete structures according to the FIB model code]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2016. No. 3 (65). Pp. 71-77.
2. Tamrazyan A.G. Otsenka risika i nadezhnosti nesushchikh konstruktsiy i klyuchevykh elementov - ne-obkhodi-moye usloviye bezopasnosti zdaniy i sooruzheniy [An assessment of the risk and reliability of load-bearing structures and key elements is a necessary condition for the safety of buildings and structures]. *Vestnik TSNIISK im. V.A. Kucherenko "Issledovaniya po teo-rii sooruzheniy"*. 2009. No. 1. Pp. 160-171.
3. Tamrazyan A. G. et al. Snizheniye riskov v stroitel'stve pri chrezvychaynykh situatsiyakh prirodnogo i tekhnogennogo kharaktera [Risk reduction in construction during natural and man-made emergencies]. Under the general. ed. Tamrazyana A. G. Moscow: Publishing ASV, 2012
4. Tamrazyan A.G. Raschet elementov konstruktsiy pri zadannoy nadezhnosti i normal'nom raspredele-nii nagruzki i nesushchey sposobnosti [Calculation of structural elements for a given reliability and normal distribution of load and bearing capacity]. *Vestnik MGSU*. 2012. No. 10. Pp. 109-115.
5. Deminov P.D. K otsenke statisticheskikh parametrov zhelezobetonnoy balki na uprugom osnovanii, imeyushchem stokhasticheskiye kharakteristiki [On the estimation of statistical parameters of reinforced concrete beams on an elastic foundation having stochastic characteristics]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2018. No. 5. Pp. 5-12.
6. Russian Building Code SP 52-101-2003 Betonnyye i zhelezobetonnyye konstruktsii bez predvaritel'nogo napryazheniya armatury [Concrete and reinforced concrete structures without prestressing reinforcement]. Moscow: GUP "NIIZhB", FSUE TsPP, 2004.
7. Piskunov N.S. Differentsial'noye i integral'noye ischisleniye [Differential and integral calculus]. In 2 Vols. St. Petersburg: Mithril., Gl. red. fiz.-mat. lit, 1996. Vol.1, Pp. 128-131.
8. Kudryavtsev L.D. Kratkiy kurs matematicheskogo analiza [Short course of mathematical analysis]. In 2 Vols. Vol. 2. Differentsial'noye i integral'-noye ischisleniye funktsiy mnogikh peremennykh. Garmonicheskiy analiz [Differential and integral calculus of functions of many variables. Harmonic analysis]. Moscow: FIZMATLIT, 2005 . Pp. 172-173.
9. Ventzel E.S. Teoriya veroyatnostey [Probability Theory]. Moscow: Nauka, Gl. red. fiz.-mat. lit., 1969, - S. 255-262.
10. Rekomendatsii po otsenke i obespecheniyu nadezhnosti transportnykh sooruzheniy [Recommendations for assessing and ensuring the reliability of transport facilities]. Moscow: Central Scientific and Research Institute of the Ministry of Transport of the USSR, 1989.

Информация об авторах:

Дёминов Павел Дмитриевич

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,

Москва, Россия,

канд. техн. наук, доцент

E-mail: p-deminov@mail.ru

Information about authors:

Deminov Pavel D.

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

Candidate tecn. Science, docent

E-mail: p-deminov@mail.ru

К ИСПЫТАНИЮ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СВАРНЫХ СТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПАНЕЛЬНЫХ ЗДАНИЙ

ЛЮБЛИНСКИЙ В.А.

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

Аннотация. В данной работе было проведено экспериментальное исследование сварного обетонированного стыка на сдвиговое усилие. Испытание проводилось только на сдвиг, поскольку основное статическое назначение вертикальных стыковых соединений панелей – обеспечить восприятие сдвигающих сил, возникающих в стыках при совместной работе сопрягаемых стен. Объектом исследования является фрагмент вертикального стенового соединения 125 серии крупнопанельных жилых зданий, толщина которого составляла 160мм, а общая высота – 550мм. В результате проведенных экспериментальных исследований определено напряженно-деформированное состояние вертикального стыкового соединения и предложена аппроксимирующая зависимость деформации сварного стыка от усилий сдвига. Результаты испытаний могут быть использованы при расчете несущих систем крупнопанельных зданий с учетом нелинейной податливости сварных стыков.

Ключевые слова: связи сдвига, податливость связей, стыковые соединения, крупнопанельные здания.

TO TEST VERTICAL WELDED BUTT JOINTS OF PANEL BUILDINGS

LYUBLINSKIY V.A.

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

Abstract. In this work, an experimental study of the welded concreted joint on the shear force was carried out. The test was carried out only for shear, since the main static purpose of vertical butt joints of panels is to ensure the perception of shear forces arising in the joints when the mating walls work together. The object of the study was a fragment of wall vertical connection 125 a series of large-panel residential buildings, the thickness of which was 160 mm and the total height is 550mm. In result of experimental research defined stress-strain state of vertical butt joints and proposed approximating the dependence of the deformation of the weld joint from shear forces. The test results can be used in the calculation of load-bearing systems of largt-panel buildings taking into account the nonlinear compliance of welded joints.

Keywords: shear bonds, deformability of connections, butt joints, large-panel buildings.

Введение

Развитие новых технологий возведения зданий, появление новых программных комплексов и методик пространственного расчета зданий, повышение рыночного спроса привели к новому этапу роста крупнопанельного домостроения.

Для повышения уровня безопасности крупнопанельных зданий необходимо как на стадии проектирования, так и на стадии эксплуатации учесть все факторы, которые могут возникать в несущих конструкциях [1-6].

Панельное здание представляет собой набор тонкостенных вертикальных несущих конструкций, объединенных в пространственную систему дисками перекрытий, горизонтальными и вертикальными связями. Одной из задач при возведении панельных зданий является обеспечение достаточной несущей способности стыковых соединений. Стыковые соединения панелей, работающие на сдвиг, и именуемые связями сдвига, являются наиболее

ответственными элементами несущей системы панельного здания. Благодаря стыковым соединениям панельное здание представляет собой весьма жесткую и прочную пространственную систему, способную противостоять вертикальным, горизонтальным и сейсмическим нагрузкам, неравномерным деформациям основания, климатическим температурно-влажностным и аварийным воздействиям. К наиболее распространенным связям сдвига относится: платформенный стык, бетонная шпонка, перемычки или надпроемные пространства и сварка закладных деталей. Одним из самых часто используемых соединений стеновых панелей в существующей крупнопанельной застройке является сварной обетонированный стык. В новом панельном домостроении появляются и новые конструкции стыков [7,8]. Поскольку панельная застройка предыдущих серий составляет значительную часть жилого фонда РФ, изучение податливости сварного межпанельного соединения имеет немаловажное значение. По вертикальным межпанельным соединениям, таким как бетонная шпонка и другие бесварные стыки, проведено большое количество исследований [9-14], но по сварке закладных деталей экспериментальные данные достаточно ограничены.

Основная задача работы – проанализировать влияние нагрузки на деформации сварного стыка, установить схему разрушения исследуемого соединения.

Материалы и методы

В данной работе объектом исследования является фрагмент вертикального стенового соединения 125 серии крупнопанельный жилых домов. Стеновые панели в данной серии соединялись между собой посредством сварки закладных деталей. Для исследования были изготовлены конструкции опытных образцов, которые в точности соответствовали основному типу вертикального межпанельного соединения, принимаемого при проектировании крупнопанельных зданий 125 серии.

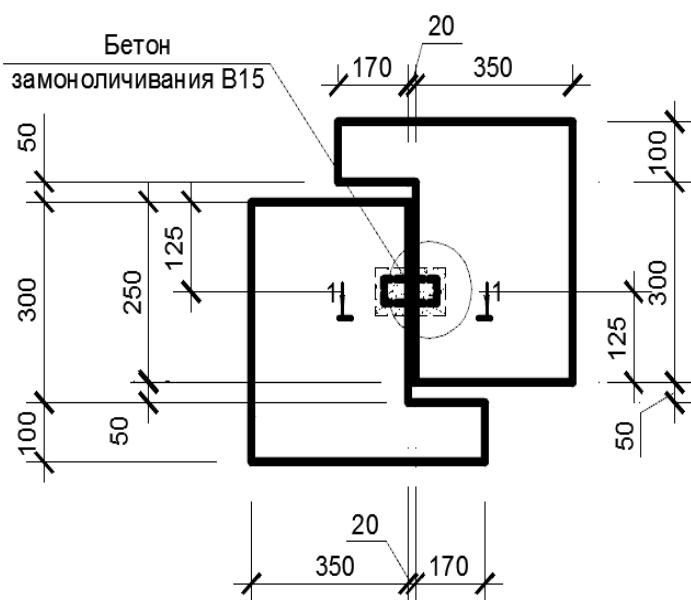


Рисунок 1 – Геометрические характеристики опытного образца

Конструкция образцов представляет собой две Г-образные панели толщиной 160 мм из тяжелого бетона В20 (см. рисунок 1)

Общая высота составляет 550 мм. Панели имеют конструктивное двустороннее армирование из стержней класса стали А240 и проволоки класса стали В500. Стык замоноличивается бетоном В15 на мелком заполнителе фракции - 10мм. Стальная закладная деталь покрыта цементным раствором В7,5 толщиной 20мм. Закладная деталь представляет собой петлю с загнутыми концами и тремя приваренными пластинами.

Основное назначение вертикальных стыковых соединений панелей – сформировать пространственную несущую систему здания и обеспечить восприятие сдвигающих

сил, возникающих в стыках при совместной работе сопрягаемых стен [15]. Взаимные сдвиги стеновых панелей, возникающие во время возведения здания из-за неравномерной нагрузки на стены и различной деформативности, продолжаются и в эксплуатационный период. При-

чинами дополнительных взаимных сдвигов стен являются неодинаковы деформации усадки и ползучести сопрягаемых стен, неравномерные осадки основания, температурные климатические воздействия, а также действие горизонтальных (ветровых и сейсмических) нагрузок [16,17].

Для обеспечения сдвигающего усилия каждый образец обжимался в двух направлениях с помощью металлических пластин на затяжках (см. рисунок 2). Конструкция образцов предусматривает возможность оценки работоспособности и жесткости узла, обеспечивающих передачу усилий в панельном здании. Непосредственно перед испытаниями производилось определение прочности бетона и растворного шва разрушающим методом на сжатие. На оттариированном испытательном прессе испытывались стандартные образцы-кубы 100 мм×100 мм (для бетона сборного элемента) и 70,7 x70,7 мм (раствора шва).

Всего было испытано 8 образцов. Каждый образец был установлен в универсальную автоматическую гидравлическую машину WAW-500C. Нагрузка прикладывалась поэтапно, ступенями, каждая из которых составляла примерно 10% от разрушающей нагрузки. После приложения каждой доли нагрузки образец выдерживался под нагрузкой не менее 10 минут. Испытания осуществлялись вплоть до разрушения образцов согласно [18-21]. Одновременно при проведении испытаний контроль проводился и по деформациям. Скорость нагружения составляла 0,5- 2 мм/мин.

По результатам испытания получены данные о схемах разрушения, деформативности и разрушающих нагрузках стыковых соединений. При испытаниях установлено следующее:

- характер деформирования сварного соединения при работе на сдвиг упруго-пластичный;
- схема разрушения образцов была следующая: сначала появляются трещины и начинается разрушаться раствор замоноличивания, примерно на 7-9 ступени нагружения начинает разрушаться сварной шов, приваренная к закладной детали пластина, которая соединяет две панели между собой, заметно перекашивается и начинает рваться (см. рисунок 3). Сварные швы в процессе нагружения не имели следов разрушения.



Рисунок 2 – Натурный образец сварного обетонированного стыка



Рисунок 3 – Разрыв пластины в предельной стадии разрушения

В результате испытаний для каждого образца была получена основная характеристика связи сдвига – диаграмма деформирования «сдвиговое усилие - смещение» (см. рисунок 4).

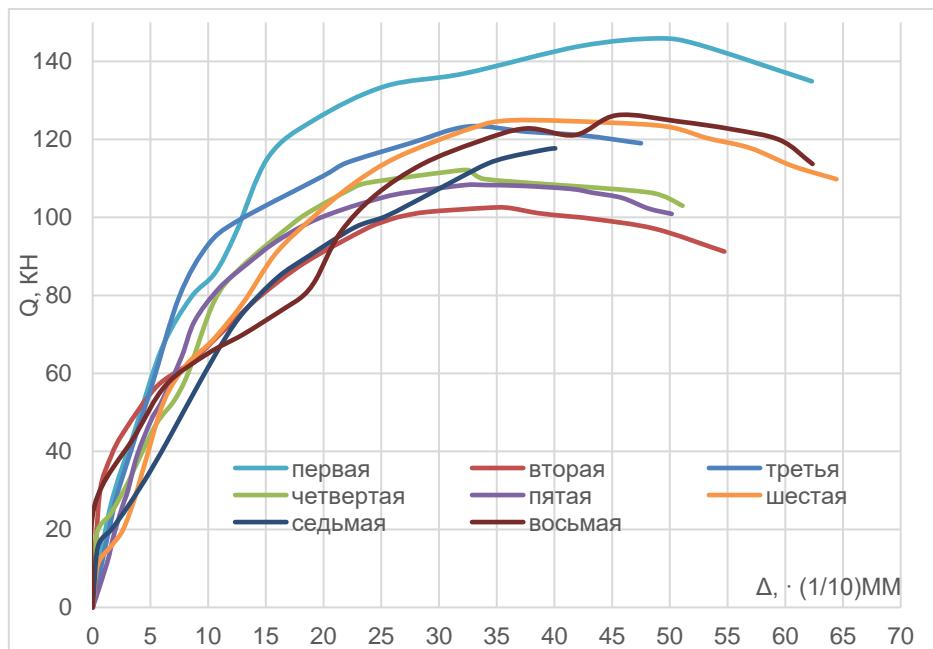


Рисунок 4 – Экспериментальные диаграммы деформирования сварного стыка

Диаграммы свидетельствует о нелинейном поведении стыка под нагрузкой. Предложена аппроксимирующая зависимость в виде полинома второй степени:

$$Q(\Delta) = (-0,0581\Delta^2 + 4,8381\Delta + 25,429), \quad (1)$$

где Q – перерезывающее усилие, кН;

Δ – смещение, мм.

Заключение

Получены достоверные экспериментальные данные по прочности и деформативности сварных стыковых соединений панельных зданий. Стыковые сварные соединения обладают достаточной прочностью и выполняют свои функции при значительных нагрузках. Не произошло разрушения закладных деталей стеновых панелей, не зафиксированы трещины на стено-вых панелях и разрушения сварных швов.

Выполненные исследования и полученные результаты податливости сварных стыков могут быть использованы при определении напряженно-деформированного состояния несущих систем панельных зданий и оценки их эксплуатационной пригодности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Блажко В.П. Об определение податливости связей при формировании расчетных моделей панельных зданий // Жилищное строительство. 2017. №3. С. 17-21.
- Тамразян А.Г., Дехтерев Д.С., Карпов А.Е., Ласковенко А.Г. Определение расчетных параметров для оценки надежности платформенных стыков панельных зданий // В сборнике: Современные проблемы расчета железобетонных конструкций, зданий и сооружений на аварийные воздействия. Под редакцией А.Г. Тамразяна, Д.Г. Копаницы. 2016. С. 413-416.
- Тамразян А.Г. Основные принципы оценки риска при проектировании зданий и сооружений // Вестник МГСУ. 2011. № 2-1. С. 21-27.

4. Обозов В.И., Мамаева Г.В. Анализ динамических характеристик крупнопанельных зданий по экспериментальным данным // Строительная механика и расчет сооружений. 2007. № 2. С. 41-48.
5. Тихонов И.Н. Об эффективном конструирование железобетонных элементов крупнопанельных зданий // Жилищное строительство. 2011. № 3. С. 50-54.
6. Бондаренко В.П., Евтушенко А.И. Причины и анализ повреждений крупнопанельных зданий в период их эксплуатации // Научное обозрение. 2016. №8. С. 56-63.
7. Грановский А.В., Доттуев А.И., Блажко В.П. Экспериментальные исследования прочности при сдвиге и растяжении вертикальных стыков панелей с использованием связей из стяжных замков BT-Spannschloss // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 1. С. 17-20.
8. Соколов Б.С., Миронова Ю.В. Прочность и податливость вертикальных стыков стеновых панелей с использованием гибких петель // Жилищное строительство. 2014. № 5. С. 60-62.
9. Калякин А.А., Сонин С.А., Дербенцев И.С., Бельдейко И.А. Экспериментальные исследования вертикальных шпоночных стыков железобетонных стеновых панелей с петлевыми гибкими связями // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2011. Вып. 13. № 35. С. 16–20.
10. Chatveera B., Nimityongskul P. Vertical shear strength of joints in prefabricated loadbearing walls // J. Natl. Res. Council Thailand. 1994. Pp. 11–36.
11. Sarni H. Rizkalla, Reynaud L. Serrette, J. Scott Heuvel, Emmanuel K. Attiogbe. Multiple Shear Key Connections for Precast Shear Wall Panels // PCI JOURNAL. 1989. Pp. 104–119.
12. Ramin Vaghei, Farzad Hejazi, Hafez Taheri, Mohd Saleh Jaafarb, Abang Abdullah Abang Ali. Evaluate performance of precast concrete wall to wall connection // J. APCBEE Procedia. 2014. 9. Pp. 2853–290.
13. Томина М.В. Влияние связей сдвига на работу пространственной несущей системы многоэтажного здания // Системы. Методы. Технологии. 2017. № 2 (34). С.152-156
14. Люблинский В.А., Томина М.В. Влияние нелинейного деформирования перемычек на процесс распределения усилий в несущих элементах диафрагмы // Системы. Методы. Технологии. 2018. № 2 (38). С.153-158.
15. Лишак В.И., Горачек Е., Пуме Д. и др Прочность и жесткость стыковых соединений панельных конструкций. Опыт СССР и ЧССР. М.: Стройиздат, 1980. С. 121–144.
16. Тамразян А.Г. Оценка риска и надежности несущих конструкций и ключевых элементов - необходимое условие безопасности зданий и сооружений // Вестник ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко "Исследования по теории сооружений". 2009. № 1. С. 160-171.
17. Тамразян А.Г. Особенности работы высотных зданий // Жилищное строительство. 2004. № 3. С.19-20.
18. ГОСТ 10180-2012. Бетоны методы определения прочности по контрольным образцам. Введ. 2013-07-01. М.: Стандартинформ, 2013. 31 с.
19. ГОСТ 5802-86. Растворы строительные методы испытаний. Введ. 1986-01-07. М.: Стандартинформ, 2008. 19 с.
20. ГОСТ 8829-94. Изделия строительные железобетонные и бетонные заводского изготовления. Методы испытаний нагружением. Правила оценки прочности, жесткости и трещиностойкости. Введ. 1998-01-01. М.: МНТКС, 1997. 24 с
21. Рекомендации по проектированию стальных закладных деталей для железобетонных конструкций. М.: НИИЖБ, Стройиздат, 1984. 87 с.

REFERENCES

1. Blazhko V.P. Ob opredeleniye podatlivosti svyazey pri formirovani raschetnykh modeley panel'-nykh zdaniy [On the determination of the compliance of constraints in the formation of computed models of panel buildings]. Zhilishchnoye stroitel'stvo. 2017. No 3. Pp. 17-21.
2. Tamrazyan A.G., Dekhterev D.S., Karpov A.Ye., Laskovenko A.G. Opredeleniye raschetnykh parametrov dlya otsenki nadezhnosti platformennykh stykov panel'nykh zdaniy [Determination of design parameters for assessing the reliability of platform joints of panel buildings] // In the proceedings of conference: Sovremennyye problemy rascheta zhelezobetonnykh konstruktsiy, zdaniy i sooruzheniy na avariynyye vozdeystviya [modern problems of calculating reinforced concrete structures, buildings and structures for emergency impacts]. Under ed. A.G. Tamrazyan, D.G. Kopanitsa. 2016. Pp. 413-416.
3. Tamrazyan A.G. Osnovnyye printsypry otsenki riska pri proyektirovani zdaniy i sooruzheniy [The basic principles of risk assessment in the design of buildings and structures]. Vestnik MGSU. 2011. No 2-1. Pp. 21-27.
4. Obozov V.I., Mamayeva G.V. Analiz dinamicheskikh kharakteristik krupnopanel'nykh zdaniy po eksperimental'nym dannym [Analysis of dynamic characteristics of large-panel buildings according to experimental data]. Stroitel'naya mehanika i raschet sooruzheniy. 2007. No 2. Pp. 41-48.
5. Tikhonov I.N. Ob effektivnom konstruirovaniye zhelezobetonnykh elementov krupnopanel'nykh zdaniy [On the effective design of reinforced concrete elements of large-panel buildings]. Zhilishchnoye stroitel'stvo. 2011. No 3. Pp. 50-54.

6. Bondarenko V.P., Yevtushenko A.I. Prichiny i analiz povrezhdeniy krupnopanel'nykh zdaniy v period ikh ekspluatatsii [Causes and analysis of damage to large-panel buildings in the period of their operation]. *Nauchnoye obozreniye*. 2016. No 8. Pp. 56-63.
7. Granovskiy A.V., Dottuyev A.I., Blazhko V.P. Eksperimental'nyye issledovaniya prochnosti pri sdvige i ras-tyazhenii vertikal'nykh stykov paneley s ispol'zovaniyem svyazey iz styazhnykh zamkov BT-Spannschloss [Experimental studies of the shear strength and tensile strength of vertical joints of panels using connections from BT-Spannschloss couplers]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2014. No 1. Pp. 17-20.
8. Sokolov B.S., Mironova Yu.V. Prochnost' i podatlivost' vertikal'nykh stykov stenovykh paneley s ispol'zovaniyem gibkikh petel' [Strength and compliance of vertical joints of wall panels using flexible loops]. *Zhilishchnoye stroitel'stvo*. 2014. No 5. Pp. 60-62.
9. Karyakin A.A., Sonin S.A., Derbentsev I.S., Bel'deyko I.A. Eksperimental'nyye issledovaniya verti-kal'nykh shponochnykh stykov zhelezobetonnykh stenovykh paneley s petlevymi gibkimi svyazyami [Experimental studies of vertical shpo-nochnyh joints of reinforced concrete wall panels with loop flexible connections]. *Vestnik YuUrGU. Seriya Stroitel'stvo i arkitektura*. 2011. Vol. 13. No 35. Pp. 16–20.
10. Chatveera B., Nimityongskul P. Vertical shear strength of joints in prefabricated loadbearing walls. *J. Natl. Res. Council Thailand*. 1994. Pp. 11–36.
11. Sarni H. Rizkalla, Reynaud L. Serrette, J. Scott Heuvel, Emmanuel K. Attiogbe. Multiple Shear Key Connections for Precast Shear Wall Panels. *PCI JOURNAL*. 1989. Pp. 104–119.
12. Ramin Vaghei, Farzad Hejazi, Hafez Taheri, Mohd Saleh Jaafarb, Abang Abdullah Abang Ali. Evaluate performance of precast concrete wall to wall connection. *J. APCBEE Procedia*. 2014. 9. Pp. 2853–290.
13. Tomina M.V. Vliyaniye svyazey sdvig na rabotu prostranstvennoy nesushchey sistemy mnogoetazhnogo zdaniya [Influence of shear bonds on the work of the spatial bearing system of a multi-storey building]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*. 2017. No 2 (34). Pp.152-156.
14. Lyublinskiy V.A., Tomina M.V. Vliyaniye nelineynogo deformirovaniya peremychek na protsess raspredeleniya usiliy v nesushchikh elementakh diafragmy [Influence of nonlinear deformation of bridges on the process of distribution of forces in the bearing elements of the diaphragm]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*. 2018. No 2 (38). Pp.153-158.
15. Lishak V.I., Gorachev Ye., Pume D. etc. Prochnost' i zhhestkost' stykovykh soyedineniy panel'nykh konstruktsiy. Opyt SSSR i CHSSR [Strength and rigidity of butt joints of panel structures. Experience of the USSR and Czechoslovakia]. Moscow: Stroyizdat, 1980. Pp. 121–144.
16. Tamrazyan A.G. Otsenka risika i nadezhnosti nesushchikh konstruktsiy i klyuchevykh elementov - ne-obkho-dimoye usloviye bezopasnosti zdaniy i sooruzheniy [An assessment of the risk and reliability of load-bearing structures and key elements is a necessary condition for the safety of buildings and structures]. *Vestnik TSNISK im. V.A. Kucherenko "Issledovaniya po teorii sooruzheniy"*. 2009. No 1. Pp. 160-171.
17. Tamrazyan A.G. Osobennosti raboty vysotnykh zdaniy [Features work of high-rise buildings]. *Zhilishchnoye stroitel'stvo*. 2004. No 3. Pp.19-20.
18. Russian Standard GOST 10180-2012. Betony metody opredeleniya prochnosti po kontrol'nym obraztsam [Concrete methods of determining the strength of control samples]. Introduced 2013-07-01. Moscow: Standartinform, 2013. 31 p.
19. Russian Standard GOST 5802-86. Rastvory stroitel'nyye metody ispytaniy [Mortars construction test methods]. Introduced 1986-01-07. Moscow: Standartinform, 2008. 19 p.
20. Russian Standard GOST 8829-94. Izdeliya stroitel'nyye zhelezobetonnyye i betonnyye zavodskogo izgotovleniya. Metody ispytaniy nagruzheniyem. Pravila otseki prochnosti, zhhestkosti i treshchinostoykosti [Products made of reinforced concrete and concrete factory made. Methods of loading tests. Rules for evaluation of strength, rigidity and crack resistance]. Introduced 1998-01-01. Moscow: MNTKS, 1997. 24 p
21. Rekomendatsii po projektirovaniyu stal'nykh zakladnykh detaley dlya zhelezobetonnykh konstruktsiy [Recommendations on the design of steel fittings for reinforced concrete structures]. Moscow: NIIZHB, Stroyizdat, 1984. 87 p.

Информация об авторах:

Люблинский Валерий Аркадьевич

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия,
Кандидат технических наук, профессор, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций,
E-mail: lva_55@mail.ru

Information about authors:

Lyublinskiy Valery A.

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
candidate in tech. sc., prof., associated prof. of the dep. reinforced concrete and stone structures
E-mail: lva-55@mail.ru

INFLUENCE OF THE GEOMETRICAL RESEARCHES OF RARE TYPE SURFACES ON DESIGN OF NEW AND UNIQUE STRUCTURES

MAMIEVA I.A.¹, GBAGUIDI-AISSE G.L.²

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

²Laboratoire d'énergétique et de mécanique appliquées (LEMA) Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi, Univ. d'Abomey-Calavi BP 2009 Cotonou, République du Bénin

Abstract. The aim of the paper is to illustrate using of analytical surfaces, i.e. surfaces, which can be given by vector, parametric or explicit equations, in real structures, i.e. in parametric architecture. Parametric architecture is a unique style in which such concepts as sculpture, mathematics, structural mechanics, and architecture are interconnected. Parametric design in contrast to other styles has a relationship with mathematics. This paper continues a series of works of the authors devoted to application of analytical surfaces in architecture and building, devoted to investigation of influence of researches on the geometry of surfaces on design of large-span shell structures and to application of interesting geometrical forms for unique erections. In the paper, a photo of only one erection having this form illustrates every analytical surface, which can be seen in forms of real erections. It turned out that only 42 of the 600 surfaces described in the literature were used in the World. For those who are interested in the mathematical side of design of surfaces, their computer modeling, or more detailed information about real structures in the form of the surfaces in question, a voluminous bibliography are given.

Keywords: parametric architecture, surface geometry, forming surfaces, surface classification, shell, shell structure; public, residential, and industrial buildings.

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ РЕДКИХ ТИПОВ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА СОЗДАНИЕ НОВЫХ И УНИКАЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ

MAMIEVA I.A.¹, GBAGUIDI AÏSSE J.L.²

¹Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

²Университет Абомей-Калави, 02 BP 244 Котону, Республика Бенин

Аннотация. Цель статьи – анализ использования аналитических поверхностей, то есть поверхностей, которые могут быть заданы векторными, параметрическими или неявными уравнениями, в реальных конструкциях, то есть в параметрической архитектуре. параметрическая архитектура – это уникальный стиль, который объединяет скульптуру, математику, строительную механику и архитектуру. Параметрическое проектирование в отличие от других стилей имеет тесную связь с математикой. Статья является продолжением серии работ авторов, посвященных применению аналитических поверхностей в архитектуре и строительстве, а также исследованию влияния исследований по геометрии поверхности на проектирование больших пролетных структур и применению интересных геометрических форм для уникальных сооружений. В статье каждая аналитическая поверхность, которую можно увидеть в формах реальных сооружений, иллюстрируется фотографией только одного сооружения, имеющего эту форму. Обнаружено, что только 42 из 600 поверхностей, описанные в научно-технической литературе, были использованы в мировой практике. Для тех, кто интересуется математической стороной проектирования аналитических поверхностей, их компьютерным моделированием, или более подробными сведениями о реальных сооружениях в форме рассматриваемых поверхностей приведена обширная библиография.

Ключевые слова: параметрическая литература, геометрия поверхностей, формообразование поверхностей, классификация поверхностей, оболочка, оболочечная структура, промышленные и гражданские здания.

1. Introduction

Nowadays there are known more than 600 analytical surfaces set by the explicit, implicit, vector or parametrical equations [1] that are grouped in 38 classes. There are several options of classifications of analytical surfaces; the fullest of them is presented in a work [2]. In some works, for example in [3 – 5], attempts to find out the most popular analytical surfaces among architects which were used for design of public, residential, and industrial buildings were made. This style is called the parametrical architecture [6, 7]. The present manuscript continues the researches begun by the authors in the works [3, 5, 8 – 11] in which the known thin-walled shell erections realized in practice or erections in design of which the most prominent architects took part, or the structurers having the most optimum technical-and-economic parameters, or the structures noted by prizes and taking high places in various ratings of professional associations and magazines are presented. Now, only rare classes of analytical surfaces embodied in real thin-walled shell structures will be considered.

2. Method of researches

In a paper, methods of researches assumed in analytical and differential geometry of surfaces will be used and applied for study of middle surfaces of thin-walled shell structures. Every analytical surface will be illustrated with one erection outlined on the corresponding surface. The presented manuscript is the final stage of common researches of the authors devoted to the study of influence of geometrical investigations of analytical surfaces on design of unique structures and buildings. Broadening of possibilities of computer modelling for shape finding methods of shells with attraction of differential geometry with consequent automatic using of numerical methods of analysis is the aim of the paper. For this aim, it is necessary to research the degree of drawing analytic surfaces into the practice of design of thin-walled shell structures.

3. Results of the research

Let us examine classes, subclasses, and groups of rare analytical surfaces that found the application in the shapes of public, residential, and industrial buildings. Ruled, translation surfaces, and surfaces of revolution were studied in other works of the authors [3, 11].

3.1. Helical surfaces

A helical surface is formed by a curve in the process of its helical motion. The generatrix curve uniformly revolves on an axis of revolution and at the same time executes a translational motion in the direction of the same axis. If the ratio of a value of the speed along the straight line to a value of the angular velocity is constant then a helical motion is called an ordinary helical motion.

3.1.1. Ordinary helical surfaces

A surface formed by ordinary helical motion is called an ordinary helical surface. This type of helical surfaces includes right helicoids and cylindrical helical strips and pseudo-developable helicoids.

3.1.1.1. Pseudo-developable helicoid

At the beginning of the 21st century, architects and mechanical engineers paid attention to the box surfaces on the basis of a circular cylinder [12, 13]. In many large cities, skyscrapers are built in the form of a twisted rod of rectangular cross-section. The Infinity Tower, 306 m high with a 90-degree turn relative to the base, was built in the prestigious Dubai Marina district in the United Arab Emirates (Fig. 1). There are other objects that have this form. In all cases, a box-shaped surface on the basis of the circular cylinder is composed of n identical intersecting along helical lines pseudo-developable helicoids and cross-sections represent a regular polygon with n sides.

3.1.1.2. Circular helical surfaces

A circular helical surface is obtained by the ordinary helical motion of a freely located generatrix circle of a constant radius. Circular helical surfaces are also included in the class of cyclic surfaces. According to the position of a directrix circle, circular helical surfaces are divided into 4 groups. Only 2 groups are used in the architecture: a tubular helical surface and a right circular helical surface.

Tubular helical surface

Tubular helical surfaces are used in the design of solid and hollow helical springs, in round section coils or to give the column the shape of a helical pole.

Right circular helical surface

This surface is formed by the ordinary helical motion of a circle of constant radius located in a plane perpendicular to the helical axis [1]. A surface of helical pole is a variety of the right circular helical surface. In Fig. 2, the surfaces of the helical poles have four directrix circles similar to poles of Iglesia Santa Maria Magdalena, Olivenza, Spain (the XVIth century).

3.1.1.3. Helical surfaces with arbitrary plane generatrix curves

A helical surface with an arbitrary plane generatrix curve (helicoid of general type) is formed by some profile rotating about an axis and at the same time executing a translation motion along the same axis. In addition, the translational speed of the profile is proportional to its angular velocity. These surfaces can give modern architects good tool for creativity. Almost any city has playgrounds with children slides in the form of this surface (Fig. 3).



Figure 1 - Infinity Tower. Each side of it is a pseudo-developable helicoid



Figure 2 - The helical poles of Morozov's private residence, Moscow. The building was built in 1895-1899, arch. V. Mazyrin



Figure 3 - Child slide

3.1.2. Helical surfaces of variable pitch

The helical surfaces of variable pitch can be seen in the thread of various types, in the forms of screw conveyors and worm presses, where relatively smooth changes in the pitch of the screw are usually made.

3.2. Spiral surfaces

The helical motion of this line forms a spiral surface with an arbitrary rigid curve in the planes of a pencil with a point moving along a conical spiral. A spiral surface with a straight generatrix in the planes of a pencil is formed by the helical motion of a straight line intersecting the axis of rotation at a constant angle. The other end of the straight line moves along the conical spiral. All points of the straight generatrixes will form the conic spirals. As an example of application of spiral surface with straight generatrixes in the planes of a pencil one can take the projects of houses "The Stairscrapers" designed by the architectural Bureau "Nabito Arquitecture". They became one of the finalists of the contest "Total Housing: Apartments 2010" that was held in New York (Fig. 4 [12]).



Figure 4 - The Stairscraper



Figure 5 - Spiral-shaped roof

3.3. Spiral-shaped surfaces

Spiral-shaped surfaces (Fig. 5) are externally similar to spiral surfaces, but they cannot be assigned to one class since spiral surfaces have only a spiral on a circular cone as a directrix curve but a generatrix curve in the process of movement along the conical spiral curve does not change its shape and orientation. One can take any spiral on any surface as a directrix curve of spiral-shaped surface. In a paper [12], some spiral-shaped skyscrapers are described. Their forms with certain assumptions can be attributed to spiral-shaped surfaces. These are Strata Tower (Abu Dhabi, architect Hani Rashid, Lise A. Couture, 2011), Fog Tower (Atacama, architect A. Fernandez, S. Ortega, 2008) and others.

3.4. Helix-shaped surfaces

Helix-shaped surfaces form a separate class of surfaces. In the special literature, designers often confuse the definitions of helical, helix-shaped, and spiral surfaces. The helix-shaped surfaces include surfaces formed by generatrix curves which in addition to a simple helical motion relative to the helical axis make any additional movement or deform according to a certain law. The trajectories of the points of the generatrix curve under helix-shaped motion will not be cylindrical helical lines. Helix-shaped surfaces at a certain selection of geometric parameters will degenerate into helical surfaces. 19 helix-shaped surfaces are represented in the encyclopedia [1] but descriptions of real structures are not found in available technical literature.

3.5. Cyclic surfaces

Cyclic surfaces are formed by circles of constant or variable radius in the process of their arbitrary movement in space [14]. These surfaces are mainly used in structures of machines of various purposes, in spiral chambers of refrigeration units, in high-pressure units, as fragments of attractions in sport-and-entertainment centers [3]. They can be seen in the form of spiral chambers of hydroelectric turbines. Among the huge number of cyclic surfaces offered by geometers, only tubular surfaces and surfaces of revolution are used in the building industry and architecture.

An equation of a cyclic surface in a vector form is

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(u,v) = \rho(u) + R(u)\mathbf{e}(u,v),$$

where $\mathbf{r}(u,v)$ is the radius-vector of a cyclic surface; $\rho(u)$ is the radius-vector of a directrix curve; $R(u)$ is the law of changing of a radius of the generatrix circles; $\mathbf{e}(u,v)$ is a vector-function of the circle of the unit radius in the plane of the generatrix circle.

3.5.1. Normal cyclic surfaces

3.5.1.1. Tubular surfaces

Tubular spiral-shaped and helix-shaped surfaces are widely used in designing descents in children attractions (Fig. 6). As a form of a launching chute in an attraction, it may be recommend-

ed to take a tubular surface on sphere or a tubular loxodrome [3]. Sometimes a tubular surface with an arbitrary line of centers is used as an exotic design of the whole building [3]. In a book [3], 17 types of tubular surfaces are proposed for integration.

Circular torus

Structures in the form of circular torus or its fragments are used much rarer than other surfaces of revolution. But architects know about this surface and sometimes use it in very original projects. The Ark project (Bioclimatic building with an autonomous life support system) was developed taking into account the Disaster Architecture program of the International Union of Architects and was nominated for the World Architecture Festival - 2010, received a third degree diploma based on the results of the First International Festival of Innovative Technologies in Architecture and Construction - 2010 " held in Moscow in the nomination " Conceptual Projects ".

There are some projects on using circular torus as a base surface for design of closed twisted box-shaped surfaces [15].

3.6. Minimal surfaces

Catenoid and right helicoid belong to the class of minimal surfaces. However, they are also surfaces of revolution and ruled surfaces of negative Gaussian curvature, respectively. In addition to them, only Schwartz minimal surfaces have been used in architecture. Information about the remaining minimal surfaces can be taken from the encyclopedia [1] and in [16, 17].

3.6.1. Schwartz surface

Having used several of the same type surfaces Schwartz, one can build embedded triply periodic minimal surfaces. A basic cell of Schwartz surface is disposed into the regular cube with the holes in all faces of the cube and has cubic symmetry. This fact is now widely used in architecture. For example, the Olympic Stadium in Munich (1972) was created with using minimal surfaces close to the Schwartz surface.

3.7. One-sided surfaces

One-sided and two-sided surfaces are two types of surfaces differing in the way of their disposition in the space. In the encyclopedia [1], 5 one-sided surfaces are shown and only models of a Möbius strip have found the application in architecture of small forms.

3.7.1. Möbius strip (Moebius band)

The strip twisted ones is called a Möbius strip, or a Moebius band. In contrast to its model, a Möbius strip has no thickness. Near the Museum of science and technology in Washington, steel model of the Möbius strip rotates on a pedestal. There is a sculpture "Möbius strip" in Ekaterinburg near the business center (Fig. 8), in Moscow and in other cities.



Figure 6 - Child attraction



*Figure 7 - The museum of aeronautics, Belgrade, Serbia.
[https://ru.wikipedia.org]*



*Figure 8 - "Möbius strip",
Ekaterinburg, RF*

3.7.2. The Klein surface

The German mathematician Felix Klein first described the Klein surface in 1882. It may have been originally named the Kleinsche Fläche ("Klein surface") and then misinterpreted as Kleinsche Flasche ("Klein bottle"). The Klein bottle has no boundary. Immersed Klein bottles are presented in the Science Museum in London. Designers and students like to make a wire mesh of a Klein bottle. McBride Charles Ryan gave the Klein bottle house unique shape in order to preserve the Australian landscape in which it is so snugly nestled*.

3.7.3. The Boy surface

The Boy surface is named after Werner Boy, who constructed this surface, which is an immersion of the real projective plane in Euclidean 3-space, in 1901 in his thesis. The model of the Boy surface in front of the Institute's library building has 3-fold rotational symmetry and minimizes the Willmore functional which measures elastic energy. On January 28th, 1991, it was installed at the MFO as a gift of Mercedes-Benz. Many models of the Boy surfaces were placed in different gardens.

3.8. Surfaces of umbrella type

A cyclic symmetrical spatial structure formed from several identical elements is called an umbrella dome. Curves obtained as a result of the intersection of their middle surfaces are the generatrices of any dome-shaped surface of revolution.

The cyclic symmetrical surfaces consisting of several identical elements are called surfaces of umbrella type. But unlike an umbrella surface, the whole surface of umbrella type and all surfaces of the identical elements are determined by one and the same parametric equations

18 names of umbrella type surfaces [1, 3] are known. Unfortunately, in literature on architecture, they do not indicate the method of formation of surfaces and do not give their analytical equations and that is why it is difficult to classify these two types of surfaces. For instance, architect Marchand J.R. used the shell for covering of the restaurant near "La Concha hotel" (Fig. 9). This form is very similar to the umbrella-type surface with astroid lines of level formed by biquadratic parabolas.



Figure 9 - Restaurant near the "La Concha hotel", San Juan, Puerto Rico [<http://www.architecturaldigest.com/homes/hotels/2009>]

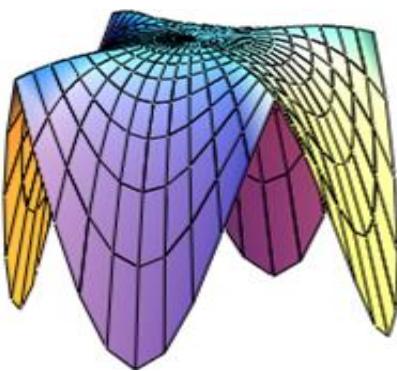


Figure 10 - Umbrella-type surface

This surface was proposed in [1, 18] (Fig. 10). Its parametrical equations are

$$x = x(t, u) = au^{1/4} \cos^3 t, \quad y = y(t, u) = au^{1/4} \sin^3 t, \quad z = z(u) = H(1-u),$$

where u is a dimensionless parameter; $0 \leq u \leq 1$; $0 \leq t \leq 2\pi$; H is the rise of the surface.

* <https://inhabitat.com/gorgeous-origami-esque-klein-bottle-house-nestles-into-australias-landscape/>

Apparently, surfaces of umbrella type [19, 20] are little known to engineers and architects in contrast to umbrella surfaces [21].

3.9. The second order surfaces

The second order surfaces are defined by algebraic equations of the second order relatively to the Cartesian coordinates. The second order surfaces are called also quadratic surfaces or quadrics. 17 quadratic surfaces are known.

The most of quadratic surfaces are included in other classes of surfaces and were presented in other works of the authors. These are cylindrical surface of revolution, elliptic cylinder, parabolic cylinder, conical surface of revolution [22], ellipsoid of revolution, one-sheet hyperboloid, and paraboloid of revolution [11]. Hyperbolic paraboloids (hypars) are very well known roof structures [22, 23].

Consider some more second-order surfaces used in real structures.

3.9.1. Three-axial ellipsoid

The application of this surface is illustrated by the example of the Wedding Palace, which is located at the top of the two-level "Picturesque bridge" (Fig. 11), Moscow. One level is provided for cars, the other for the subway. The capsule is made of iron and glass and is 34 m long, 23 m wide, and weighing 650 tons. It is suspended at a hundred-meter height. Its Grand opening took place on December 27 in 2007. For the determination of stress-strain state of three-axial ellipsoid by FEM one can use a method offered in a paper [24].



Figure 11 - Restaurant and wedding Palace, Picturesque Bridge, Moscow

3.9.2. Elliptic paraboloid

Elliptical paraboloid can be given by parametrical equations:

$$x = x, \quad y = y, \quad z = z(x, y) = x^2/(2p) + y^2/(2q).$$

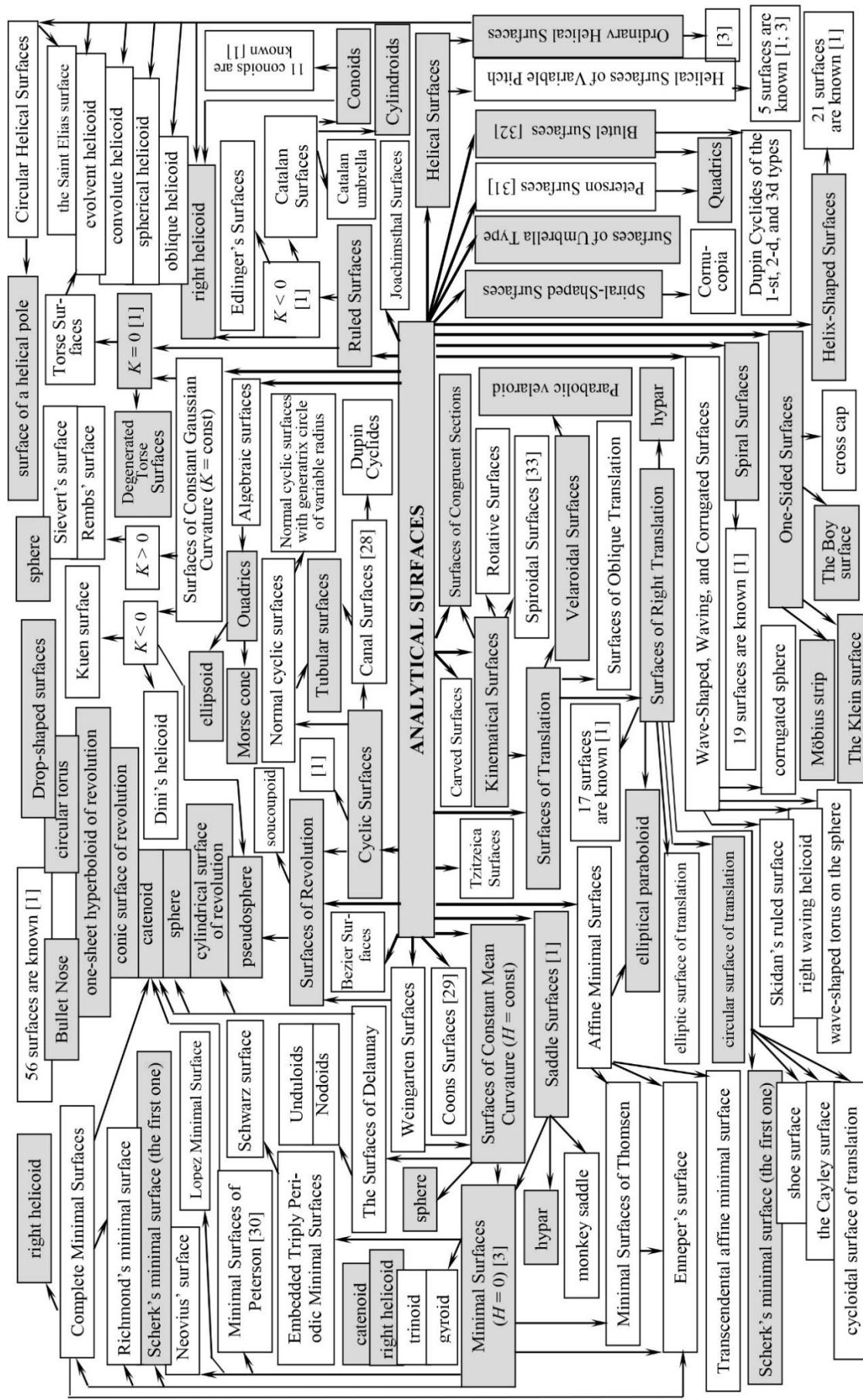
These parametrical equations show that elliptic paraboloid is a surface of translation and formed by movement of one main parabola along another [10]. So, a sport hall on an elliptic ground plan of 96×64 m in Hungary was covered by a reticulated tubular shell structure having the form of an elliptic paraboloid.

A reinforced concrete dome covering of the Smithfield Poultry Market, architect T.P. Bennett and Son, engineer Ove Arup, in London (UK) was built in 1961-1963 on the spot of the old market building brnt in 1958. A new building was designed in the form of an elliptic paraboloid with the dimension of 68.6×38.12 m in plan, 9.1 m high, a shell thickness is 7.5 cm, a shell thickness in corners is 20 cm. A middle surface of the shell is defined by an equation $z = (x/r_x)^2 + (y/r_y)^2$ (Fig 12). Having been inside, the visitors wonder and express an admiration with triumph of technical idea [25]. At the moment of erection, it was the largest thin-walled reinforced concrete shell.



Figure 12 - The Smithfield Poultry Market, London

Table 1 – Classification of analytical surfaces



4. Proposals for discussion

The study shows that out of the 600 analytical surfaces listed in the encyclopedia [1] only 42 surfaces have been used in architecture and building in the World. Previously, a similar study was conducted on the example of Moscow [5] and it was found that only 18 analytical surfaces were used in Moscow. The materials of the research suggest that geometers are significantly ahead of the needs of architects and builders, or architects have not yet mastered the entire set of analytical surfaces proposed by geometers, or architects consider the most analytical surfaces unsuitable for their creative concepts. May be they prefer analytically undefined surfaces. Often the shape of surface is designed by architects and geometers make later its mathematical description.

With the advent of variation difference method, finite element method, and other numerical methods, engineers received a powerful tool for the expanded use of thin-walled large-span shells and other types of structures of various shapes [26, 27].

5. Conclusion

In works [5, 8-11, 20, 22], the authors have begun the researches of a degree of application of methods of analytical and differential geometry of surfaces for shape finding methods of thin-walled shells. Now for the first time, a classification of analytical surfaces in the obvious graphic form was offered and it was shown that only not considerable part of the known analytical surfaces was used for design of building shell structures. This situation can be corrected by introduction of geometric researches of surfaces and advanced analytical and numerical methods of strength analysis into a design practice. So, owing to the presented investigations, the builders and designers have a good opportunity to choose new surface of attractive shape with given geometrical parameters but unknown to other designers. For clarity, a classification of analytical surfaces is given in a tabular form (Table 1). The surfaces, found the application in architecture and building, are darkened. The surfaces, that can be used in architecture and building, are shown in Table 1 in open frames. The materials of the paper can help to choose a proper criterion of optimality for a shell and to use optimal shell design.

Acknowledgments

The publication has been prepared with the support of the “RUDN University Program 5-100”.

REFERENCES

1. Krivoshapko S.N., Ivanov V.N. Encyclopaedia of Analytical Surfaces. Springer International Publishing Switzerland. 2015. 752 p. DOI 10.1007/978-3-319-11773-7_13
2. Grinko E.A. Classification of analytical surfaces as applied to parametrical architecture and machine building. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2018. 19(4). Pp. 438-456 <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2018-19-4-438-456> (rus)
3. Krivoshapko S.N., Mamieva I.A. Analytical Surfaces in Architecture of Buildings Structures and Products: Monography. Moscow: LIBROCOM Publ, 2018. 328 p. (rus)
4. Podgorniy A.L., Grinko E.A., Solovey N.A. On research of new surface forms as applied to structures of diverse purpose. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2013. 1. Pp 140-145. <http://journals.rudn.ru/engineering-researches/article/view/4746/4200> (rus)
5. Mamieva I.A., Razin A.D. Parametrical architecture in Moscow. *Architecture and construction of Russia*. 2014. 6. Pp. 25–29. https://elibrary.ru/download/elibrary_21614483_57957742.pdf (rus)
6. Esipova A.A., Aganova A.Yu. Parametrical architecture. Leading style in architecture of future. *Molodyozhn. Nauchn. Forum: Tehnich. i Matem. Nauki: in Elektr. Sb. st. po Mat. XVII Mezhdun. Stud. Nauchno-Prakt. Konf.* 10(17) url: [https://nauchforum.ru/studconf/tech/xvii/4585\(rus\)](https://nauchforum.ru/studconf/tech/xvii/4585(rus))
7. Schnabel M.A. Parametric Designing in Architecture. In: Dong A., Moere A.V., Gero J.S. (eds) Computer-Aided Architectural Design Futures (CAADFutures). Springer, Dordrecht. 2007. pp 237-250 https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6528-6_18

8. Mamieva I.A., Razin A.D. Pyramids in modern architecture. *Industrial and Civil Engineering*. 2018. 5. Pp 40-45. [https://elibrary.ru/download/elibrary_30548522_75575692.pdf\(rus\)](https://elibrary.ru/download/elibrary_30548522_75575692.pdf)
9. Mamieva I.A., Razin A.D. Landmark spatial structures in the form of conic surfaces. *Promyshlennoe i Grazhdanskoe Stroitelstvo [Industrial and Civil Engineering]*. 2017. 10. Pp 5-11. [https://elibrary.ru/download/elibrary_30548522_84995095.pdf \(rus\)](https://elibrary.ru/download/elibrary_30548522_84995095.pdf)
10. Krivoshapko S.N., Gbaguidi Aïssè G.L. Geometry, static, vibration and buckling analysis and applications to thin elliptic paraboloid shells. *The Open Construction and Building Technology Journal*. 2016. 10(1). Pp 576-602. DOI: 10.2174/1874836801610010576
11. Gbaguidi Aïssè G.L. Influence of the geometrical researches of surfaces of revolution and translation surfaces on design of unique structures. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2019. 15(4). Pp. 308-314 DOI 10.22363/1815-5235-2019-15-4-308-314
12. Krasic Sonja. Geometrijske Površi u Arhitekturi. Gradevinsko-arhitektonski fakultet Univerzitet u Nišu. 2012. 238 p. ISBN 978-86-88601-02-3 236 COBISS.SR-ID 190337036 M42 (serbian)
13. Rigoberto E.M. Morales; Eugênio S. Rosa. Modeling of free surface flow in a helical channel with finite pitch. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng.* 2007. 29(4) Rio de Janeiro. <http://dx.doi.org/10.1590/S1678-58782007000400002>
14. Saveliev Yu.A. Cyclic surfaces. Surfaces with similar sections. Yekaterinburg:UGUPS: 2008. 54 p. (rus)
15. Ivanov V.N., Romanova V.A. Constructive Forms of Spatial Structures (Visualization of Surfaces in MathCad, AutoCad). Moscow: ASV Publ., 2016. 412 p. ISBN 987-5-4323-0179-6(rus)
16. Gray A. Modern Differential Geometry of Curves and Surfaces with Mathematica: 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press. 1998. 1053 p. ISBN 9781584884484 - CAT# C4487
17. Goziridze A.F. Model tests of reinforced concrete shells in the form of soap films. *Stroit. Meh. Prostranstv. Konstruktsiy*. Tbilisi. 1974. Vol. 2. Pp. 34-37. (rus)
18. Hyeng Ch. A. Bock, Krivoshapko S.N. Umbrella-Type Surfaces in Architecture of Spatial Structures. *IOSR Journal of Engineering*. 2013. 3(3). Pp. 43-53 DOI: 10.9790/3021-03334353
19. Ariarskyi O.E., Shagalova I.V., Kravchenko T.V., Kulakova E.A. Umbrella surfaces morphology and their application in the architecture and design. *The Work of TDATU*. 2011. 4(49). Pp. 178-190. (rus)
20. Krivoshapko S.N., Mamieva I.A. Umbrella surfaces and umbrella-typed surfaces in architecture. *Promyshlennoe i Grazhdanskoe Stroitelstvo [Industrial and Civil Engineering]*. 2011. 7(1). Pp. 27-31. [https://elibrary.ru/item.asp?id=16522830 \(rus\)](https://elibrary.ru/item.asp?id=16522830)
21. Kadam S.S., Gandhe G.R., Tupe D.H. Advanced Modeling and Analysis of Plate and Inverted Umbrella Roof Shell Using ANSYS. *IJSR*. 2019. 8(2). Pp. 538-542. www.ijsr.net
22. Mamieva I.A. Influence of the geometrical researches of ruled surfaces on design of unique structures. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2019. 15(4). Pp. 299-307. DOI 10.22363/1815-5235-2019-15-4-299-307
23. Kadam S.S., Gandhe G.R., Tupe D.H. Finite Element Analysis Of Hyperbolic Paraboloid Shell By Using ANSYS. *IRJET*. 2017. 04(02). Pp. 99-104. www.irjet.net
24. Klochkov Yu.V., Nikolaev A.P., Kiseleva T.A., Marchenko S.S. Comparative analysis of the results of finite element calculations based on an ellipsoidal shell. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2016. 45(4). Pp 328-336
25. Forty Andrian. Building of the Month. *The Twentieth Century Society*. 2012. <http://www.c20society.org.uk/docs/building/poultry.html>
26. Maan H. Jawad. Design of Plate & Shell Structures. ASME Press. 2004. 476 p. <https://www.wiley.com/en-am/exportProduct/pdf/9781860583322>
27. Adriaenssens S., Block P., Veenendaal D., Williams C. (editor). *Shell Structures for Architecture: Form Finding and Optimization*. Routledge London. 2014. 340 p. <https://block.arch.ethz.ch/brg/publication/shells-for-architecture-form-finding-and-structural-optimization>
28. Soliman M.A., Mahmoud W.M., Solouma E.M., Bary M. The new study of some characterization of canal surfaces with Weingarten and linear Weingarten types according to Bishop frame. *J of the Egyptian Mathematical Society*. 2019. 27:26. <https://doi.org/10.1186/s42787-019-0032-y>
29. Ivanov V.N. Architectural compositions on the base of the Coons surfaces. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2007. 4. Pp. 5-10 [https://elibrary.ru/download/elibrary_11532259_27974679.pdf \(rus\)](https://elibrary.ru/download/elibrary_11532259_27974679.pdf)
30. Korolev E.A., Fomina T.N. Peterson minimal surfaces. *Ukrain. Geom. Sb.* 1979. 22. Pp. 92-96. (rus)
31. Mlodzievskiy B.K. On surfaces dealing with Peterson surfaces. *Matem. Sb.* 1900. 21. Pp. 450-460. (rus)
32. Degen W. Die zweiflachen Blutelschen Kegelschnittflächen. *Manuscr. Math.* 1986. 55(1). Pp 9-38.
33. Krivoshapko S.N., Shambina S.L. The researches and visualization of rotative and spiroidal surfaces. *Prikladna Geometriya ta Injenerna Grafika*. Prazi TDATU. 2011. 4(49). Pp. 33-41. (rus)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Krivoshapko S.N., Ivanov V.N. Encyclopaedia of Analytical Surfaces. Springer International Publishing Switzerland. 2015. 752 p. DOI 10.1007/978-3-319-11773-7_13
2. Гринько Е.А. Классификация аналитических поверхностей применительно к параметрической архитектуре и машиностроению// Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2018. Том 19, № 4. С. 438-456. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2018-19-4-438-4563>.
3. Кривошапко С.Н., Мамиева И.А. Аналитические поверхности в архитектуре зданий, конструкций и изделий: Монография. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2018. – 328 с.
4. Подгорный А.Л., Гринько Е.А., Соловей Н.А. Исследование новых форм поверхностей применительно к конструкциям различного назначения// Вестник Российской университета дружбы народов. Инженерные исследования. 2013. № 1. С. 140-145. <http://journals.rudn.ru/engineering-researches/article/view/4746/4200>
5. Мамиева И.А., Разин А.Д. Параметрическая архитектура в Москве// Архитектура и строительство России. 2014. № 6. С. 24-29 https://elibrary.ru/download/elibrary_21614483_57957742.pdf
6. Есипова А.А., Аганова А.Ю. Параметрическая архитектура - ведущий стиль в архитектуре будущего // Молодежный научный форум: технические и математические науки: Электр. сб. ст. по мат. XVII Междунар. студ. науч.-практ. конф., № 10(17). url: [https://nauchforum.ru/archive/mnf_tech/10\(17\).pdf](https://nauchforum.ru/archive/mnf_tech/10(17).pdf) (дата обращения: 30.03.2019)
7. Schnabel M.A. Parametric Designing in Architecture// In: Dong A., Moere A.V., Gero J.S. (eds) Computer-Aided Architectural Design Futures (CAADFutures). Springer, Dordrecht. 2007. Pp 237-250 https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6528-6_18
8. Мамиева И.А., Разин А.Д. Пирамиды в современной архитектуре// Промышленное и гражданское строительство. С. 40-45. https://elibrary.ru/download/elibrary_30548522_75575692.pdf
9. Мамиева И.А., Разин А.Д. Знаковые пространственные сооружения в форме конических поверхностей // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 10. С. 5-11. https://elibrary.ru/download/elibrary_30548522_84995095.pdf
10. Krivoshapko S.N., Gbaguidi Aïssè G.L. Geometry, static, vibration and buckling analysis and applications to thin elliptic paraboloid shells// The Open Construction and Building Technology Journal. 2016. 10(1). Pp 576-602. DOI: 10.2174/1874836801610010576
11. Gbaguidi Aïssè G.L. Influence of the geometrical researches of surfaces of revolution and translation surfaces on design of unique structures// Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. 15(4). Pp. 308-314 DOI 10.22363/1815-5235-2019-15-4-308-314
12. Krasic Sonja. Geometrijske Površi u Arhitekturi. Gradevinsko-arkitektonski fakultet Univerzitet u Nišu. 2012. 238 p. ISBN 978-86-88601-02-3 236 COBISS.SR-ID 190337036 M42
13. Rigoberto E.M. Morales; Eugênio S. Rosa. Modeling of free surface flow in a helical channel with finite pitch// J. Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng. 2007. 29(4) Rio de Janeiro. <http://dx.doi.org/10.1590/S1678-58782007000400002>
14. Saveliev Yu.A. Cyclic surfaces. Surfaces with similar sections. Yekaterinburg:UGUPS: 2008. 54 p.
15. Иванов В.Н., Романова В.А. Конструкционные формы пространственных конструкций. Визуализация поверхностей в системах MathCad, AutoCad. М.: Изд-во АСВ, 2016. 412 с. ISBN 987-5-4323-0179-6
16. Gray A. Modern Differential Geometry of Curves and Surfaces with Mathematica: 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press. 1998. 1053 p. ISBN 9781584884484 - CAT# C4487
17. Гоциридзе А.Ф. Экспериментальные исследования железобетонных оболочек в форме мыльных рисунков// Строительная механика пространственных конструкций. Тбилиси, 1974. Vol. 2. С. 34-37.
18. Hyeng Ch. A. Bock, Krivoshapko S.N. Umbrella-Type Surfaces in Architecture of Spatial Structures// IOSR Journal of Engineering. 2013. 3(3). Pp. 43-53 DOI: 10.9790/3021-03334353
19. Ариарский О.Е., Шагалова И.В., Кравченко Т.В., Кулакова Е.А. Морфология зонтичных поверхностей и их применение в архитектуре и проектировании// Труды ТДАТУ. 2011. 4(49). С. 178-190.
20. Кривошапко С.Н., Мамиева И.А. Зонтичные поверхности и поверхности зонтичного типа в архитектуре // Промышленное и гражданское строительство. 2011. № 7 (1). С. 27-31. <https://elibrary.ru/item.asp?id=16522830>
21. Kadam S.S., Gandhe G.R., Tupe D.H. Advanced Modeling and Analysis of Plate and Inverted Umbrella Roof Shell Using ANSYS// IJSR. 2019. 8(2). Pp. 538-542. www.ijsr.net
22. Mamieva I.A. Influence of the geometrical researches of ruled surfaces on design of unique structures// Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. 15(4). Pp. 299-307. DOI 10.22363/1815-5235-2019-15-4-299-307
23. Kadam S.S., Gandhe G.R., Tupe D.H. Finite Element Analysis Of Hyperbolic Paraboloid Shell By Using ANSYS// IRJET. 2017. 04(02). Pp. 99-104. www.irjet.net
24. Klochkov Yu.V., Nikolaev A.P., Kiseleva T.A., Marchenko S.S. Comparative analysis of the results of finite element calculations based on an ellipsoidal shell// Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2016. 45(4). Pp 328–336.

25. Forty Andrian. Building of the Month. The Twentieth Century Society. 2012. <http://www.c20society.org.uk/docs/building/poultry.html>
26. Maan H. Jawad. Design of Plate & Shell Structures. ASME Press. 2004. 476 p. <https://www.wiley.com/en-am/exportProduct/pdf/9781860583322>
27. Adriaenssens S., Block P., Veenendaal D., Williams C. (editor). Shell Structures for Architecture: Form Finding and Optimization. Routledge London. 2014. 340 p. <https://block.arch.ethz.ch/brg/publication/shells-for-architecture-form-finding-and-structural-optimization>
28. Soliman M.A., Mahmoud W.M., Solouma E.M., Bary M. The new study of some characterization of canal surfaces with Weingarten and linear Weingarten types according to Bishop frame// J of the Egyptian Mathematical Society. 2019. 27:26. <https://doi.org/10.1186/s42787-019-0032-y>
29. Иванов В.Н. Архитектурные композиции на основе поверхностей Кунса// Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2007. 4. С. 5-10 https://elibrary.ru/download/elibrary_11532259_27974679.pdf
30. Королев Е.А., Фомина Т.Н. Минимальные поверхности Петерсона// Украин. геометр. сборник. 1979. 22. С. 92-96.
31. Младзиевский Б.К. О поверхностях, связанных с поверхностями Петерсона// Математический сборник. 1900. 21. С. 450-460
32. Degen W. Die zweiflachen Blutelschen Kegelschnittflächen// Manuscr. Math. 1986. 55(1). Pp 9-38.
33. Кривошапко С.Н., Шамбина С.Л. Исследование и визуализация ротативных и спироидальных поверхностей// Прикладна геометрія та інженерна графіка. Праці Таврійський державний агротехнологічний університет. Вип. 4, т. 49. Мелітополь: ТДАТУ, 2011. С. 33-41.

Information about authors:

Mamieva Iraida A.

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russia,
leading specialist of the Engineering Academy of RUDN University
E-mail: i_mamieva@mail.ru

Gbaguidi-Aisse Gerard L.

Laboratoire d'énergétique et de mécanique appliquées (LEMA) Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi/
Univ. d'Abomey-Calavi BP 2009 Cotonou, République du Bénin,
DSc, Professor, Conseiller Technique Charge des Infrastructures, des Equipements Universitaires
E-mail: gbaguidi.gerard@yahoo.fr

Информация об авторах:

Мамиева Ираида Ахсарбековна

Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация,
ведущий специалист Инженерной академии РУДН,
E-mail: i_mamieva@mail.ru

Гбагуди Айссе Жерар Леопольд

Университет Абомей-Калави, 02 BP 244 Котону, Республика Бенин,
д-р техн. наук, профессор, советник министра образования республики Бенин,
E-mail: gbaguidi.gerard@yahoo.fr

СТЕНОВЫЕ ПАНЕЛИ НА ОСНОВЕ КАССЕТНЫХ ПРОФИЛЕЙ. ЧАСТЬ 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

НАДОЛЬСКИЙ В.В., МАРТЫНОВ Ю.С., ВЕРЕВКА Ф.А.

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

Аннотация. На современном этапе развития ограждающих конструктивных систем широкое применение в качестве стеклового ограждения получают конструктивные системы на основе тонкостенных оцинкованных профилей и эффективных утеплителей. Наибольшее распространение получило стекловое ограждение поэлементной сборки. Вместе с тем, появляются новые решения в виде панелей, компонуемых из элементов заводской готовности. Последние помимо технологических преимуществ по сравнению со стеклами поэлементной сборки обладают повышенной несущей способностью и жесткостью. В настоящей статье представлено конструктивное решение стекловой самонесущей панели на основе кассетных профилей и профилированного настила, объединенных в единую пространственную конструктивную систему.

Цель работы состояла в научном обосновании нового конструктивного решения панели на основе кассетных профилей и экспериментальном подтверждении её работоспособности. Объектом исследования является стекловое ограждение (панели) на основе указанных профилей. Методы исследования: численно – аналитические методы, экспериментальные исследования модели натурных размеров, графический анализ.

Статья состоит из двух частей. Первая часть посвящена описанию, анализу и обоснованию конструкции стекловой панели, исследованию деформированного состояния кассетного профиля и оценке сопротивления и жесткости стекловой панели на основе расчетного метода. Во второй части отражены результаты экспериментальных исследований панели и ее компонентов, а также реализована процедура проектирования на основе испытаний.

Ключевые слова: тонкостенные профили, холодноформованные профили, характеристики эффективного сечения, закритическая работа пластин, потеря местной устойчивости, потеря устойчивости формы сечения.

WALL PANELS BASED ON CASSETTE PROFILES. PART 2. EXPERIMENTAL RESEARCHES

NADOLSKI V.V., MARTYNOV Y.S., VIAROUKA F.A.

Belarusian National Technical University (BNTU), Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Systems based on thin-walled galvanized profiles and effective heaters are widely used as wall fencing at present stage of development of enclosing structural systems. Wall fencing based on one-element assembly is most widespread. At the same time new solutions in the form of panels assembled from prefabricated elements are appeared. The latter in addition to technological advantages in comparison with the one-element assembly wall fencing have increased bearing capacity and rigidity. This article presents a constructive solution of a self-supporting wall panel based on cassette profiles and deck profiled sheets, combined into a single spatial structural system.

The purpose of the work was to scientifically justify and experimentally confirm the operability of a new structural solution of the panel based on the cassette profile. The object of the study is a wall fence (panel) based on such profiles. Research methods: numerical and analytical methods, experimental studies of the full-scale model, graphical analysis.

The article consists of two parts. The first part is devoted to the description, analysis and justification of the design of the wall panel and to the study of the deformed state of the cassette profile and the assessment of the resistance and stiffness of the wall panel based on the calculation method. The second part reflects the results of experimental studies of the panel and its components, and also implements a design procedure based on tests.

Keywords: thin-walled profiles, cold-formed profiles, effective cross-sectional characteristics, supercritical plate operation, loss of local stability, loss of stability of the cross-section shape.

Введение

Настоящая статья является продолжением комплексного исследования стеновой панели на основе кассетных профилей. В статье [0] представлены результаты теоретических исследований. Представлена конструкция стеновой панели на основе кассетных профилей и профилированного настила из нержавеющих сталей, исследовано деформированное состояние кассетного профиля и выполнена оценка сопротивления и жесткости стеновой панели на основе расчетного метода.

Данная статья посвящена экспериментальным исследованиям панели и ее компонентов, а также реализации процедуры определения несущей способности и жесткости на основе данных(результатов), полученных в ходе испытаний. В данной части статьи представлены следующие результаты экспериментальных исследований:

- установлены физико-механические характеристики: предел текучести, временное сопротивление нержавеющей стали, примененной при изготовлении кассетного профиля;
- определена несущая способность соединения тонкостенных профилей на электрозаклепках при сдвиге и растяжении;
- испытана стеновая панель на два варианта нагружения, соответствующих ветровой нагрузке (активное и пассивное давление).

Анализ экспериментальных данных выполнен на основе принципов и правил расчета согласно европейским нормам [0, 0], действующим на территории Республики Беларусь.

Методы проектирования на основе расчета [4 - 9] применимы *только* для конструкций, свойства материалов и геометрические параметры которых находятся в области, для которой накоплен достаточный опыт и доступны экспериментальные данные. Ввиду сложной формы сечения исследуемой панели теоретически сложно и трудоемко установить количественные критерии для редуцирования сечения.

Учитывая вышеизложенное основным экономичным методом проектирования панелей следует считать метод, основанный на результатах испытаний. Проектирование на основе испытаний позволяет определить предельный фактический изгибающий момент и жесткость. Характеристическое (нормативное) значение сопротивления, на основе которого устанавливается расчетное значение, допускается определять статистически (т.е. с заданной доверительной вероятностью) при наличии не менее 4-х результатов испытаний (A.6.3 ТКП EN 1993-1-3[0]). Если проведено только одно испытание, то нормативные (характеристические) значения следует определять на основе скорректированного значения результата испытания $R_k = 0.9 \eta_k \cdot R_{adj}$, где $\eta_k = (0.8-0.9)$ при отказе вследствие потери местной устойчивости тонкостенных компонентов сечения (A.6.3 ТКП EN 1993-1-3[0]). Расчетное значение сопротивления принимается равным $R_d = \eta_{sys} \cdot R_k / \gamma_m$, где η_{sys} – коэффициент, учитывающий отличие работы в условиях испытаний и эксплуатации; γ_m – частный коэффициент.

Необходимость проведения испытаний связана также с отсутствием апробированной методики расчета стеновых панелей на основе кассетных профилей. Цель испытаний - оценка несущей способности и жесткости стеновых панелей из кассетных профилей на действие нагрузки, эквивалентной по значению расчетному ветровому воздействию с учетом пульсационной составляющей.

Испытания нержавеющих сталей кассетного профиля и профилированного листа

Для определения фактических характеристик стали были выполнены испытания образцов на растяжение, по результатам которых установлены предел текучести и временное сопротивление (предел прочности). Среднее опытное значение предела текучести листовой нержавеющей стали кассетного профиля (на основании испытаний 10 образцов - 250.7 МПа) превышает характеристическое значение, регламентированное СТБ EN 10088 [9] и ТКП EN

1993-1-4 [10] (220 Мпа). Среднее опытное значение предела текучести листовой нержавеющей стали профнастила составило 244.3 МПа. Отметим, что теоретический (расчетный) уровень напряжений от действия ветровой нагрузки в профнастите фасадной поверхности панели составил 12 МПа, что значительно меньше опытного значения предела текучести и, таким образом, не является определяющим при оценке несущей способности стеновой панели.

Испытание соединений

Для определения фактической несущей способности сварных точек (электrozаклепок), формируемых контактной сваркой сопротивлением, и в целях верификации расчетных зависимостей по оценке прочности указанных соединений согласно требованиям ТКП ЕН 1993-1-3 [0] были выполнены испытания на срез и растяжение стандартных образцов с толщинами (1.2+0.8) мм и (0.8+0.8) мм по 7 шт. в каждой серии.

При испытании выявлено несоответствие фактического значения внутреннего диаметра электrozаклепок с вычисленным согласно ТКП ЕН 1993-1-3 [0]: опытное значение находилось в диапазоне 2.9-3.1 мм, а вычисленное составило 4.5 мм. Это расхождение обусловлено конкретными технологическими процессами контактной сварки (временем обжатия, нагрева, проковки и охлаждения соединяемых листов) и диаметрами электродов в контактной зоне.

По результатам статистической обработки опытных данных несущая способность одной электrozаклепки составила:

- на срез среднее значение составило 4608 Н, минимальное 4163 Н;
- на растяжение (вырыв) значение составило 1204 Н, минимальное 1014 Н;

Таким образом, опытные значения несущей способности значительно превышают усилия, возникающие в соединениях профнастила с кассетным профилем. Это позволяет уменьшить количество электrozаклепок. Однако, при этом следует учитывать, что часть электrozаклепок обеспечивает раскрепление узких полок от потери местной устойчивости.

Значения несущей способности вытяжной заклепки приняты согласно ТС 05.0309.14 [11]. Несущая способность одной вытяжной заклепки на срез 3.44кН, на растяжение 3.24кН.

Общие положения по испытанию образцов стеновой самонесущей панели натурных размеров

Для проведения испытаний панели изготовлен опытный образец в соответствии с заданными геометрическими размерами и технологией сборки, с соблюдением всех технических требований к материалам и соединениям.

Для моделирования работы стенового ограждения на основе кассетных профилей разработаны следующие схемы испытания:

- Схема испытания А – для моделирования работы стенового ограждения на действие активного давления ветра;
- Схема испытания Б – для моделирования работы стенового ограждения здания на действие пассивного давления ветра.

Перед началом испытаний обследовано техническое состояние конструкции визуальным осмотром на предмет наличия дефектов и повреждений, влияющих на несущую способность. Конструкция испытательной установки состоит из опорных элементов коробчатого сечения. Опирание панели в зависимости от выбранной схемы испытания различаются. В соответствии со схемой А панель опирается непосредственно на опорные элементы, а по схеме Б опорные усилия передаются посредством шпилек диаметром 8 мм на жесткие балочные элементы, состоящие из двух прокатных швеллеров. В целях безопасности испытаний в обеих схемах предусмотрены страховочные опоры в третях пролетах панели с постоянно контролируемым зазором 150 мм между опорами и поверхностью стеновой панели. С целью ис-

ключения «рыхлых» деформаций, обусловленных недостаточной плотностью соединений и обжатием опорных частей, панель была опрессована пробным загружением.

В основу схемы нагружения положены принцип симметричности расположения грузов и примерно равномерного их распределения вдоль пролета. Нагружение панели осуществлялось посредством системы конструктивных элементов (рисунок 1):

– деревянных брусков сечением 60x60 мм небольшой длины (с целью снижения эффекта неразрезности), расположенных в гофрах фасадной поверхности панели при испытании по схеме А и поперек полок кассетного профиля – при испытании по схеме Б;

– стальных прокатных уголков 50x5, являющихся опорами для штучных грузов массой 20кг.

Нагружение осуществлялось ступенями. На каждой ступени предусматривалась выдержка до стабилизации показаний прогибомеров и индикаторов. Прогибы панели и горизонтальные смещения полок относительно друг друга фиксировались измерительными приборами, а внешние проявления изменения напряженно-деформированного состояния – визуально. При достижении уровня нагрузки, соответствующей контрольной нагрузке по жесткости, выдержка составляла 30 минут.

Испытание образцов стеновой панели по схеме А

Вертикальные (прогибы) и горизонтальные перемещения конструкции фиксировались измерительными приборами (рисунок 1). В середине пролета были установлены прогибомеры 6ПАО с ценой деления 0,01 мм: П-7(8, 10, 11)- для измерения вертикальных перемещений, П-9- для фиксации локальных деформаций(коробления) широкой полки кассетного профиля, П-3(4) - для фиксации возможных горизонтальных перемещений, возникающих при изгибо-крутильной форме потери устойчивости. На опорах О-1(2) и О-5(6) были установлены индикаторы ИЧ-10 с ценой деления 0,01 мм для измерения осадок опор.

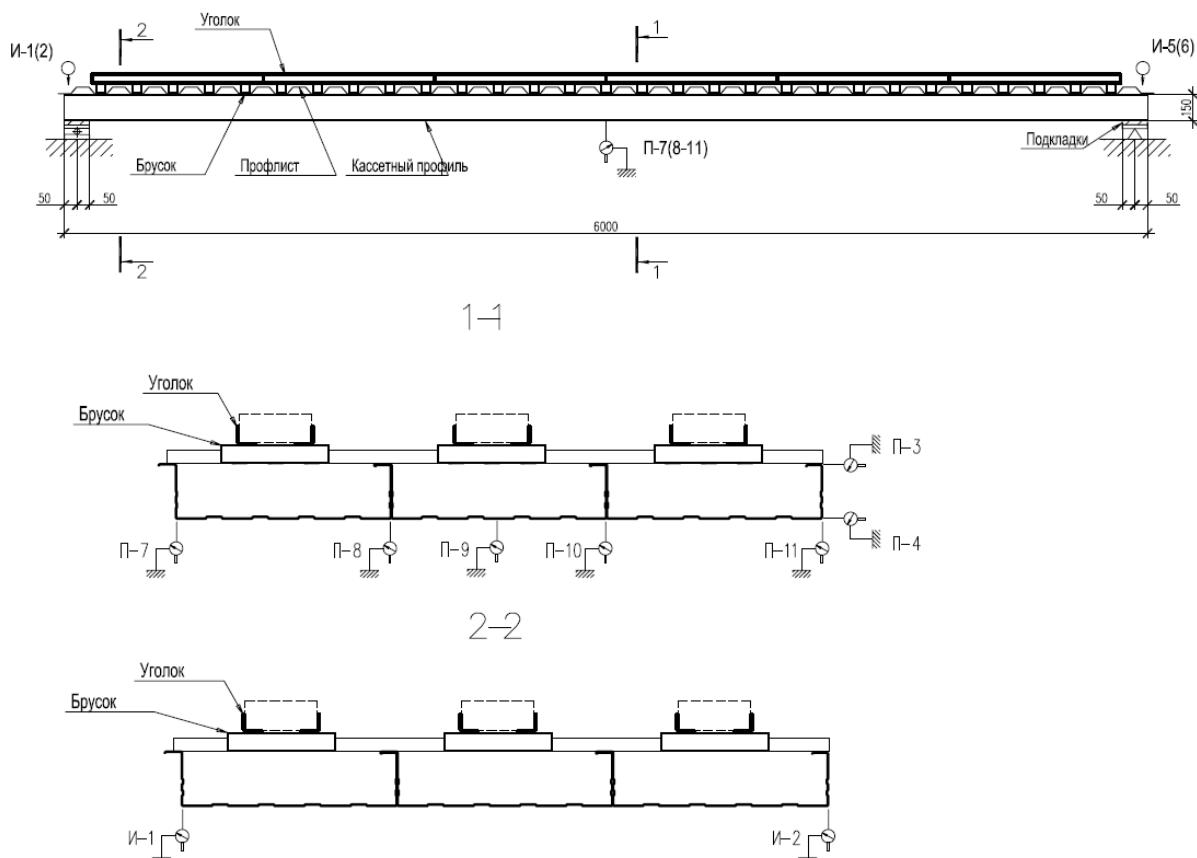


Рисунок 1 – Схема испытания панели по схеме А



Рисунок 2 – Общий вид схемы испытания панели по схеме А. Этап нагружения 8.*

На основе показаний прогибометров с учетом осадок опор определены прогибы в середине пролета панели на каждой ступени нагружения (таблица 1). По средним значениям измерений прогибов в 4-х точках по ширине панели построен график зависимости прогиба от изгибающего момента, соответственно испытательной нагрузке: $f_s - M_s$.

Таблица 1 – Прогибы

№ Нагр.	M, кгс*м	Прогибы, мм				
		f7	f8	f10	f11	средний
0	0/450	-	-	-	-	0/7.49
1	219/669	4.00	4.04	4.09	3.93	4.02/11.51
2	423/873	7.43	7.62	7.79	5.73	7.14/14.63
3	603/1053	8.66	11.02	11.46	11.41	10.64/18.13
4	699/1149	12.63	13.13	13.67	13.57	13.25/20.74
5	927/1377	17.39	18.22	19.13	19.10	18.46/25.95
6*	979/1429	17.84	19.82	20.73	20.62	19.75/27.24
6	1083/1533	22.06	22.97	22.12	23.99	22.78/30.27
7	1263/1713	28.13	29.22	27.49	29.29	28.53/36.02
8	1336/1786	31.24	32.60	34.30	34.20	33.08/40.57
0	0/450	4.29	5.05	5.77	6.08	5.50/12.79

Примечание: над чертой показаны значения моментов и прогибов без учета нагрузки от собственного веса панели, под чертой – с учетом этой нагрузки.

Между 4-ой и пятой ступенью нагружения было зафиксировано появление и последующее развитие потери местной устойчивости узкой полки кассетного профиля краевой зоны панели (на рисунке 4 показано выпучивание сжатых полок кассетного профиля). Для рассматриваемого конструктивного решения данное событие является прогнозируемым [1], но при этом следует иметь в виду, что потеря устойчивости части сечения не является критерием наступления отказа конструкции (наступления предельного состояния) [0, 12, 13]. Эта стадия работы панели характеризуется повышением приращений значений перемещений по сравнению с приращениями нагрузки. Дальнейший рост сопротивления обеспечивается работой эффективного сечения вплоть до достижения предела текучести или предельного значения прогиба панели (A.6.1 ТКП ЕН 1993-1-3[0]).

В диапазоне нагружения 600-800 кг·м появились зазоры в местах присоединения профилированного листа к кассетному профилю вытяжной заклепкой (рисунок 4), что свидетельствует о развитии первой формы потери устойчивости кассетного профиля. Это явление закономерно, т.к. сжатые полки краевой зоны панели закреплены с шагом 200 мм, что соответствует длине волны при потере местной устойчивости [1]. Прогибомером П-9 зафиксировано коробление (выгиб) растянутых широких полок кассетного профиля.

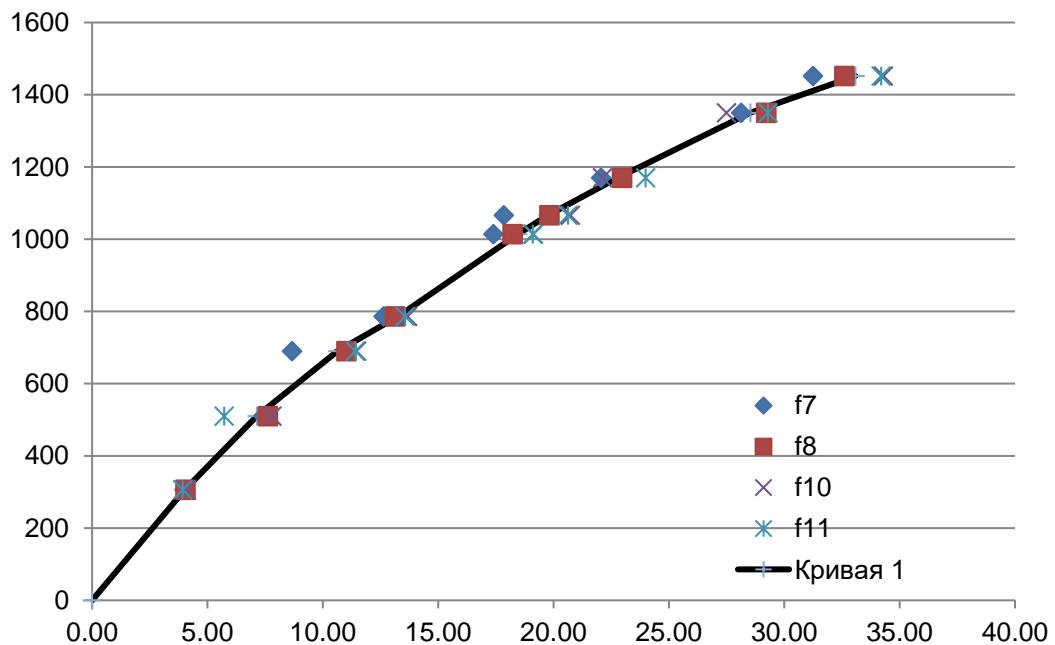


Рисунок 3 – Зависимость прогиба f , мм от изгибающего момента M , кг·м при испытании по схеме А



Рисунок 3 – Потеря устойчивости сжатой узкой полки кассетного профиля краевой зоны панели и разрушение соединения на вытяжной заклепке. Этап нагружения 6.

Вследствие отмеченных явлений (потери местной устойчивости и коробления) последующему поведению конструкции под нагрузкой носит нелинейный характер вплоть до достижения установленного проектом значения нагрузки. Отметим, что речь идет о значении

испытательной нагрузки, а не о предельно возможной, соответствующей достижению предельного состояния несущей способности. Испытания не доведены до полного исчерпания несущей способности в связи с предполагаемыми испытаниями на огнестойкость.

Испытание образцов стеновой панели по схеме Б

В середине пролета были установлены прогибомеры бПАО с ценой деления 0,01 мм: П-1(2, 3, 4)- для измерения прогибов в середине пролета. На опорах О-1(2) и О-3(4) установлены индикаторы ИЧ-10 с ценой деления 0,01 мм для измерения осадок опор (рисунок 5).

На основании показаний прогибомеров с учетом осадок опор определены прогибы в середине пролета панели на каждой ступени нагружения (таблица 2).

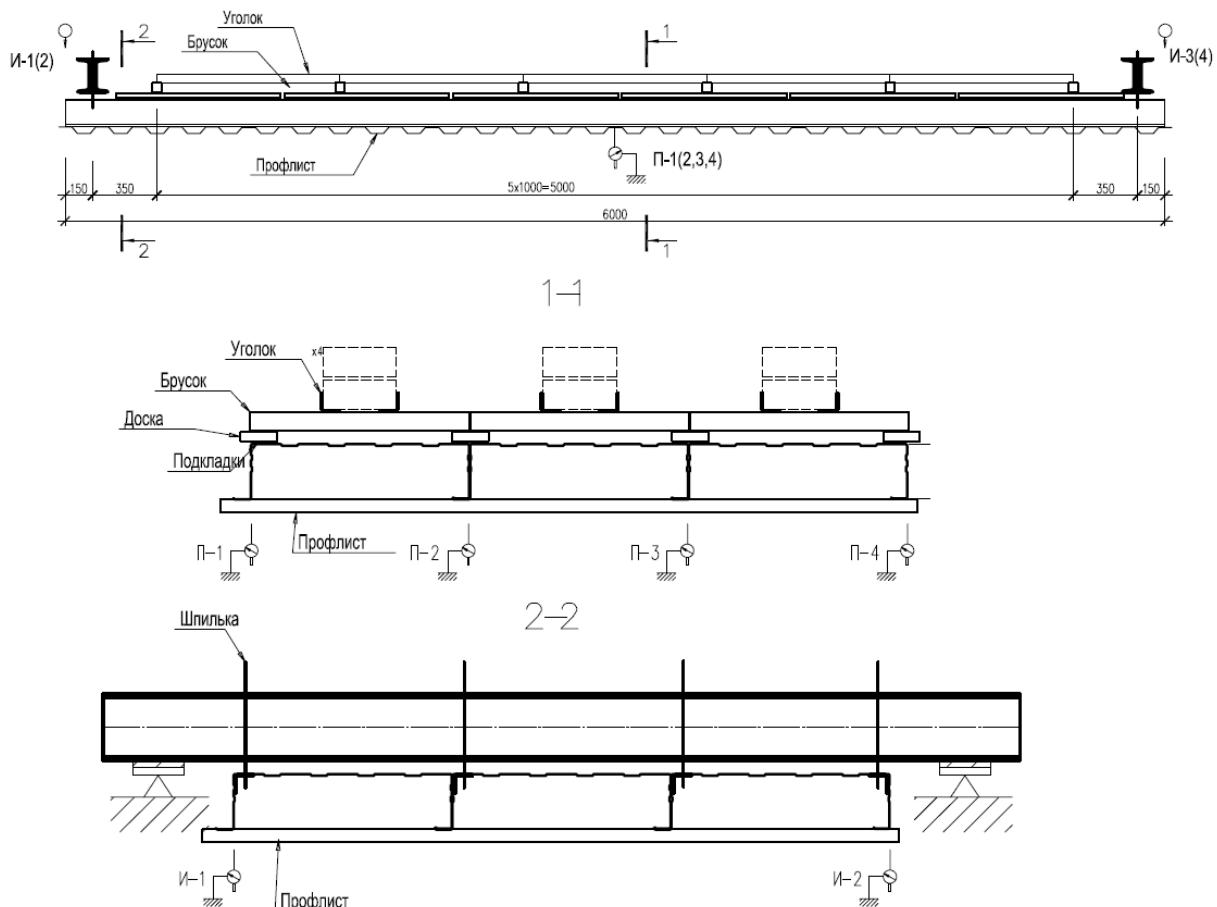


Рисунок 4 – Схема испытания панели по схеме Б

Таблица 2 – Прогибы

№ Нагр.	M, кг*м	Прогибы, мм				
		f1	f2	f3	f4	средний
0	0/435	–	–	–	–	0/6.99
1	245/680	4.18	4.44	4.51	4.58	4.43/11.42
2	513/948	11.21	8.13	8.23	1.198	9.89/16.88
3	663/1098	17.21	14.22	14.35	18.37	16.03/23.02
4	885/1320	18.41	19.22	19.47	19.88	19.24/26.23
5	1119/1554	18.32	26.59	25.62	27.72	24.563/1.55
6	1293/1728	22.41	30.30	31.07	32.26	29.01/36.00
0	0/435	0.68	5.08	6.15	7.20	4.78/11.77

Примечание: над чертой показаны значения моментов и прогибов без учета нагрузки от собственного веса панели, под чертой – с учетом этой нагрузки.

На рисунке 6 представлена зависимость прогиба конструкции стенового ограждения от значения изгибающего момента в центре пролета.

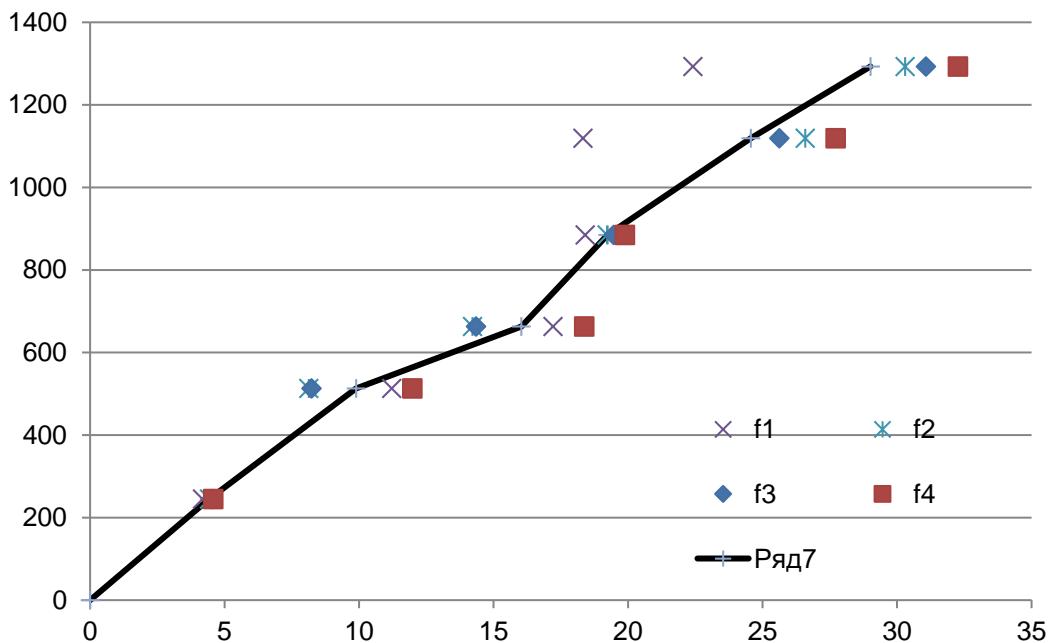


Рисунок 5 – Зависимость прогиба f , мм от изгибающего момента M , кг*м при испытании по схеме Б

Отклонение зависимости от линейного характера на этапе нагружения 3 может свидетельствовать о выключении из работы гибкой части кассетного профиля – сжатой широкой полки. На этом этапе искажение профиля визуально не замечено, однако на последующих этапах нагружения искажения профиля начали проявляться. Повышение жесткости (момента инерции) панели на последующих ступенях испытаний возможно обусловлено выравниванием и включением в работы растянутых узких полок, наиболее деформируемых в процессе последующих испытаний по схеме А. Отметим, что испытания по схеме А и Б были выполнены на одном и том же образце панели не доведены до полного исчерпания несущей способности в связи с предполагаемыми испытаниями панели на огнестойкость.

Анализ экспериментальных данных и определение несущей способности по полученным результатам

Интегральной характеристикой напряжено-деформированного состояния изгибаемых элементов является график зависимости прогибов от изгибающего момента $f - M$. Для анализа результатов испытаний панели построены следующие графики зависимостей (рисунок 7):

- Зависимость 1 – опытных значений прогибов $f_3 - M_3$ по средним значениям измерений;
- Зависимость 2 – теоретических значений прогибов, вычисленных на основе полного сечения $f_{T1} - M_3$;
- Зависимость 3 – то же на основе полного редуцирования сечения $f_{T2} - M_3$, согласно ТКП EN 1993-1-3[0];
- Зависимость 4 – то же на основе частичного редуцирования сечения $f_{T3} - M_3$, где $f_{T3} = 0.5 \cdot (f_{T2} + f_{T1})$.

Начальный отрезок зависимости от собственного веса панели и испытательных приспособлений установлен расчетным путем.

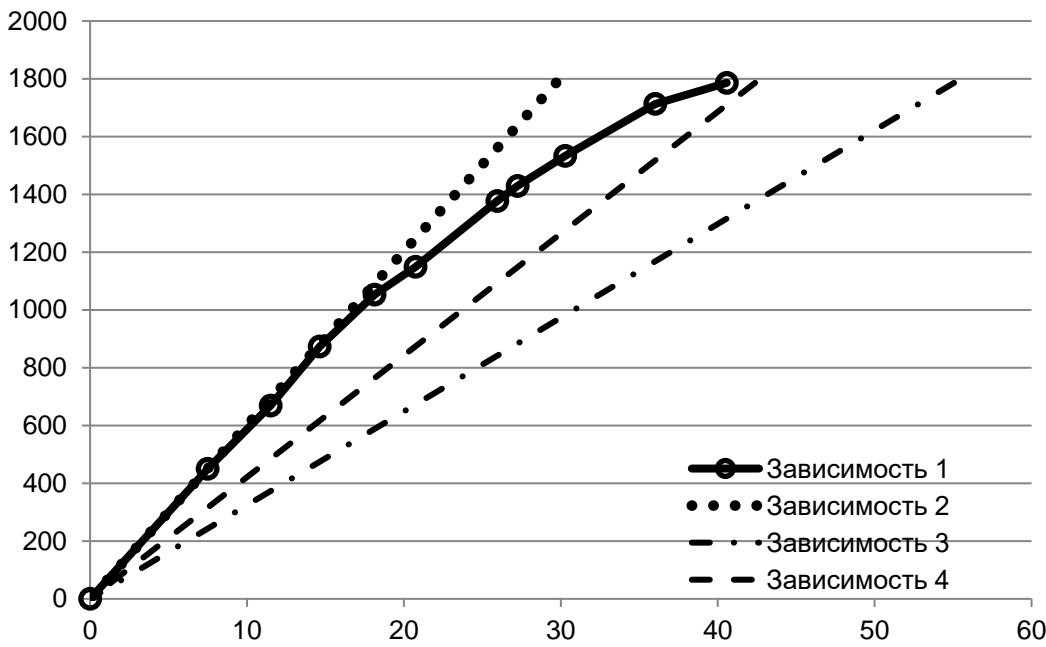


Рисунок 6 – Зависимости прогиба f , мм от изгибающего момента M , $\text{кг}\cdot\text{м}$ при испытании по схеме А

Сопоставляя полученные зависимости можно отметить:

- хорошую сходимость опытных данных (зависимость 1) и теоретических значений (зависимость 2) до 4-ой ступени нагружения ($M_{Ed} = 786 \text{ кг}\cdot\text{м}$), т.е. до потери местной устойчивости сжатых узких полок периферийных зон кассетных профилей;
- расхождение зависимостей 1 и 2, увеличивающееся с ростом момента. Если учесть частичное редуцирование сечения, то очертание экспериментальной зависимости 1 ближе к теоретической зависимости 4, чем к зависимости 3. При этом теоретические значения меньше экспериментальных, т.е. соблюдается требования предельного состояния по несущей способности. К сожалению, этот промежуточный этап работы сечения, позволяющий получить оптимальную толщину листа кассетного профиля, прогнозируется только сложным анализом НДС с использованием специальных программных комплексов и не может быть реализован в реальном проектировании. Отметим, что согласно разделу 7 ТКП ЕН 1993-1-3 [0] частичное редуцирование альтернативно допускается при определении прогибов [0, п 7.1].
- равномерное распределение прогибов по ширине панели на всех ступенях нагружения и этапах работы конструкции под нагрузкой.

Стеновая панель испытана на действие изгибающего момента от приложенной нагрузки $M_{Ed} = 1336 \text{ кг}\cdot\text{м}$, при этом с учетом собственного веса M_{obs} составляет $1786 \text{ кг}\cdot\text{м}$. Скорректированное значение этого момента $M_{adj,i}$ согласно А.6.3 [0] равно:

$$M_{adj} = M_{obs} / \mu_R = 1786 / 1.04 = 1717 \text{ кг}\cdot\text{м}$$

где μ_R — поправочный коэффициент по несущей способности:

$$\mu_R = \left(\frac{f_{yb,obs}}{f_{yb}} \right)^\alpha \cdot \left(\frac{t_{obs,cor}}{t_{cor}} \right)^\beta = \left(\frac{250.7}{220} \right)^\alpha \cdot \left(\frac{1.18}{1.20} \right)^\beta = 1.04,$$

здесь $\alpha = 0,5$ так как потеря местной устойчивости является формой разрушения, $\beta = 1$ так как $t_{obs,cor} \leq t_{cor}$.

Характеристическое значение изгибающего момента, основанного только на одном результате испытания:

$$M_k = 0,9\eta_k M_{adj} = 0.9 \cdot 0.9 \cdot 1725 = 1391 \text{ кг}\cdot\text{м}$$

где η_k — коэффициент, принимается в зависимости от формы разрушения. При испытании панели имеет место потеря местной устойчивости в ограниченной зоне сечения панели, поэтому $\eta_k = 0,9$.

Расчетное значение несущей способности M_d установлено на основе соответствующего нормативного значения M_k , определенного по результатам испытаний:

$$M_d = \eta_{sys} \cdot \frac{M_k}{\gamma_M} = 1391 \text{ кг}\cdot\text{м}$$

где $\gamma_M = 1.0$ — частный коэффициент безопасности;

η_{sys} — коэффициент условий работы, учитывающий отличия работы в условиях испытаний и эксплуатации. При испытании образцов натурных размеров при закреплениях, идентичных натурным, $\eta_{sys} = 1.0$.

Для анализа результатов испытаний панели по схеме Б построены графики зависимостей, аналогичные описанным выше (рисунок 8).

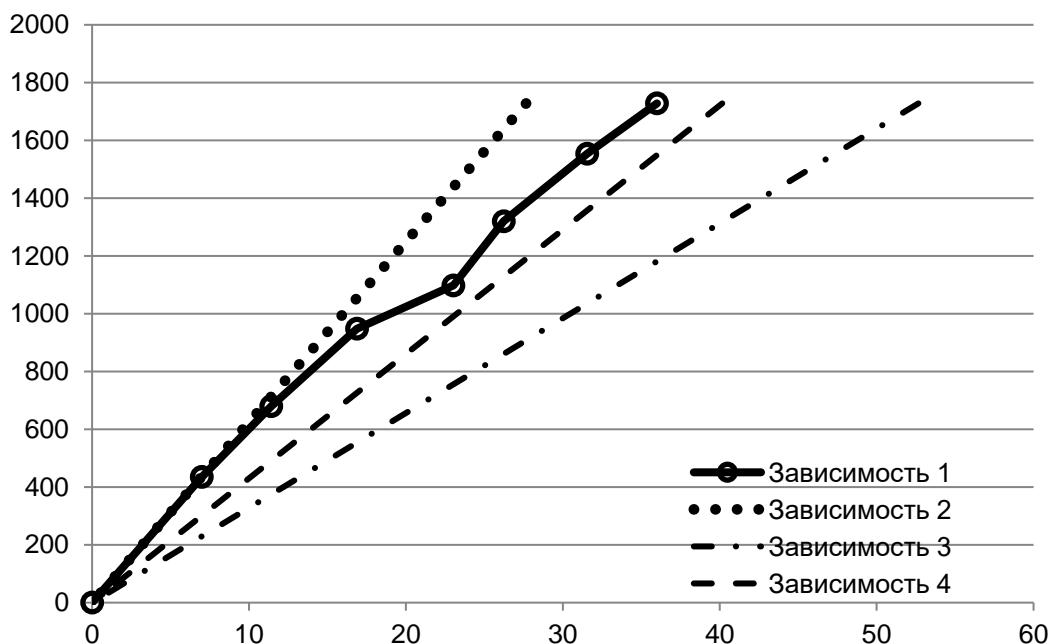


Рисунок 7 – Зависимости прогиба f , мм от изгибающего момента M , кг·м при испытании по схеме Б

Сопоставляя зависимости можно отметить:

- Линейный характер работы сечения при полностью эффективном сечении до изгибающего момента $M_{Ed} = 680 \text{ кг}\cdot\text{м}$. В дальнейшем произошло незначительное снижение жёсткости сечения вследствие коробления (выгиба) широкой полки;
- Равномерное распределение прогибов по ширине панели на всех ступенях нагружения и этапах работы конструкции под нагрузкой.

Стеновая панель испытана на действие изгибающего момента от приложенной нагрузки $M_{Ed} = 1293 \text{ кг}\cdot\text{м}$, при этом с учетом собственного веса опытное значение M_{obs} составляет 1728 кг·м. На основании процедуры определения несущей способности по органи-

ченну колличеству результатов *расчетное значение* несущей способности M_d устанавливается на основе соответствующего нормативного значения M_k , определенного по результатам испытаний составило 1348 кг·м.

Заключение

На основании результатов экспериментально-теоретических исследований можно сделать следующие выводы и предложить некоторые рекомендации:

1. Натурные испытания подтвердили прогнозируемое поведение панели под нагрузкой и целесообразность проектирование панелей на основе испытаний.

2. Проектирование стеновых панелей на основе расчета без учета совместной работы её компонентов не отражает фактическую несущую способность и жесткость панели, является не эффективным и не объективным. В связи с этим до накопления достаточной экспериментальной базы данных и до более точной разработки апробированной расчетной методики определения несущей способности и жесткости панели рассматриваемого типа целесообразно *устанавливать предельную несущую способность и жесткость посредством испытаний*. Эти испытания могут расцениваться как приемочные [0, п. А.4.1]. Если испытано более трех прототипов панелей и они отвечают всем требованиям испытаний, то остальные панели ряда «допускается использовать без дальнейших испытаний при условии их соответствия протоколам по всем показателям исходных материалов и комплектующих изделий» [0, п. А.4.2].

3. Распределение прогибов по ширине панели на всех ступенях нагружения и этапах работы конструкции под нагрузкой носит равномерный характер. Это позволяет рассматривать панель как пространственную конструктивную систему, которой присущи такие важные свойства, как перераспределение внутренних усилий между её компонентами, живучесть и надежность конструкции. В испытываемой панели перераспределение усилий имеет место между периферийными зонами поперечного сечения крайних кассетных профилей (редуцированных вследствие потери местной устойчивости сжатых узких полок) и средней зоны сечения панели, где местная устойчивость промежуточных полок кассетного профиля повышена конструктивными мерами.

Степень редуцирования поперечного сечения панели в значительной мере зависит от сжатой узкой полки кассетного профиля краевых зон панели. Для повышения эффективности сечения рекомендуется:

а) увеличить ширину отгиба узких полок кассетного профиля. При этом достигается дополнительный эффект: значительное уменьшение количества соединений, прикрепляющих фасадную поверхность к кассетному профилю, или

б) усилить сжатую узкую полку дополнительным тонкостенным профилем, прикрепленным электрозаклепками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мартынов Ю.С., Надольский В.В., Верёвка Ф.А. Стеновые панели на основе кассетных профилей. Часть 1. Теоретические исследования // Строительство и реконструкция. 2019. № 4 (84). С. 26 – 37.
2. Еврокод. Основы проектирования строительных конструкций: ТКП EN 1990-2011. Введ. 01.07.12. Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2012. 70 с.
3. Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-3. Общие правила. Дополнительные правила для холодноформованных элементов и профилированных листов: ТКП EN 1993-1-3-2009. Минск: МАиС, 2014.
4. Schafer B. W., Ádány S. Buckling analysis of cold-formed steel members using CUFSM: conventional and constrained finite strip methods // Proceedings of 18th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, October 26-27, 2006. Orlando, Florida. 2006. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org> (Available on 15.05.2019).
5. Cheung Y.K., Tham L.G. The Finite Strip Method // CRC Press. 1998. Pp. 7–28.

6. Papangelis J.P., Hancock G.J. Computer analysis of thin-walled structural members // Computers & Structures, Pergamon. 1995. 56(1). Pp. 157-176.
7. Rhodes J. Post-buckling analysis of light gauge members using finite strips // Sixteenth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures. Orlando, FL USA, October 7-18, 2002.
8. Silvestre N., Camotim D. First-order generalised beam theory for arbitrary orthotropic materials // Thin-Walled Structures. 2002. 40 (9). Pp. 755-789
9. Стали нержавеющие. Часть 3. Технические условия поставки полуфабрикатов, стержней, прутков, катанки и профилей из коррозионностойких сталей общего назначения: СТБ EN 10088-3-2009.
10. Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-4. Общие правила. Дополнительные правила для нержавеющей стали: ТКП EN 1993-1-4-2009. Минск: МАиС, 2010.
11. Техническое свидетельство пригодности материалов и изделий для применения в строительстве: ТС 05.0309.14.
12. Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-5. Пластинчатые элементы конструкций: ТКП EN 1993-1-5-2009. Минск: МАиС, 2010.
13. Надольский В.В. Дергачев М.Г. Метод эффективной ширины для тонкостенных холодноформованных элементов согласно требованиям ЕвроКода 3 // Вестник ПГУ. Серия F. Строительство. Прикладные науки. 2017. № 8. С. 105 – 111.

REFERENCES

1. Martynov YU.S., Nadol'skiy V.V., Verovka F.A. Stenovyye paneli na osnove kassetnykh profiley. Chast' 1. Teoreticheskiye issledovaniya [Wall panels based on cassette profiles. Part 1. Theoretical researches]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2019. No 4 (84). Pp. 26 – 37.
2. Eurocode. Osnovy proyektirovaniya stroitel'nykh konstruktsiy [Fundamentals of the design of building structures]: TKP EN 1990-2011. Introduced 01.07.12. Minsk: Ministry of Architecture and Construction of Republic of Belarus, 2012. 70 p.
3. Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1-3. General rules. Additional rules for cold formed elements and profiled sheets: TKP EN 1993-1-3-2009. Minsk: MAiS, 2014.
4. Schafer BW, Ádány S. Buckling analysis of cold-formed steel members using CUFSM: conventional and constrained finite strip methods. Proceedings of the 18th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, October 26-27, 2006. Orlando, Florida. 2006. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org> (Available on 05/15/2019).
5. Cheung Y.K., Tham L.G. The Finite Strip Method. *CRC Press*. 1998. Pp. 7–28.
6. Papangelis J.P., Hancock G.J. Computer analysis of thin-walled structural members. *Computers & Structures*. 1995. 56 (1). Pp. 157-176.
7. Rhodes J. Post-buckling analysis of light gauge members using finite strips. Sixteenth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures. Orlando, FL USA, October 7-18, 2002.
8. Silvestre N., Camotim D. First-order generalized beam theory for arbitrary orthotropic materials. *Thin-Walled Structures*. 2002. 40 (9). Pp. 755-789.
9. Stainless steel. Part 3. Technical conditions for the supply of semi-finished products, rods, rods, wire rods and profiles made of corrosion-resistant steel for general purposes: STB EN 10088-3-2009.
10. Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1-4. General rules. Additional rules for stainless steel: TKP EN 1993-1-4-2009. Minsk: MAiS, 2010.
11. Tekhnicheskoye svidetel'stvo prigodnosti materialov i izdeliy dlya primeneniya v stroitel'stve [Technical certificate of the suitability of materials and products for use in construction]: TS 05.0309.14.
12. Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1-5. Lamellar structural elements: TKP EN 1993-1-5-2009. Minsk: MAiS, 2010.
13. Nadol'skiy V.V. Dergachev M.G. Metod effektivnoy shiriny dlya tonkostennnykh kholodnoformovan-nykh elementov soglasno trebovaniyam Evrokoda 3 [The effective width method for thin-walled cold-formed elements according to the requirements of Eurocode 3]. *Vestnik PGU. Seriya F. Stroitel'stvo. Prikladnyye nauki*. 2017. No 8. Pp. 105 – 111.

Информация об авторах:

Надольский Виталий Валерьевич

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь,
Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Строительные конструкции»,
E-mail: Nadolskivv@mail.ru

Мартынов Юрий Семенович

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь,
Кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры «Строительные конструкции»,
E-mail: jusmar@mail.ru.

Верёвка Фёдор Александрович

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь,
аспирант, ассистент кафедры «Строительные конструкции»,
E-mail: verevka.fedor@mail.ru

Information about authors:

Nadolski Vitaly V.

Belarusian National Technical University (BNTU), Minsk, Republic of Belarus,
PhD, an assistant professor, an assistant professor Department of “Building constructions”,
E-mail: Nadolskivv@mail.ru

Martynov Yury S.

Belarusian National Technical University (BNTU), Minsk, Republic of Belarus,
PhD, professor, professor of Department of “Building constructions”,
E-mail: jusmar@mail.ru.

Viarouka Fiodar A.

Belarusian National Technical University (BNTU), Minsk, Republic of Belarus,
Postgraduate, assistant of Department of “Building constructions”,
E-mail: verevka.fedor@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЛИЯНИЯ НАВОДОРОЖИВАНИЯ НА НДС ПОЛОГОЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА

ТРЕЩЁВ А.А., КУЗНЕЦОВА В.О.

Тульский Государственный Университет, Тула, Россия

Аннотация. Рассмотрено построение математической модели, описывающей влияние наводороживания на напряжённо-деформированное состояние тонкой пологой сферической оболочки из титанового сплава, нагруженной равномерно-распределённой нагрузкой с использованием нелинейной модели, представленной в нормированных пространствах напряжений. Нагрузка принята таким образом, чтобы прогибы оболочки были большими. Закрепление оболочки жёсткое. Разработан алгоритм решения данного класса задач. Практическое решение производилось двухшаговым методом последовательных возмущений параметров с помощью пакета прикладных программ MatLab и Maple. Для решения системы разрешающих дифференциальных уравнений применён метод конечных разностей. Произведено сравнение полученных результатов с результатами классической теории и теории И.Г. Овчинникова.

Ключевые слова: пологая оболочка, титановый сплав, конечные разности, нелинейное деформирование, изотропный материал, большие прогибы.

SIMULATION OF THE PROCESS OF INFLUENCE OF FLUIDING ON STRESS-STRANE STATE OF THE FLAG SPHERICAL SHELL MADE OF TITANIUM ALLOY

TRESCHEV A.A., KUZNETSOVA V.O.

Tula State University, Tula, Russia

Abstract. The construction of a mathematical model describing the effect of flooding on the stress-strain state of a thin flat spherical shell of a titanium layer loaded with an equidistributed load using a nonlinear model is considered. By A.A. Treshchev. The load is adopted in such a way that the deflections of the shell are small. Fix of the shell is hard. An algorithm was developed to solve this class of problems. A practical solution was produced by the two-step method of sequential perturbation of parameters using the MatLab and Maple application software package. To derive and solve the system of resolving differential equations, the finite difference method was applied. A comparison of the results obtained with the results of the classical theory.

Keywords: flat shell, titanium alloy, finite differences, nonlinear characteristics, isotropic material, small deflections.

Введение

В настоящее время всё чаще инженеры проектируют здания, детали машин и аппаратов, которым до сегодняшнего момента не было аналогов. К ним относят современные спортивные комплексы, концертные залы, уникальные небоскрёбы, торговые и развлекательные центры, детали летательных аппаратов, ракетные комплексы и т.д. Титан и его сплавы широко применяются для изготовления конструкций в авиационной, ракетной, химической отраслях, а также в строительстве. Это связано с большим набором ценных свойств, которыми являются: высокая коррозионная стойкость, малый удельный вес, довольно большая прочность и жаропрочность, достаточная пластичность при криогенных температурах, значительная распространённость титана в природе [1]. Титановые сплавы,

изначально обладая нечувствительностью к виду напряженного состояния, в процессе насыщения водородом (наводороживания) приобретают свойства разносопротивляемости, которые меняются в течение времени, что приводит к охрупчиванию и раннему разрушению.

Выбранный подход к решению задачи влияния наводороживания на НДС пологой сферической оболочки представляет собой численный метод, основанный на замене производных разностными схемами. Для решения задачи, обладающей тройной нелинейностью принят двухшаговый метод последовательных возмущений параметров [9], который способен линеаризовать исходные уравнения и обладает высокой точностью.

Для решения поставленной задачи методом конечных разностей на расчётной области строится сетка, затем выбирается разностная схема и для каждого узла сетки записывается разностное уравнение, затем производится учёт краевых условий (для краевых условий второго и третьего рода так же строится разностная схема). Получается система линеаризованных алгебраических уравнений, решая которую приходим к приближенным результатам расчета в дискретных узлах.

Модели и методы

Рассматриваются тонкие пологие оболочки, у которых отношение стрелы подъема в центре f к меньшему размеру a (*радиусу*) в плане составляет:

$$\frac{f}{a} \leq \frac{1}{5},$$

а отношение толщины оболочки h к наименьшему радиусу кривизны

$$\frac{h}{R_{min}} \leq \frac{1}{20} \quad (1)$$

Ввиду пологости оболочки геометрия ее поверхности отождествляется с геометрией на проектной плоскости, и криволинейная система координат заменяется полярной системой.

Рассмотрим упругое равновесие пологой сферической оболочки толщиной h под действием поперечной осесимметричной равномерно-распределенной нагрузки q и водорододержащей среды с концентрацией λ . Срединная поверхность оболочки является частью сферы, характеризуемой радиусом R (м). Оболочка имеет жесткую заделку по контуру.

Примем кинетический потенциал деформаций в виде [11]:

$$W_1 = (A_e(\lambda) + B_e(\lambda)\xi)\sigma^2 + (C_e(\lambda) + D_e(\lambda)\xi + E_e(\lambda)\eta\cos 3\varphi)\tau^2 + \\ + [(A_p(\lambda) + B_p(\lambda)\xi)\sigma^2 + (C_p(\lambda) + D_p(\lambda)\xi + E_p(\lambda)\eta\cos 3\varphi)\tau^2]^\eta, \quad (2)$$

где $A_e(\lambda)$, $B_e(\lambda)$, $C_e(\lambda)$, $D_e(\lambda)$, $E_e(\lambda)$, $A_p(\lambda)$, $B_p(\lambda)$, $C_p(\lambda)$, $D_p(\lambda)$, $E_p(\lambda)$ – физические функции потенциала соответственно квазилинейной и нелинейной частей, зависящие от степени водородонасыщения. Функциональные зависимости механических характеристик материала определены в результате полиномиальной интерполяции значений конкретных констант при фиксированном уровне концентрации среды λ (0; 0,01; 0,03 и 0,05%) для сплава BT1-0 принимают вид:

$$V_{ek}(\lambda) = e_{0k} + e_{1k} \cdot \lambda + e_{2k} \cdot \lambda^2; V_{pk}(\lambda) = p_{0k} + p_{1k} \cdot (p_{2k})^\lambda; \\ A_e(\lambda) = V_{e1}(\lambda); B_e(\lambda) = V_{e3}(\lambda); C_e(\lambda) = V_{e2}(\lambda); D_e(\lambda) = V_{e4}(\lambda); E_e(\lambda) = V_{e5}(\lambda); \\ A_p(\lambda) = V_{p1}(\lambda); B_p(\lambda) = V_{p3}(\lambda); C_p(\lambda) = V_{p2}(\lambda); D_p(\lambda) = V_{p4}(\lambda); E_p(\lambda) = V_{p5}(\lambda); \quad (3)$$

где e_{ik} , p_{ik} – коэффициенты полиномов $i = 0..3$; $k = 1..3$.

Оболочку принимаем достаточно тонкой, такой, чтобы можно было считать справедливыми гипотезы Кирхгофа-Лява (1).

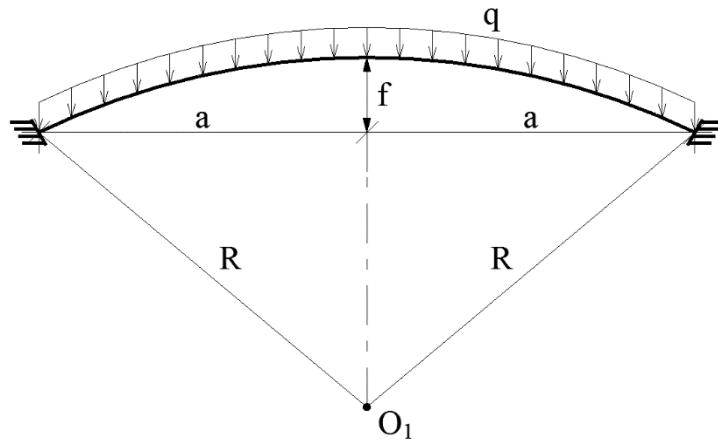


Рисунок 1 – Схема задачи

Для сферической оболочки справедливо постоянство главных радиусов кривизны её срединной поверхности в пределах плана: $R_1 = R_2 = R$

Тогда главные кривизны оболочки принимают значение $k_1 = k_2 = k = 1/R$. Далее рассматриваются пологие оболочки, в которых можно пренебречь разницей между длиной дуги срединной поверхности и ее проекцией на плоскость [1].

При этом используются следующие зависимости:

а) компоненты деформации в срединной поверхности:

$$\varepsilon_r = u_{,r} - kw + 0,5(w_{,r})^2; \quad \varepsilon_\phi = \frac{u}{r} - kw, \quad (4)$$

где $\varepsilon_r, \varepsilon_\phi$ – радиальные и окружные относительные деформации в серединных поверхностях; u, w – радиальные перемещения и прогибы; k – главная кривизна; r – радиальная координата;

б) компоненты изгибной деформации (кривизны):

$$\chi_r = -w_{rr}; \quad \chi_\phi = -\frac{w_{,r}}{r} \quad (5)$$

в) выражения компонентов тензора деформаций через параметры деформации $\varepsilon_r, \varepsilon_\phi$ и кривизны χ_r, χ_ϕ срединной поверхности:

$$e_r = \varepsilon_r + z\chi_r; \quad e_\phi = \varepsilon_\phi + z\chi_\phi \quad (6)$$

где z – вертикальная координата, отсчитываемая от срединной поверхности оболочки, направленная к центру кривизны.

Подставляя зависимости (4)-(5) в (6), получим выражения для компонентов тензора деформаций через перемещения и прогибы:

$$e_r = u_{,r} - kw + 0,5(w_{,r})^2 - zw_{,rr}; \quad e_\phi = \frac{u}{r} - kw - z\frac{w_{,r}}{r}. \quad (7)$$

Зависимости между деформациями и напряжениями получены путем применения формул Кастильяно к потенциальному W_1 , которые принимают вид:

$$e_k = \frac{\partial W_1}{\partial \sigma_k}; \quad \gamma_{ij} = \frac{\partial W_1}{\partial \tau_{ij}}; \quad (i, j, k = 1, 2, 3), \quad (8)$$

$$e_{ij} = 2C_e(\lambda)\sigma_{ij}/3 + 2(A_e(\lambda) - C_e(\lambda))\sigma\delta_{ij}/3 + T_{ij}(\lambda); \quad (9)$$

где $T_{ij}(\lambda)$ - нелинейная составляющая уравнений состояния.

При этом $T_{ij}(\lambda)$ рассматривается как сумма двух слагаемых:

$$T_{ij}(\lambda) = T_{ij}^e(\lambda) + T_{ij}^p(\lambda); \quad (10)$$

где $T_{ij}^e(\lambda)$ - параметры, учитывающие чувствительность механических свойств материала к виду напряженного состояния на квазилинейном этапе деформирования, а $T_{ij}^p(\lambda)$ позволяет учесть явление разносопротивляемости конструкционного материала и нелинейность экспериментальных диаграмм деформирования.

Сами слагаемые $T_{ij}^e(\lambda)$ и $T_{ij}^p(\lambda)$ определяются соответственно следующим образом:

$$\begin{aligned} T_{ij}^e(\lambda) &= 2\tau_{ij}(D_e(\lambda)\xi + E_e(\lambda)\eta \cos 3\varphi)/3 + \{(B_e(\lambda)\sigma^2 + \\ &+ D_e(\lambda)\tau^2)\xi_{,\tau_{ij}} + E_e(\lambda)\tau^2[\eta(\cos 3\varphi)_{,\sigma_{kk}} + \eta_{,\sigma_{kk}} \cos 3\varphi]\}/2, \quad \text{при } i \neq j; \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} T_{ij}^p(\lambda) &= n[(A_p(\lambda) + B_p(\lambda)\xi)\sigma^2 + (C_p(\lambda) + D_p(\lambda)\xi + E_p(\lambda)\eta \cos 3\varphi)\tau^2]^{n-1} \times \\ &\times \{2\tau_{ij}(\lambda)(C_p(\lambda) + D_p(\lambda)\xi + E_p(\lambda)\eta \cos 3\varphi)/3 + \{(B_p(\lambda)\sigma^2 + D_p(\lambda)\tau^2)\xi_{,\tau_{ij}} + \\ &+ E_p(\lambda)\tau^2(\eta(\cos 3\varphi)_{,\tau_{ij}} + \eta_{,\tau_{ij}} \cos 3\varphi)\}/2\}, \quad \text{при } i \neq j; \end{aligned}$$

где $\xi_{,\tau_{ij}} = -2\xi\eta^2 S_{ij}/3\tau^2$; при $i \neq j$; $\eta_{,\sigma_{ij}} = 2\xi^3 S_{ij}/3\sigma\tau$; при $i \neq j$;

$$\sigma = \delta_{ij}\sigma_{ij}/3; \quad \tau = \sqrt{S_{ij}S_{jj}/3}; \quad S_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma; \quad \delta_{ij} - \text{символы Кронекера.}$$

$$\begin{aligned} (\cos 3\varphi)_{,\sigma_{ii}} &= \sqrt{2}[(\sigma_{kk} - \sigma)(\sigma_{jj} - \sigma_{ii}) + (\sigma_{jj} - \sigma)(\sigma_{kk} - \sigma_{ii}) + \tau_{ij}^2 + \\ &+ \tau_{ik}^2 - 2\tau_{jk}^2]/(3\tau^3) - \cos 3\varphi(\sigma_{ii} - \sigma)/\tau^2; \\ (\cos 3\varphi)_{,\tau_{ij}} &= 2\sqrt{2}[\tau_{ik}\tau_{jk} - \tau_{ij}(\sigma_{kk} - \sigma)/\tau^3 - 2\cos 3\varphi\tau_{ij}/\tau^2]; \end{aligned} \quad (12)$$

Связь между деформациями и напряжениями представим в виде:

$$\begin{Bmatrix} e_r \\ e_\theta \end{Bmatrix} = [A] \begin{Bmatrix} \sigma_r \\ \sigma_\theta \end{Bmatrix}. \quad (13)$$

Обращая соотношения (13), получаем зависимость напряжений от деформаций:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_r \\ \sigma_\theta \end{Bmatrix} = [B] \begin{Bmatrix} e_r \\ e_\theta \end{Bmatrix}, \quad (14)$$

где $[B] = [A]^{-1}$.

Здесь $A_{11}, A_{12}..A_{44}$ – компоненты симметричной матрицы [A] – функции, включающие константы потенциала W_1 .

Усилия и моменты найдём через напряжения традиционным способом:

$$\begin{aligned} N_r &= \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_r dz; \quad N_\varphi = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_\varphi dz; \\ M_r &= \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_r z dz; \quad M_\varphi = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_\varphi z dz; \end{aligned} \quad (15)$$

Связь моментов и усилий с компонентами деформаций оболочки приведём к виду:

$$\begin{aligned} M_r &= K_{11}(\lambda) \varepsilon_r + K_{12}(\lambda) \varepsilon_\varphi + D_{11}(\lambda) \chi_r + D_{12}(\lambda) \chi_\varphi; \\ M_\theta &= K_{21}(\lambda) \varepsilon_r + K_{22}(\lambda) \varepsilon_\varphi + D_{21}(\lambda) \chi_r + D_{22}(\lambda) \chi_\varphi; \\ N_r &= C_{11}(\lambda) \varepsilon_r + C_{12}(\lambda) \varepsilon_\varphi + K_{11}(\lambda) \chi_r + K_{12}(\lambda) \chi_\varphi; \\ N_\theta &= C_{21}(\lambda) \varepsilon_r + C_{22}(\lambda) \varepsilon_\varphi + K_{21}(\lambda) \chi_r + K_{22}(\lambda) \chi_\varphi, \end{aligned} \quad (16)$$

С учётом влияния степени наводороживания материалов при концентрации λ материальные функции имеют вид:

$$C_{ij}(\lambda) = \int_{-h/2}^{h/2} B_{ij}(\lambda) dz; \quad K_{ij}(\lambda) = \int_{-h/2}^{h/2} B_{ij}(\lambda) z dz; \quad D_{ij}(\lambda) = \int_{-h/2}^{h/2} B_{ij}(\lambda) z^2 dz;$$

где B_{ij} – функции, подлежащие определению из экспериментов по деформированию образцов материала при разных уровнях концентрации водорода λ .

Использование тех или иных определяющих соотношений не приводит к изменению уравнений статико-геометрической природы [2], поэтому, внутренние усилия и моменты оболочки при условии $zk \ll 1$ подчиняются уравнениям равновесия:

$$\begin{aligned} M_{r,r} - M_{\varphi,r}/r + 2M_{r,r}/r + k(N_r + N_\varphi) + N_r w_{,rr} &= -q; \\ N_{r,r} + (N_r - N_\varphi)/r - k[M_{r,r} + (M_r - M_\varphi)/r] &= 0. \end{aligned} \quad (17)$$

Используя условия равновесия (17), а также выражения для усилий и моментов (16), получим систему двух нелинейных дифференциальных уравнений относительно функций u и W , связанных с уровнем наводороживания λ . Для линеаризации этих уравнений используем двухшаговый метод последовательных возмущений параметров [9, 10], согласно которому запишем выражения для приращений деформаций и кривизн срединной поверхности:

$$\delta e_r = \frac{\partial e_r}{\partial \sigma_r} \delta \sigma_r + \frac{\partial e_r}{\partial \sigma_\varphi} \delta \sigma_\varphi + \frac{\partial e_r}{\partial \lambda} \delta \lambda; \quad \delta e_\varphi = \frac{\partial e_\varphi}{\partial \sigma_\varphi} \delta \sigma_\varphi + \frac{\partial e_\varphi}{\partial \sigma_r} \delta \sigma_r + \frac{\partial e_\varphi}{\partial \lambda} \delta \lambda; \quad (18)$$

$$\delta \varepsilon_r = \delta u_{,r} - k \delta w + w_{,r} \delta w_{,r}; \quad \delta \varepsilon_\varphi = \frac{\delta u}{r} - k \delta w, \quad (19)$$

$$\delta \chi_r = -\delta w_{,rr}; \quad \delta \chi_\varphi = -\frac{\delta w_{,r}}{r}; \quad (20)$$

Зависимости приращений деформаций в точке через приращения деформаций срединной поверхности $\delta \varepsilon_r$ и $\delta \varepsilon_\varphi$ и кривизн срединной поверхности $\delta \chi_r$ и $\delta \chi_\varphi$ представляются следующим образом:

$$\delta e_r = \delta \varepsilon_r + z \delta \chi_r; \quad \delta e_\varphi = \delta \varepsilon_\varphi + z \delta \chi_\varphi, \quad (21)$$

Используя уравнения (18) – (20), получим выражения, связывающие приращения деформаций и перемещений:

$$\delta e_r = \delta u_{,r} - k \delta w + w_{,r} \delta w_{,r} - z \delta w_{,rr}; \quad \delta e_\varphi = \frac{\delta u}{r} - k \delta w - z \frac{\delta w_{,r}}{r}. \quad (22)$$

Далее рассматривается вариант задачи, когда процесс воздействия водородосодержащей среды на оболочку завершен и она наводорожена. Поэтому в выражениях приращений деформаций (18) дифференцировать по параметру λ не требуется. Это необходимо, когда процесс наводороживания сопровождается ростом нагрузки, а следовательно – увеличением напряжений. Зависимости приращений усилий и моментов от напряжений имеют вид:

$$\begin{aligned} \delta N_r &= \int_{-h/2}^{h/2} \delta \sigma_r dz; \quad \delta N_\varphi = \int_{-h/2}^{h/2} \delta \sigma_\varphi dz; \\ \delta M_r &= \int_{-h/2}^{h/2} \delta \sigma_r z dz; \quad \delta M_\varphi = \int_{-h/2}^{h/2} \delta \sigma_\varphi z dz; \end{aligned} \quad (23)$$

где δN_r , δN_φ – приращения усилий в срединной поверхности оболочки, δM_r , δM_φ – приращения моментов.

Используя уравнения (16) и зависимости (23), получим зависимости приращений усилий и моментов от приращений перемещений:

$$\begin{aligned} \delta N_r &= C_{11}(\lambda)(u_{,r} - k \delta w + w_{,r} \delta w_{,r} - z \delta w_{,rr}) - \\ &\quad - K_{11}(\lambda) \delta w_{,rr} + C_{12}(\lambda) \left(\frac{\delta u}{r} - k \delta w - z \frac{\delta w_{,r}}{r} \right) - K_{12}(\lambda) \frac{\delta w_{,r}}{r}, \\ \delta N_\varphi &= C_{12}(\lambda)(u_{,r} - k \delta w + w_{,r} \delta w_{,r} - z \delta w_{,rr}) - \\ &\quad - K_{12}(\lambda) \delta w_{,rr} + C_{22}(\lambda) \left(\frac{\delta u}{r} - k \delta w - z \frac{\delta w_{,r}}{r} \right) - K_{22}(\lambda) \frac{\delta w_{,r}}{r}, \\ \delta M_r &= K_{11}(\lambda)(u_{,r} - k \delta w + w_{,r} \delta w_{,r} - z \delta w_{,rr}) - \\ &\quad - D_{11}(\lambda) \frac{\delta w_{,r}}{r} + K_{11}(\lambda) \left(\frac{\delta u}{r} - k \delta w \right) - D_{12}(\lambda) \frac{\delta w_{,r}}{r}, \\ \delta M_\varphi &= K_{12}(\lambda)(u_{,r} - k \delta w + w_{,r} \delta w_{,r} - z \delta w_{,rr}) - \\ &\quad - D_{12}(\lambda) \delta w_{,rr} + K_{22}(\lambda) \left(\frac{\delta u}{r} - k \delta w \right) - D_{22}(\lambda) \frac{\delta w_{,r}}{r}. \end{aligned} \quad (24)$$

Представим в приращениях уравнения равновесия пологой сферической оболочки, пренебрегая членами второго порядка малости и выше:

$$\begin{aligned} \delta M_{r,rr} - \delta M_{\varphi,r}/r + 2\delta M_{r,r}/r + k(\delta N_r + \delta N_\varphi) + \delta N_r w_{,rr} + N_r \delta w_{,rr} &= -\delta q, \\ \delta N_{r,r} + (\delta N_r - \delta N_\varphi)/r - k[\delta M_{r,r} + (\delta M_r - \delta M_\varphi)/r] &= 0. \end{aligned} \quad (25)$$

Полученную систему разрешающих дифференциальных уравнений в приращениях (25) необходимо дополнить граничными условиями. Так как задача является осесимметричной, в центре оболочки поворот нормали к срединной поверхности, радиальные перемещения и их приращения будут равны нулю ($w_{,r} = 0$, $u = 0$, $\delta w_{,r} = 0$, $\delta u = 0$). Что касается граничных условий по внешнему контуру оболочки, то они зависят от выбора закрепления. В случае жесткого защемления оболочки по периметру, принимаем

радиальные перемещения, их приращения, прогибы и поворот нормали к срединной поверхности равными нулю ($u = 0, w_r = 0, w_{rr} = 0, \delta w_r = 0, \delta u = 0$,).

Подставляя в уравнения равновесия (25) соотношения для приращений усилий и моментов (24), получим систему линеаризованных разрешающих дифференциальных уравнений относительно приращений прогибов и радиальных перемещений:

$$\begin{aligned}
 & \frac{\delta u}{r} [K_{11}(\lambda)(u_r - k\delta w + w_r \delta w_r - z\delta w_{rr}) - D_{11}(\lambda) \frac{\delta w_r}{r} + K_{11}(\lambda) \left(\frac{\delta u}{r} - k\delta w \right) - \\
 & - D_{12}(\lambda) \frac{\delta w_r}{r}] - \delta w_r [K_{12}(\lambda)(u_r - k\delta w + w_r \delta w_r - z\delta w_{rr}) - D_{12}(\lambda) \delta w_{rr} + \\
 & + K_{22}(\lambda) \left(\frac{\delta u}{r} - k\delta w \right) - D_{22}(\lambda) \frac{\delta w_r}{r}] + 2 \frac{\delta u}{r} [K_{11}(\lambda)(u_r - k\delta w + w_r \delta w_r - z\delta w_{rr}) - \\
 & - D_{11}(\lambda) \frac{\delta w_r}{r} + K_{11}(\lambda) \left(\frac{\delta u}{r} - k\delta w \right) - D_{12}(\lambda) \frac{\delta w_r}{r}] + \\
 & k(C_{11}(\lambda)(u_r - k\delta w + w_r \delta w_r - z\delta w_{rr}) - K_{11}(\lambda) \delta w_{rr} + C_{12}(\lambda) \left(\frac{\delta u}{r} - k\delta w - z \frac{\delta w_r}{r} \right) - \\
 & - K_{12}(\lambda) \frac{\delta w_r}{r} + C_{12}(\lambda)(u_r - k\delta w + w_r \delta w_r - z\delta w_{rr}) - \\
 & - K_{12}(\lambda) \delta w_{rr} + C_{22}(\lambda) \left(\frac{\delta u}{r} - k\delta w - z \frac{\delta w_r}{r} \right) - K_{22}(\lambda) \frac{\delta w_r}{r}) + \\
 & w_{rr} [C_{11}(\lambda)(u_r - k\delta w + w_r \delta w_r - z\delta w_{rr}) - K_{11}(\lambda) \delta w_{rr} + \\
 & + C_{12}(\lambda) \left(\frac{\delta u}{r} - k\delta w - z \frac{\delta w_r}{r} \right) - K_{12}(\lambda) \frac{\delta w_r}{r}] + \delta w_{rr} [C_{11}(\lambda)(u_r - k\delta w + w_r \delta w_r - z\delta w_{rr}) - \\
 & - K_{11}(\lambda) \delta w_{rr} + C_{12}(\lambda) \left(\frac{\delta u}{r} - k\delta w - z \frac{\delta w_r}{r} \right) - K_{12}(\lambda) \frac{\delta w_r}{r}] = -\delta q, \tag{26}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{\delta u}{r} [C_{11}(\lambda)(u_r - k\delta w + w_r \delta w_r - z\delta w_{rr}) - K_{11}(\lambda) \delta w_{rr} + C_{12}(\lambda) \left(\frac{\delta u}{r} - k\delta w - z \frac{\delta w_r}{r} \right) - \\
 & - K_{12}(\lambda) \frac{\delta w_r}{r}] + (C_{11}(\lambda)(u_r - k\delta w + w_r \delta w_r - z\delta w_{rr}) - \\
 & - K_{11}(\lambda) \delta w_{rr} + C_{12}(\lambda) \left(\frac{\delta u}{r} - k\delta w - z \frac{\delta w_r}{r} \right) - K_{12}(\lambda) \frac{\delta w_r}{r}) - \\
 & - C_{12}(\lambda)(u_r - k\delta w + w_r \delta w_r - z\delta w_{rr}) - K_{12}(\lambda) \delta w_{rr} + C_{22}(\lambda) \left(\frac{\delta u}{r} - k\delta w - z \frac{\delta w_r}{r} \right) - \\
 & K_{22}(\lambda) \frac{\delta w_r}{r}) - k [\frac{\delta u}{r} [K_{11}(\lambda)(u_r - k\delta w + w_r \delta w_r - z\delta w_{rr}) - D_{11}(\lambda) \frac{\delta w_r}{r} + \\
 & K_{11}(\lambda) \left(\frac{\delta u}{r} - k\delta w \right) - D_{12}(\lambda) \frac{\delta w_r}{r}] + (K_{11}(\lambda)(u_r - k\delta w + w_r \delta w_r - z\delta w_{rr}) - \\
 & - D_{11}(\lambda) \frac{\delta w_r}{r} + K_{11}(\lambda) \left(\frac{\delta u}{r} - k\delta w \right) - D_{12}(\lambda) \frac{\delta w_r}{r} - K_{12}(\lambda)(u_r - k\delta w + w_r \delta w_r - z\delta w_{rr}) - \\
 & - D_{12}(\lambda) \delta w_{rr} + K_{22}(\lambda) \left(\frac{\delta u}{r} - k\delta w \right) - D_{22}(\lambda) \frac{\delta w_r}{r})] = 0. \tag{27}
 \end{aligned}$$

При химической адсорбции молекулы водорода в конечном итоге распадаются на атомы, которые затем диффундируют вглубь материала [5, 6]. Плотность потока J , т.е.

количество вещества, диффундирующего в единицу времени через единицу поверхности, перпендикулярную потоку вещества, пропорциональна пространственному градиенту концентрации λ . Как показал опыт [5], для не слишком больших перепадов концентрации применим так называемый первый закон Фика, согласно которому количество вещества, проходящее через воображаемое сечение, перпендикулярное направлению диффузии, пропорционально величине градиента концентрации в этом сечении, площади сечения и времени диффузии:

$$J = -D \text{grad} \lambda = -D \frac{\delta \lambda}{\delta z} \quad (28)$$

где D - коэффициент диффузии, z - координата в направлении диффузии.

В рассматриваемой задаче физически активная среда контактирует с оболочкой только по верхней или нижней поверхности, что приводит к одномерности процесса диффузии.

Для одномерной задачи уравнение (28) переходит в первый закон Фика, имеющий вид:

$$J = -D \delta \lambda_z,$$

Для титановых сплавов коэффициент диффузии не зависит от концентрации, поэтому из первого закона Фика вытекает второй закон в виде:

$$\frac{\partial \lambda(z,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \lambda(z,t)}{\partial z^2} \quad (29)$$

где t – текущее время.

Из уравнения (29) видно, что скорость изменения диффундирования во времени зависит только от одного физического параметра – коэффициента диффузии D . Величина, обратная коэффициенту диффузии, характеризует инерционные свойства тела в отношении распространения поля агрессивной среды [7].

Процесс диффузии водорода в тело подобен явлению теплопроводности. Принятое уравнение идентично дифференциальному уравнению теплопроводности для одномерного потока тепла с той лишь разницей, что в уравнении передачи тепла вместо коэффициента диффузии принимается коэффициент теплопроводности [8].

Для решения уравнения диффузии используем те же методы, что и для температурных задач. Воспользуемся методом разделения переменных, в основе которого лежит процесс нахождения совокупности частных решений, удовлетворяющих уравнению (29) начальными и граничными условиями. Далее рассматривается ряд решений по принципу наложения. Частное решение ищется в виде произведения двух функций, одна из которых зависит только от времени, а другая только от координаты. Для решения задач наводороживания целесообразно применять метод интегрального преобразования Фурье. Кроме этого, можно применять численные методы решения, используя, например, метод конечных разностей [6, 8].

В качестве решения уравнения (29) для процесса односторонней и двухсторонней диффузии примем известные аналитические решения, представленные в работе [9].

Для процесса односторонней диффузии решение имеет вид:

$$\begin{aligned} \lambda(z,t) = & \lambda_1 + (\lambda_2 - \lambda_1) z/h + (2/\pi) \sum_{i=1}^{\infty} \sin(i \cdot \pi \cdot z/h) \exp(-F_o \pi^2 i^2 t) \times \\ & \times [\lambda_2 \cos(i \cdot \pi) - \lambda_1] / i, \end{aligned} \quad (30)$$

где $F_O = Dt/h^2$ – число Фурье; i – число членов ряда; λ_1 и λ_2 – краевые условия для концентрации среды сверху и снизу оболочки; h – толщина оболочки; z – координата точки по толщине оболочки.

Краевые условия представлены следующим образом:

а) при воздействии среды со стороны приложения поперечной силовой нагрузки:

$$\lambda(-h/2, t) = \lambda_\infty = \lambda_1; \lambda(+h/2, t) = 0 = \lambda_2; \quad (31)$$

б) при воздействии среды со стороны свободной от силового нагружения:

$$\lambda(-h/2, t) = 0 = \lambda_1; \lambda(+h/2, t) = \lambda_\infty = \lambda_2,$$

в) для процесса двухсторонней диффузии:

$$\lambda(-h/2, t) = \lambda_\infty = \lambda_1; \lambda(+h/2, t) = \lambda_\infty = \lambda_2.$$

здесь λ_∞ – равновесная концентрация водородосодержащей среды.

Начальные условия имеют вид

$$\lambda(z, 0) = 0. \quad (32)$$

Добавив к уравнению (30) начальные (32) и граничные условия (31), получим модель воздействия активной водородосодержащей среды [10, 11].

Результаты исследования и их анализ

Заменив производные конечными разностями в программном комплексе MATLAB полученные разрешающие уравнения, и обработав вычислительный алгоритм, приходим к следующим результатам решения поставленной задачи при процессе односторонней диффузии со стороны приложения поперечной силовой нагрузки, которые приведены на рисунках 2-3.

На рисунке 2 показаны графики зависимости напряжений σ_r и σ_ϕ по толщине оболочки от степени концентрации агрессивной водородосодержащей среды. Рисунок 3 отражают графики прогибов и горизонтальных перемещений оболочки.

Сравним полученные результаты с результатами И.Г. Овчинникова и Л.А. Кирилловой [7], при получении которых использовались простейшие физические соотношения, в зависимости от степени концентрации λ [7]:

$$\sigma_r = k \frac{\psi}{1 - \nu^2} (\varepsilon_r + \nu \varepsilon_\phi)$$

$$\sigma_\phi = k \frac{\psi}{1 - \nu^2} (\varepsilon_\phi + \nu \varepsilon_r)$$

$$\psi = \sigma_i / \varepsilon_i$$

где ψ – функция, учитывающая влияние вида и уровня напряжённого состояния, а также водородного воздействия на характер физических соотношений, k – главная кривизна оболочки, σ_i – интенсивность напряжений, ε_i – интенсивность деформаций, ν – к-т поперечной деформации.

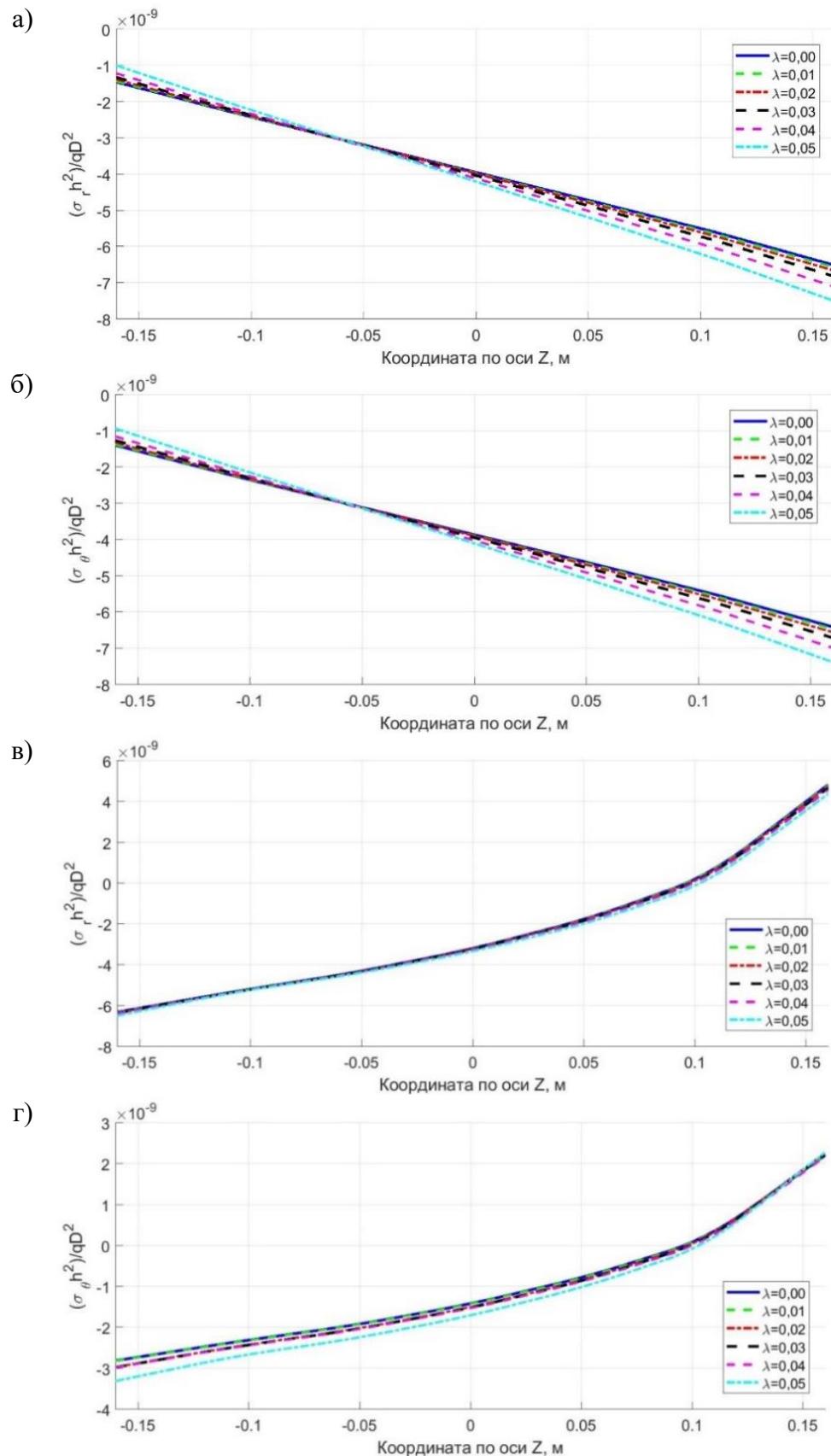
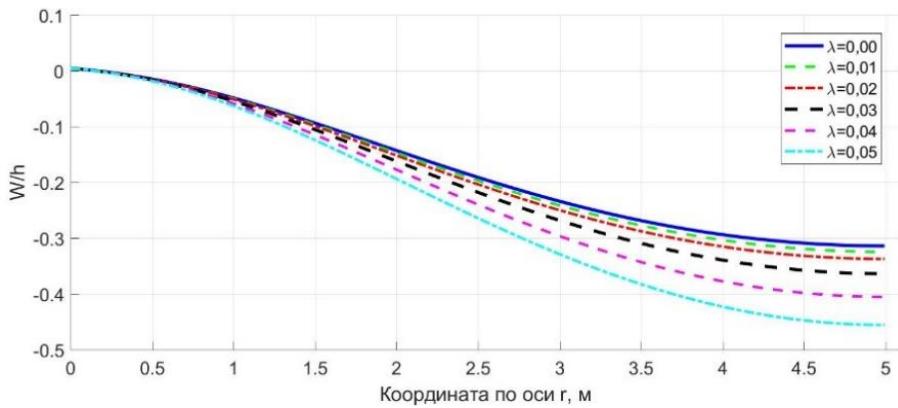


Рисунок 2 – Напряжения (по толщине): а) σ_r в точке 1/2 диаметра оболочки, б) σ_θ в точке 1/2 диаметра оболочки, в) σ_r в точке края оболочки, г) σ_θ в точке края оболочки

a)



б)

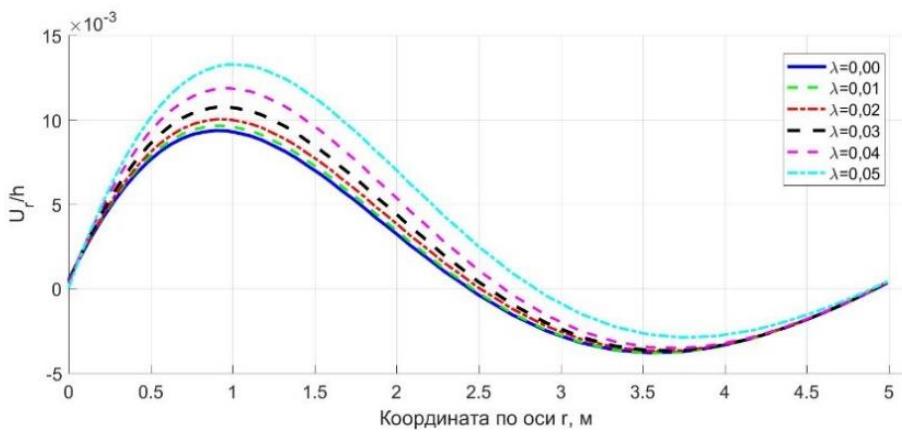


Рисунок 3 – Перемещения: а) прогибы W/h , б) горизонтальные вдоль радиуса U/h

Считая, что влияние среды не приводит к изменению вида уравнений состояния, а меняются лишь коэффициенты, которые становятся функциями параметров λ, ε , авторы [6-8] представляют диаграмму деформирования $\sigma - \varepsilon$ в виде:

$$\sigma_i = A\varepsilon_i - B(\lambda, \varepsilon_i)E^{m(\lambda, \varepsilon)};$$

$$\text{где } \sigma_i = (\sigma_r^2 - \sigma_r\sigma_\varphi + \sigma_\varphi^2)^{1/2}; \quad \varepsilon_i = \mu_1(\varepsilon_r^2 - \mu_2\varepsilon_r\varepsilon_\varphi + \varepsilon_\varphi^2)^{1/2};$$

$$\psi = (\lambda, \varepsilon) = \begin{cases} \psi^+ = A_0 - B(\lambda)\varepsilon_i^{m(\lambda)-1}, & \varepsilon \geq \varepsilon_0 \\ \psi^- = A_0 - B_0\varepsilon_i^{m_0-1}, & \varepsilon < \varepsilon_0 \end{cases}$$

ε_0 –критическое значение деформации при насыщении водородом; A, B, A_0, B_0, m, m_0 – константы, определяемые по экспериментальным диаграммам деформирования, которые аппроксимируется функцией

$$\sigma_i = A\varepsilon_i^m - B\varepsilon_i^n,$$

$$\text{где } \mu_1 = (1 - \nu + \nu^2)^{1/2} / (1 - \nu^2); \quad \mu_2 = 3\nu / (1 - \nu + \nu^2) - 1.$$

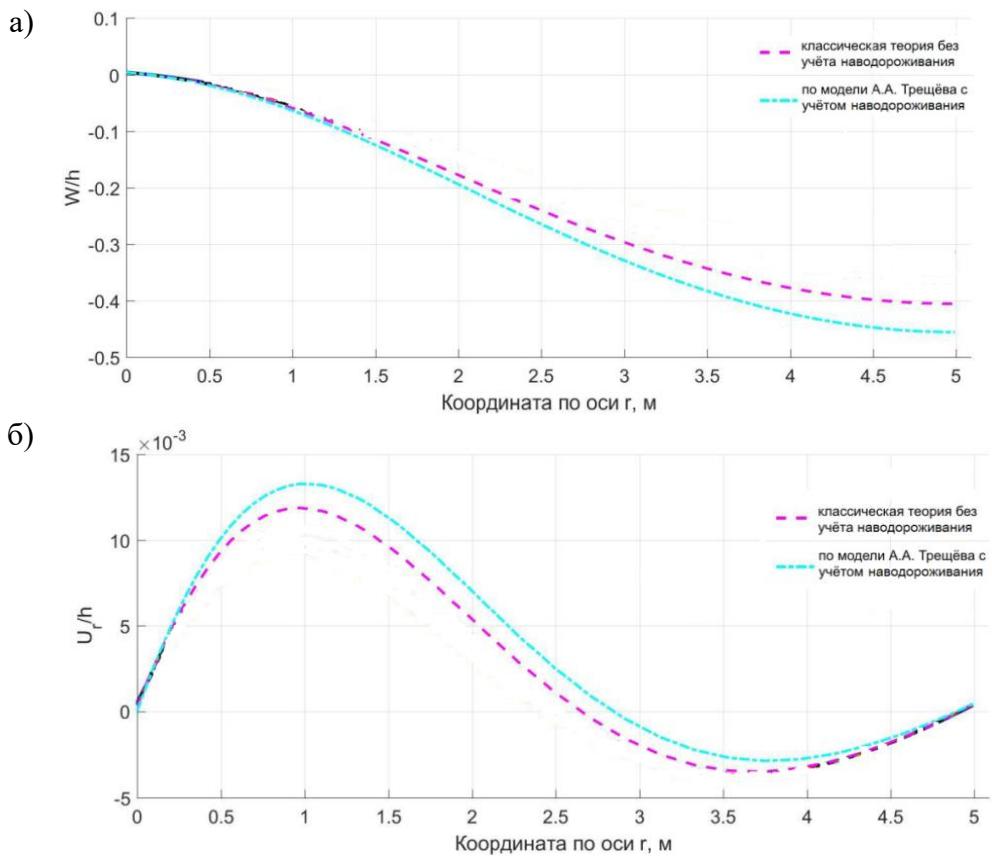


Рисунок 4 – Перемещения: а) прогибы W/h , б) горизонтальные вдоль радиуса U_r/h

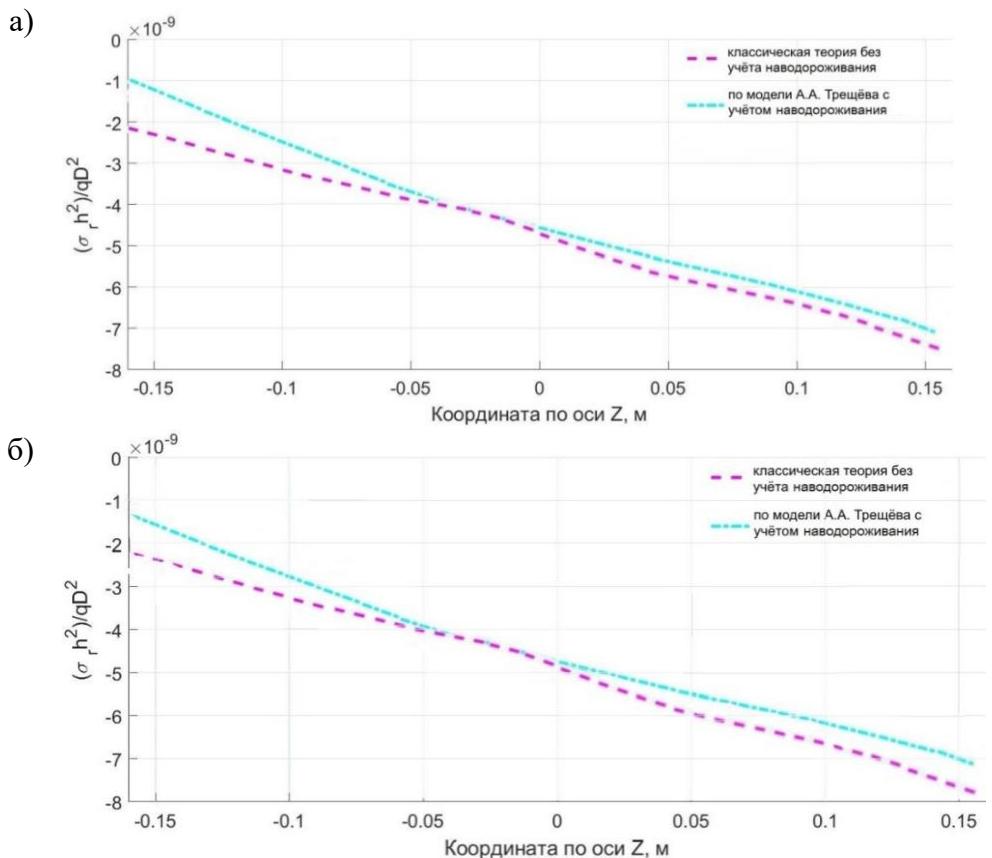


Рисунок 5 – Напряжения в точке $1/2$ диаметра оболочки (по толщине): а) σ_r , б) σ_0

Сравнивая в программном комплексе MATLAB полученные решения по разработанной модели [10-12] с результатами по теории И.Г. Овчинникова [6-8], можно произвести следующий анализ: результаты отличаются из-за того, что в теории И.Г. Овчинникова не учитывается влияние наводороживания при разных сложных видах напряжённого состояния.

На рисунках 4 показано, что расхождение в значениях максимальных прогибов и перемещений с учетом и без учета наводороживания значительное и составляет 16,5 %, напряжений – до 50%, что не допустимо, так как превышает предельное значение погрешности для строительных конструкций, равное 5% (см. рис. 4, 5).

Учет зависимости деформационных и прочностных характеристик от степени насыщения водородом вносит значительные поправки в результаты определения напряженно-деформированного состояния сферических оболочек из титановых сплавов, а поэтому необходим для получения достоверных результатов расчета.

Выводы

Многочисленные экспериментальные исследования свидетельствуют о том, что воздействие водорода на ряд конструкционных материалов приводит к появлению в них наведенной неоднородности и разноопротивляемости, меняющейся с течением времени. Это обуславливает необходимость разработки новых моделей, описывающих напряженно-деформированное состояние тел, с учетом наведенной чувствительности свойств материалов к наводороживанию в широком диапазоне изменения видов напряжённого состояния.

Учет воздействия водородосодержащей среды в данной работе был построен на основе нелинейных определяющих соотношений, учитывающих наведенную чувствительность к наводороживанию в широком диапазоне изменения видов напряжённого состояния [10-12].

В данной работе произведено построение математической модели влияния наводороживания на НДС пологой сферической оболочки и приведено численное решение задачи с иллюстрацией прогибов, перемещений и напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Астафьев В.И., Ширяева Л.К. Накопление повреждённости и коррозионное растрескивание металлов под напряжением. Самара: Изд-во Самарский университет, 1998. 123 с.
2. Баландин П.П. К вопросу о гипотезах прочности // Вестник инженеров и техников. 1937. №1. С. 37-41.
3. Гервиц Г.Я. Влияние газонасыщения на статическую прочность титановых сплавов // ФХММ. 1981. №2. С. 45-48.
4. Кириллова Л.А. Напряженно-деформированное состояние гибкой круглой пластины в водородосодержащей среде с учетом наведенной неоднородности. Дисс. к.т.н. Саратов, 1990. 163 с.
5. Колачев Б.А., Ливанов В.А., Буханова Л.А. Механические свойства титана и его сплавов. М.: Металлургия, 1974. 544 с.
6. Маркин А.А. К обоснованию теории оболочек // Работы по механике деформируемых сред. Тула: ТПИ. 1974. С. 121-129.
7. Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Чэн Тао, Успанов А.М. Анализ экспериментальных данных по кинетике проникания сульфатосодержащих сред в железобетонные конструкции и влиянию их на механические характеристики компонентов железобетона. Часть 1. Эксперименты по изучению кинетики проникания // Интернет-журнал «Науковедение». Том 8, № 1 (2016). 14 с.
8. Овчинников И.Г., Кириллова Л.А. О деформировании гибкой круглой пластины из материала, чувствительного к водородному воздействию. Саратов, 1989. 15 с. Рукопись деп. в ВИНИТИ 7 февраля 1990, № 698 – В90.
9. Овчинников И.Г. Модифицированная модель деформирования и разрушения материала, подвергающегося облучению // Строительная механика и расчёт сооружений. 2014. №1. С. 29-35.
10. Овчинников И.Г., Рассада А.Б. Анализ экспериментальных данных по влиянию водорода при нормальных температурах на механические свойства металлов и сплавов и построению модели взаимодействия

- конструктивных элементов с водородом. Ч.1. Проблема воздействия водорода на металлы и пути ее решения. Закономерности проникания водорода в конструктивные элементы. Саратов: Сарат. политехн. ин-т., 1989. 28 с.
11. Петров В.В., Иноzemцев В.К., Синева Н.Ф. Теория наведенной неоднородности и ее приложения к проблеме устойчивости пластин и оболочек. Саратов: Сарат. госуд. технич. ун - т, 1996. 311 с.
12. Петров В.В., Кривошеин И.В. Методы расчёта конструкций из нелинейно-деформируемого материала. М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2009. 208 с.
13. Трещев А.А. Теория деформирования и прочности материалов с изначальной и наведенной чувствительностью к виду напряженного состояния. Определяющие соотношения. М.; Тула: РААСН; ТулГУ, 2016. 236 с.
14. Сергеева С.Б., Трещев А.А. Расчет круглых пластин, выполненных из титановых сплавов, подверженных совместному воздействию нагрузки и водородосодержащей среды // Изв. ТулГУ. Серия: математика, механика, информатика. 2001. Т. 7. Вып. 2. С. 167 – 172.
15. Jones R.M., Nelson D.A.R. Material for nonlinear Deformation // AIAA Journal. 1976. Vol. 14. № 6. Pp. 709–716.
16. Maekawa K., Ishida T. Modeling of structural performances under coupled environmental and weather actions // Materials and Structures. 2002. № 35. Pp. 28 – 42.
17. Tabaddor F. Constitutive Equations for Bimodulus Elastic Materials // AIAA Journal. 1972. Vol. 10. № 4. Pp. 516-518.

REFERENCES

1. Astafyev V.I., Shirayeva L.K. Nakopleniye povrezhdennosti i korrozionnoye rastreskivaniye metallov pod napryazheniyem [Accumulation of damage and stress corrosion cracking of metals]. Samara: Publishing of Samara University, 1998. 123 p.
2. Balandin P.P. K voprosu o gipotezakh prochnosti [To the question of strength hypotheses]. Vestnik inzhenerov i tekhnikov. 1937. No 1. Pp. 37-41.
3. Gervits G.YA. Vliyaniye gazonacyshcheniya na staticheskuyu prochnost' titanovykh splavov [The effect of gas saturation on the static strength of titanium alloys]. FKHMM. 1981. No 2. Pp. 45-48.
4. Kirillova L.A. Napryazhенно-deformirovannoye sostoyaniye gibkoy krugloy plastiny v vodorodosoderzhashchey srede s uchetom navedennoy neodnorodnosti [The stress-strain state of a flexible round plate in a hydrogen-containing medium, taking into account the induced inhomogeneity]. Dissertation Candidate of Tech. Science. Saratov, 1990. 163 p.
5. Kolachev B.A., Livanov V.A., Bukhanova L.A. Mekhanicheskiye svoystva titana i yego splavov [Mechanical properties of titanium and its alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1974. 544 p.
6. Markin A.A. K obosnovaniyu teorii obolochek [To the substantiation of the theory of shells]. Raboty po mekhanike deformiruyemykh sred. Tula: TPI. 1974. Pp. 121-129.
7. Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G., Chen'Tao, Uspanov A.M. Analiz eksperimental'nykh dannyykh po kinetike pronikaniya sul'fatosoderzhashchikh sred v zhelezobetonnyye konstruktsii i vliyaniju ikh na mekhaniche-skiye kharakteristiki komponentov zhelezobetona. Chast' 1. Eksperimenty po izucheniyu kinetiki pronikaniya [Analysis of experimental data on the kinetics of the penetration of sulfate-containing media into reinforced concrete structures and their influence on the mechanical characteristics of reinforced concrete components. Part 1. Experiments on the study of penetration kinetics]. Internet-zhurnal "Naukovedeniye". 2016. Vol. 8. No 1. 14 p.
8. Ovchinnikov I.G., Kirillova L.A. O deformirovaniii gibkoy krugloy plastiny iz materiala, chuv-stvitel'nogo k vodorodnomu vozdeystviyu [On the deformation of a flexible round plate made of a material sensitive to hydrogen exposure]. Saratov, 1989. 15 p. Paper dep. in VINITI February 7, 1990, No. 698 - B90.
9. Ovchinnikov I.G. Modifitsirovannaya model' deformirovaniya i razrusheniya materiala, podvergayushchegosya oblucheniyu [A modified model of deformation and fracture of a material exposed to irradiation]. Stroitel'naya mekhanika i raschot sooruzheniy. 2014. No 1. Pp. 29-35.
10. Ovchinnikov I.G., Rassada A.B. Analiz eksperimental'nykh dannyykh po vliyaniju vodoroda pri normal'nykh temperaturakh na mekhanicheskiye svoystva metallov i splavov i postroyeniyu modeli vzaimodeystviya konstruktivnykh elementov s vodorodom. CH.1. Problema vozdeystviya vodoroda na metally i puti yeye resheniya. Zakonomernosti pronikaniya vodoroda v konstruktivnyye elementy [Analysis of experimental data on the effect of hydrogen at normal temperatures on the mechanical properties of metals and alloys and the construction of a model for the interaction of structural elements with hydrogen. Part 1. The problem of the effect of hydrogen on metals and ways to solve it. Patterns of hydrogen penetration into structural elements]. Saratov: Sarat. politekhn. institute, 1989. 28 p.
11. Petrov V.V., Inozemtsev V.K., Sineva N.F. Teoriya navedennoy neodnorodnosti i yeye prilozheniya k probleme ustoychivosti plastin i obolochek [The theory of induced heterogeneity and its applications to the problem of stability of plates and shells]. Saratov: Sarat. gosud. tekhnich. universitet, 1996. 311 p.

12. Petrov V.V., Krivoshein I.V. Metody raschota konstruktsiy iz nelineyno-deformiruyemogo materiala [Methods for calculating structures from non-linearly deformable material]. Moscow: Izdatel'stvo Assotsiatsii stroitel'nykh vuzov, 2009. 208 p.
13. Treshchev A.A. Teoriya deformirovaniya i prochnosti materialov s iznachal'noy i navedennoy chuvstvitel'nost'yu k vidu napryazhennogo sostoyaniya. Opredelyayushchiye sootnosheniya [The theory of deformation and strength of materials with initial and induced sensitivity to the type of stress state. Defining Relationships]. Moscow, Tula: RAACS; TulGU, 2016. 236 p.
14. Sergeyeva S.B., Treshchev A.A. Raschet kruglykh plastin, vypolnennykh iz titanovykh splavov, podverzhennykh sovmestnomu vozdeystviyu nagruzki i vodorodosoderzhashchey sredy [Calculation of round plates made of titanium alloys subjected to the combined action of a load and a hydrogen-containing medium]. *Izvestiya TulGU. Seriya: matematika, mehanika, informatika*. 2001. Vol. 7. Issue. 2. Pp. 167 – 172.
15. Jones R.M., Nelson D.A.R. Material for nonlinear Deformation. *AIAA Journal*. 1976. Vol. 14. No 6. Pp. 709–716.
16. Maekawa K., Ishida T. Modeling of structural performances under coupled environmental and weather actions. *Materials and Structures*. 2002. No 35. Pp. 28 – 42.
17. Tabaddor F. Constitutive Equations for Bimodulus Elastic Materials. *AIAA Journal*. 1972. Vol. 10. No 4. Pp. 516-518.

Информация об авторах:

Трешёв Александр Анатольевич

ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», г. Тула, Россия,

Член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительство, строительные материалы и конструкции»

E-mail: taa58@yandex.ru

Кузнецова Виолетта Олеговна

ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», г. Тула, Россия,

Аспирант кафедры «Строительство, строительные материалы и конструкции»

E-mail: kuznecova_violetta@mail.ru

Information about authors:

Treschev Alexander Anatolyevich

Tula State University, Tula, Russia,

Corresponding member of RAACS, doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department "Construction, building materials and structures"

E-mail: taa58@yandex.ru

Kuznetsova Violetta Olegovna

Tula State University, Tula, Russia,

Postgraduate Student of the Department of Construction, Building Materials and Structures

E-mail: kuznecova_violetta@mail.ru

СПОСОБ УСИЛЕНИЯ КАРКАСА МНОГОЭТАЖНОГО ЗДАНИЯ ПРИ НЕРАВНОМЕРНЫХ ОСАДКАХ ФУНДАМЕНТОВ

КОЛЧУНОВ ВЛ.И.¹, ДЬЯКОВ И.М.², ГРЕЧИШНИКОВ С.В.¹, ДЬЯКОВ М.И.²

¹Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия

²Крымский федеральный университет им. В.И.Вернадского, г. Симферополь, Россия

Аннотация. Приведены результаты исследования поврежденного состояния многоэтажного здания служебно-бытовой блока Курской АЭС. Анализ выполнен с учетом инженерно-геологического строения основания и особенностей возведения каркаса. Изучены имеющиеся повреждения и деформации несущих и ограждающих элементов, выявлены их причины, основными среди которых являются неравномерная осадка фундаментов, вызванная опиранием одного ряда подколонников на фундаментную плиту примыкающего здания производственного корпуса, а также последовательность возведения расположенных рядом строений.

Описан разработанный способ усиления каркаса многоэтажного здания, основанный на переопирании ряда колонн на дополнительный независимый ленточный фундамент, расположенный между крайней и средней осьми. Расчетным анализом показана эффективность предложенной конструкции усиления, при этом предложены дополнительные конструктивные решения по защите здания от прогрессирующего обрушения.

Ключевые слова: усиление фундаментов, неравномерная осадка фундаментов, повреждения, деформации, ленточный фундамент, железобетонный каркас, прогрессирующее обрушение

METHOD FOR STRENGTHENING THE FRAME OF A MULTI-STORY BUILDING UNDER DIMENSIONAL SEDIMENTS OF FOUNDATIONS

KOLCHUNOV VI.I.¹, DIAKOV I.M.², GRECHISHNIKOV S.V.¹, DIAKOV M.I.²

¹South-West state University, Kursk, Russia

²Crimean Federal University named after V.I. Vernadsky, Simferopol, Russia

Abstract. The results of the study of the damaged condition of the multi-storey building of the service and household unit of the Kursk NPP are presented. The analysis is carried out taking into account the engineering-geological structure of the base and the peculiarities of the construction of the frame. Studied existing damage and deformation of load-bearing and enclosing elements identified their causes, chief among which are nervous-tion of sediment foundations, caused by resting one row podkolonnik on the base plate adjacent buildings industrial buildings, as well as the sequence of construction of adjacent buildings.

The developed method of strengthening the frame of a multi-storey building, based on the re-support of a number of columns on an additional independent ribbon Foundation, located between the extreme and middle axes, is described. The calculated analysis shows the effectiveness of the proposed reinforcement structure, while additional design solutions are proposed to protect the building from progressive collapse.

Keywords: strengthening of foundations, uneven sediment of foundations, damage, deformation, ribbon Foundation, reinforced concrete frame, progressive collapse.

Введение

Необходимость в проведении усиления конструкций зданий и сооружений ежегодно увеличивается. С одной стороны, это связано с длительной эксплуатацией и возрастной деградацией строительных объектов [1,2,3,4]. С другой стороны, в условиях роста объемов строительства в сложных инженерно-геологических и стесненных условиях, многофакторная неопределенность воздействий, проектные ошибки, недоучет тех или иных факторов строительства приводят к деформациям и повреждениям зданий, а соответственно – к необходимости усиления фундаментов и надфундаментных конструкций [3,5,6,7,8,9]. В этих условиях повышается актуальность поиска новых технических решений по усилению конструкций поврежденных зданий и сооружений, совершенствования методик их расчетного анализа, в том числе и на создание методов защиты от прогрессирующего разрушения в процессе эксплуатации и производства работ [10-12].

В рамках реализации проекта восстановления поврежденного здания служебно-бытовой блока Курской АЭС был проведен анализ его технического состояния и разработана система усиления фундаментов и элементов каркаса [5,13].

Здание служебно-бытового блока (СББ КПЖРО) представляет собой четырехэтажное каркасное здание размерами в плане – 43,94x13,49 м с высотой этажа – 3,6 м и общей высотой – 18,35 м (рисунок 1). Между осями «27»-«28», «Г/1»-«Е/2» располагается подвал с отметкой пола -3,700. По оси «26» служебно-бытовой блок примыкает к производственному корпусу. Здание выполнено по рамно-связевой конструктивной схеме из сборного железобетона с шарнирным сопряжением ригелей и колонн.

Геологический разрез основания под зданием по скважинам, расположенным вдоль его продольной оси в соответствии с последними инженерно-геологическими изысканиями 2018 года представлен на рисунке 2, с характеристиками основания приведенными в таблице 1.

Пространственная устойчивость здания обеспечивается системой вертикальных диафрагм жесткости, объединённых горизонтальными дисками перекрытий. Наружные стены – самонесущие из кирпичной кладки толщиной 640 мм.

Фундаменты под колонны здания выполнены столбчатыми монолитными железобетонными с отметкой подошвы -2,100 м. По оси «26», в соответствии с проектом, подколонники опреты на фундаментную плиту смежного производственного корпуса. Железобетонные колонны каркаса имеют квадратное сечение размерами 400x400 мм. Ригели покрытия и перекрытий приняты сборными в виде Т-образного поперечного сечения габаритными размерами 595x590 мм. Все конструкции каркаса были выполнены из бетона класса В20 и армированы рабочей арматурой класса А400. Перекрытия и покрытие – сборные железобетонные из круглопустотных плит.

Таблица 1 — Расчетные характеристики грунтов основания

Наименование	Удельный вес	Модуль деформации	Модуль упругости	Коэффициент Пуассона
	T/m ³	T/m ²	T/m ²	
ИГЭ 1	1.91	2038.74	16989.47	0.32
ИГЭ 2	1.5	2038.74	16989.47	0.32
ИГЭ 3	1.95	1512.82	12942.26	0.35
ИГЭ 4	2.05	1427.12	11892.63	0.35
ИГЭ 5	1.63	2446.49	20387.36	0.32
ИГЭ 6	1.91	1427.12	11892.63	0.35
ИГЭ 7	1.79	3567.79	29731.57	0.33

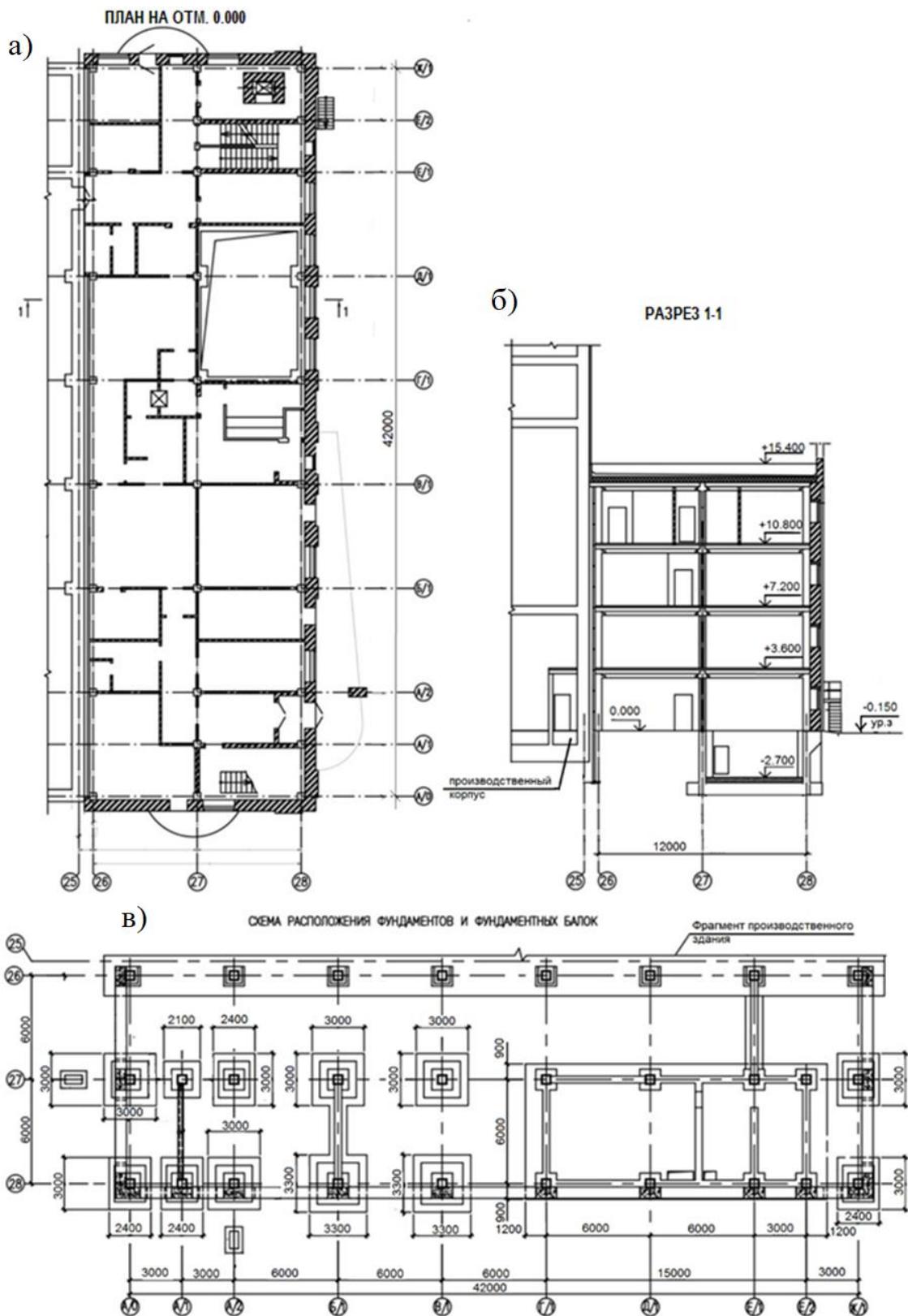


Рисунок 1 — Схема здания служебно-бытового блока: а - план; б – разрез; в – план фундаментов

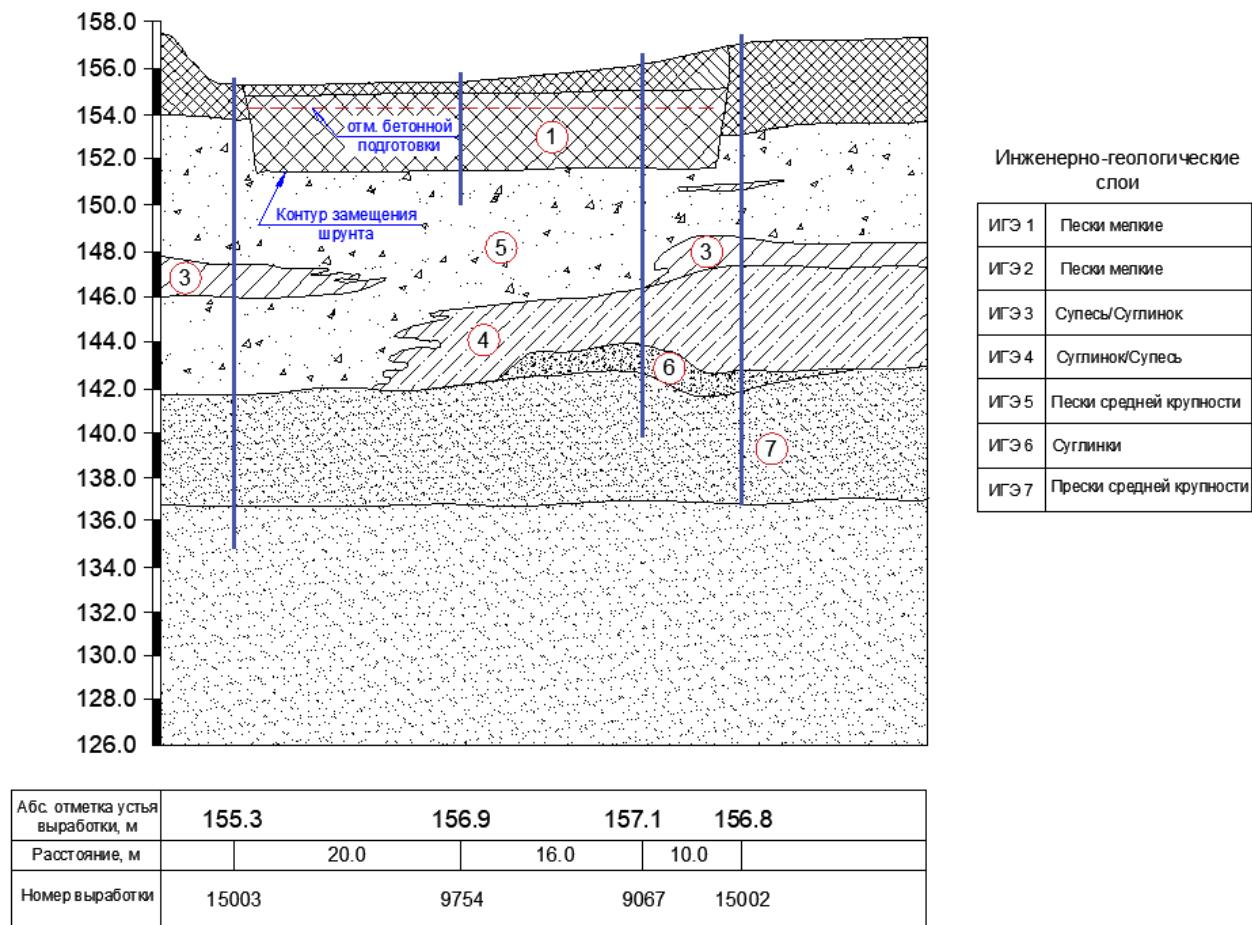


Рисунок 2 — Инженерно-геологический разрез основания под зданием

Примыкающий к служебно-бытовому производственный корпус располагается на фундаментной плите из монолитного железобетона толщиной 1,0 м. После частичного возведения производственного корпуса, его строительство было приостановлено. В процессе строительства служебно-бытового блока столбчатые фундаменты здания по оси «26», в соответствии с проектом, были опреты на фундаментную плиту производственного корпуса КПЖРО. После достройки производственного корпуса вследствие осадки фундаментной плиты произошла дополнительная осадка столбчатых фундаментов служебно-бытового блока по оси «26» на величину, превышающую допустимое нормами значение. Неравномерная осадка здания явилась причиной возникновения значимых дефектов и повреждений конструкций служебно-бытового блока[2,14].

Результаты обследования

В результате проведенного обследования технического состояния здания служебно-бытового блока выявили следующее:

- в осях «26»/«A1» в узле опирания фундаментной балки на столбчатый фундамент имеется зазор между нижней гранью фундаментной балки и верхней гранью столбчатого фундамента, связанный с превышением осадки фундаментов корпуса по оси «26» и величины осадки столбчатых фундаментов служебно-бытового корпуса по осям «27» и «28», а также изменением схемы опирания фундаментной балки;

- в поперечных стенах и перегородках между осями «26»-«27» имеются наклонные трещины шириной раскрытия до 5 мм, связанные с неравномерной осадкой фундаментов здания, частичным изменением схемы опирания конструкции здания в осях «27»-«28» через перегородки на конструкцию пола и защемлением отдельных колонн конструкцией пола;
- между наружной стеной и колоннами в осях «27»/«H1», а также между стеной и плитами перекрытий имеются значительные зазоры с раскрытием до 30мм, связанные с неравномерной осадкой фундаментов и креном каркаса здания.

Анализ относительной осадки фундаментов здания показал, что: фактическая относительная разность осадок фундаментов по оси «26» и фундаментов по осям «27», «28», а также отклонение от горизонтальной плоскости отдельных конструкций на период обследования превышает предельно допустимые значения. При этом прогибы конструкций ригелей находятся в границах допустимых значений.

В целом, на основании проведенного анализа результатов обследования технического состояния здания, были сделаны следующие основные выводы:

- при разработке проекта здания служебно-бытового блока не было учтено взаимное влияние фундаментов производственного корпуса и служебно-бытового блока;
- в процессе строительства производственного корпуса произошла значительная осадка фундаментной плиты и опирающихся на нее подколонников служебно-бытового блока по оси «26» и, соответственно крен фундаментных балок под поперечными наружными стенами;
- неравномерная осадка фундаментов здания привела к значительным деформациям конструкций каркаса, повреждению наружных стен и перегородок.

Конструкция усиления железобетонного каркаса

В процессе разработки проекта усиления здания служебно-бытового блока были рассмотрены несколько вариантов технических решений из известных способов усиления[13,15]. В качестве окончательного, исходя из различных критериев технического и технологического характера, был принят вариант с опиранием колонн и фундаментных балок по оси «26» на независимый ленточный фундамент и расположением его между осями «26» и «27» в непосредственной близости к фундаментной плите производственного корпуса (рисунок 3). Отметка подошвы ленточного фундамента назначена равной отметке подошвы фундаментной плиты производственного корпуса. Выбор ленточного фундамента обоснован стремлением максимально приблизить центральную ось фундамента к оси «26» колонн здания служебно-бытового блока.

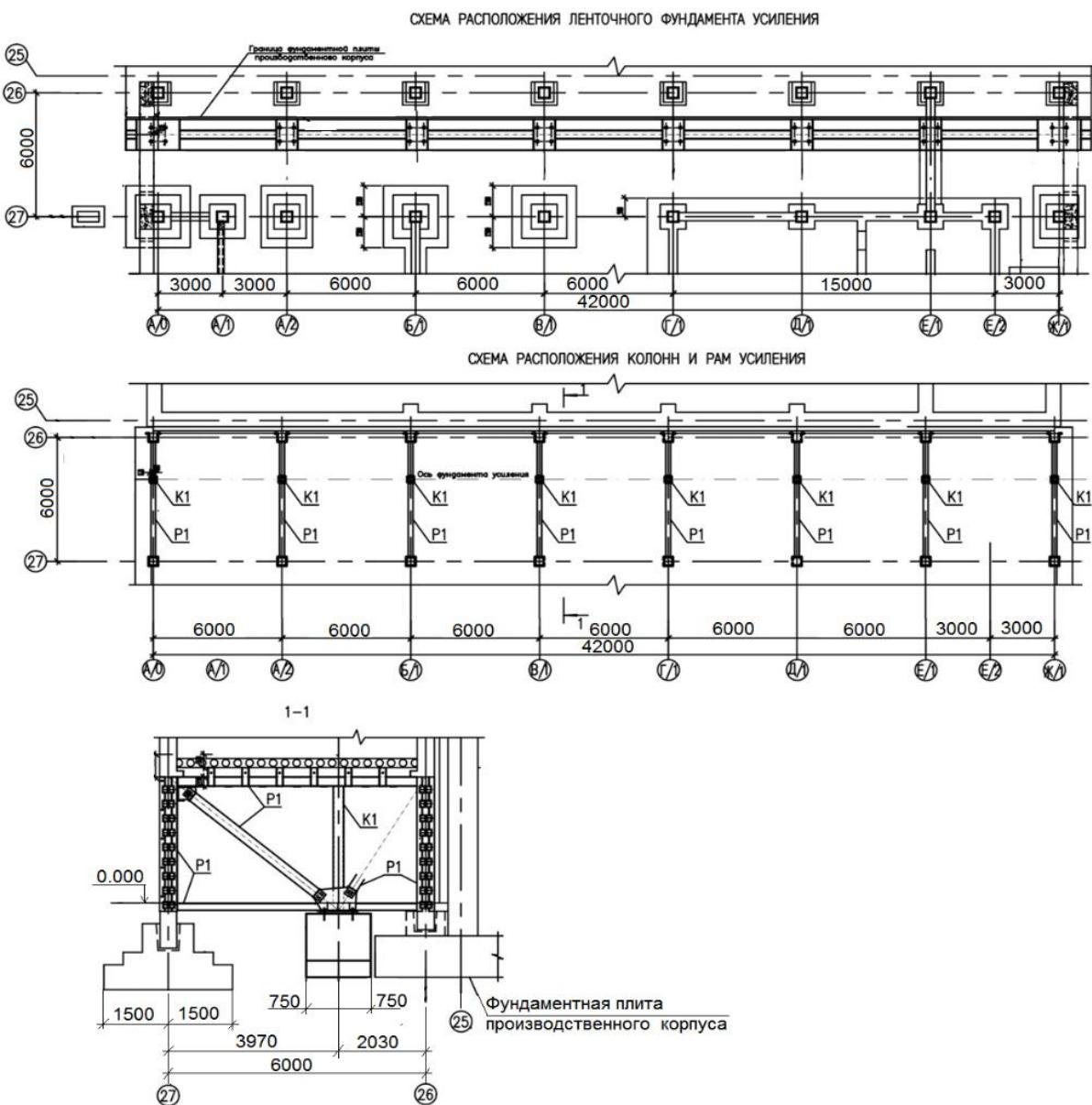
Дополнительный ленточный фундамент имеет перевернутую Т-образную форму по поперечного сечения с уширениями в местах опирания рамных конструкций усиления. Ширина фундамента была определена расчетом. Для опирания фундаментных балок и предотвращения повышения уровня нормальных контактных напряжений под подошвой ленточного фундамента, на краевых участках конструкции были предусмотрены выступы фундамента за пределы габаритного размера длины здания.

Передача усилий с колонн по оси «26» на дополнительный фундамент осуществляется через конструкции металлических рам, жестко закрепленных к колоннам по осям «26» и «27», и соответствующим ригелям. Стержни рамы усиления приняты из металлической квадратной трубы, площадь поперечных сечений которой определена расчетом.

Для расчета каркаса здания и конструкции усиления был использован программный комплекс SCAD Office 21.1. Расчетные схемы представлены на рис. 4 а, б. В задачи расчетного анализа входили следующие:

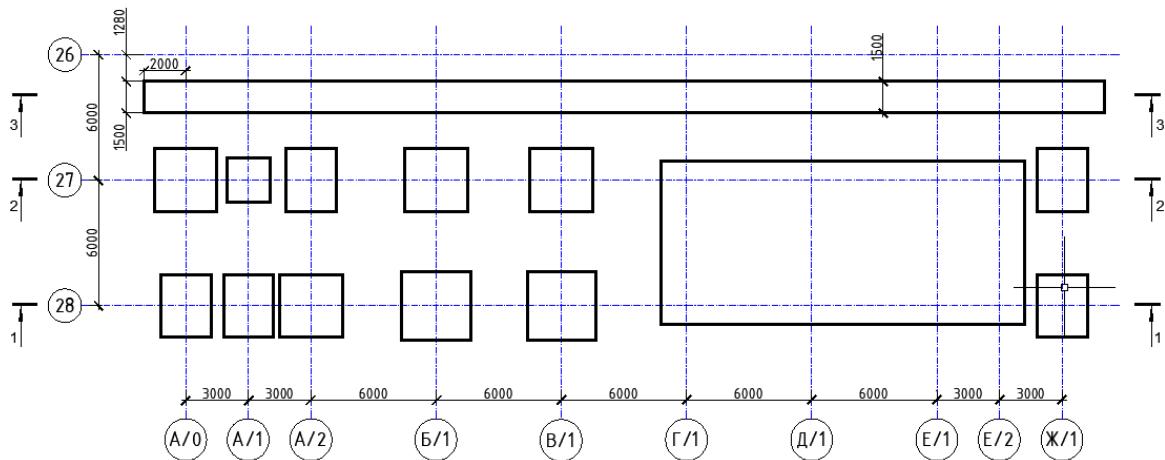
- проверка принятых сечений элементов усиления, ширины подошвы дополнительного фундамента;

- определение перераспределения силовых потоков в несущих конструкциях здания и основании после включения в работу конструкции усиления;
- выявление целесообразности включения в конструкцию усиления дополнительных устройств (домкратов) для поэтапной передачи усилий на новый фундамент;
- расчетный анализ здания на особые воздействия, вызванные удалением из каркаса здания одной из колонн или элементов рамной конструкции усиления, с проверкой здания на прогрессирующее разрушение как в процессе выполнения работ по усилению, так и во время эксплуатации здания.



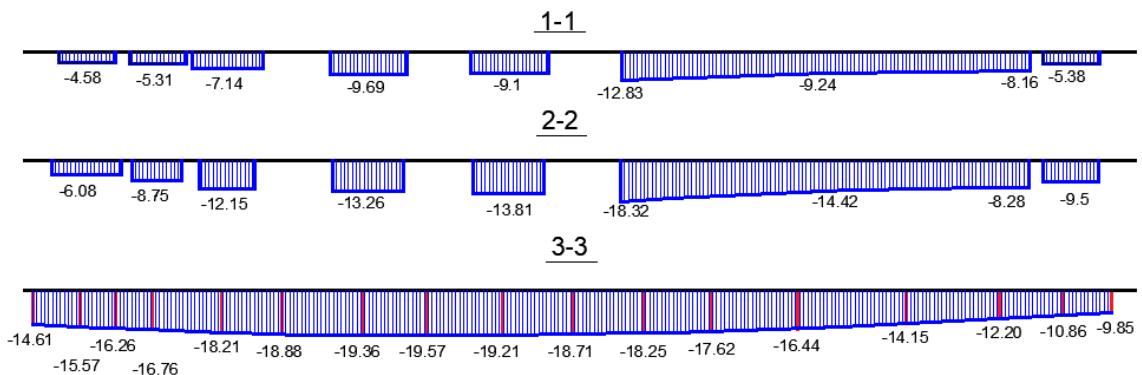
a)

Схема расположения фундаментов



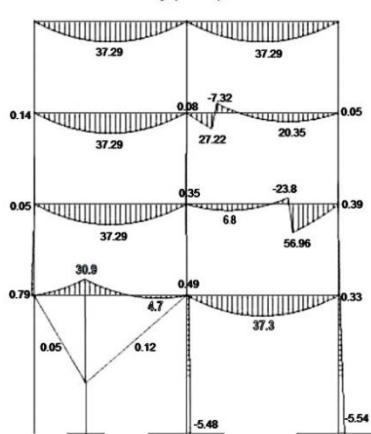
6)

Эпюры осадок фундаментов (мм)

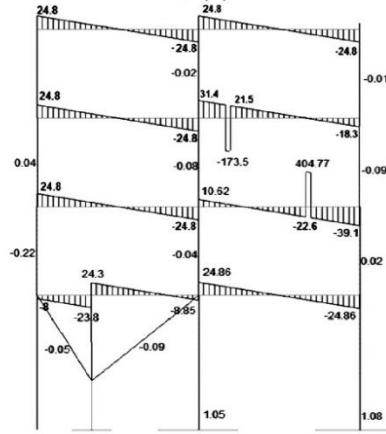


B)

$$M(T^*M)$$



Qz(T)



N(T)

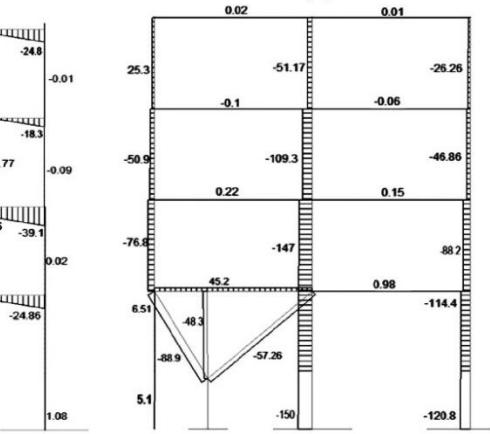


Рисунок 4 — Схема расположение существующих и дополнительного фундаментов здания (а), эпюры осадок фундамента в сечениях 1-1, 2-2, 3-3 соответственно (б) и эпюры усилий в элементах каркаса здания и усиления (в)

Было выполнено четыре варианта расчета:

- одностадийный расчет здания с конструкцией усиления;
- поэтапный расчет, предусматривающий такие стадии, как: расчет в существующем состоянии с сверхнормативной осадкой фундамента по оси «28» (осадка задавалась путем подбора площади условных фундаментов по данной оси для достижения величины существующей осадки); включение конструкции усиления и выключение фундаментов по оси «27»;
- поэтапный расчет аналогичный предыдущему, но с заданием предварительной осадки дополнительному фундаменту (в реальных условиях эта схема реализуется за счет временных домкратов, устанавливаемых между металлическими рамами и новым фундаментом);
- расчет здания без конструкции усиления на прогрессирующее разрушение с выключением из работы одной из колонн первого этажа по оси «26». Такая ситуация в реальных условиях возможна при выполнении работ по демонтажу конструкции пола и перегородок перед монтажом конструкции усиления;
- расчет каркаса здания на прогрессирующее разрушение с выключением из работы наиболее нагруженных колонн по оси «28» с учетом динамических догружений [11,12].

Схема расположения фундаментов, результаты расчета осадки и усилий в конструкциях здания по первому варианту расчета представлены на рисунке 4. В результате расчета по первому варианту с использованием критериев [16] установлено, что максимальная осадка фундаментов составляет 19.57 мм, что значительно меньше предельно допустимой осадки, равной 100 мм согласно нормам [17,18,19]. Относительная максимальная разность расчетных значений осадок $\Delta s/L = 1.42$ мм/м так же не превышает предельно допустимую $\Delta s/L = 2$ мм/м.

По результатам расчета с целью технологической унификации сечения всех раскосов рам рекомендовано принять из металлической профилированной трубы сечением 200x6 мм. При этом расчетный коэффициент запаса у самого напряженного стержня рамы составил 18%.

По результатам расчета каркаса здания при самых невыгодных загружениях следует отметить значительные перемещения узлов ригеля верхнего этажа здания оси «27». Абсолютная максимальная величина этого перемещения по Z составила 31.48 мм.

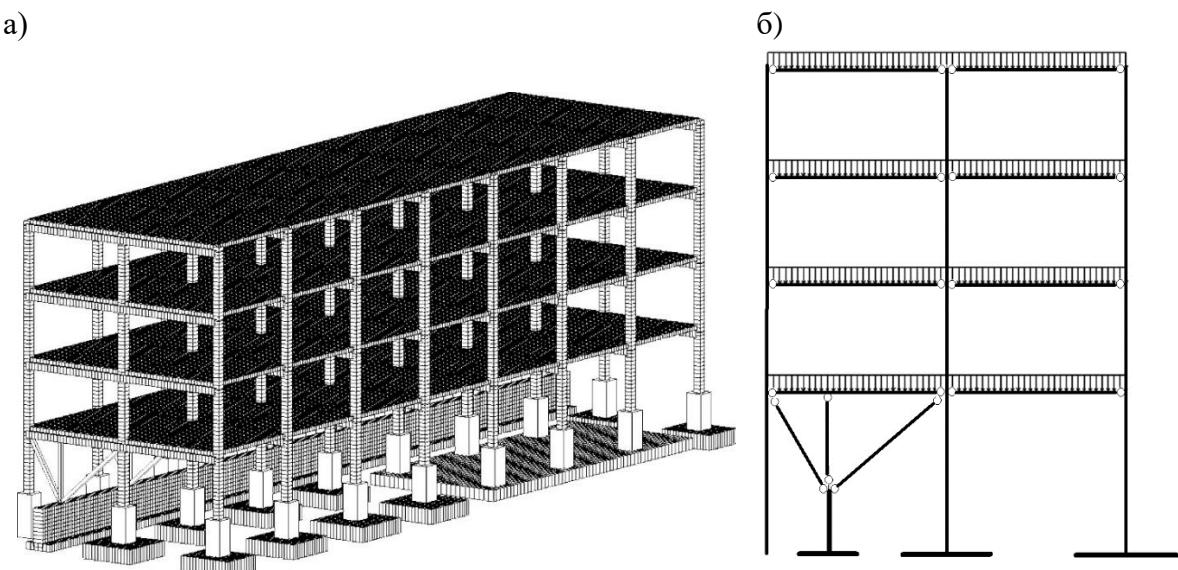


Рисунок 5 — Расчетная схема каркаса здания (а) и конструкций усиления (б)

Результаты расчета по второму и третьему вариантам, в части осадок фундаментов, существенно не отличались от результатов первого расчета. Вместе с тем установлено, что предложенный вариант использования временных домкратов, между металлическими рамами и новым фундаментом позволяет более полно включить дополнительный фундамент в работу, повысить коэффициент загрузки конструкции усиления, уменьшить имеющиеся неравномерные деформации здания, а также снизить перемещения узлов ригеля верхнего этажа здания и всех других узлов каркаса здания по оси «27».

Расчет поврежденного здания служебно-бытового блока без конструкции усиления на прогрессирующее обрушение, выполненный с выключением из работы одной из колонн (вариант 4), выявил возможность разрушения блока в процессе работ по восстановлению. Поэтому в случае принятия такого варианта усиления должна быть детально проработана технологическая схема производства этих работ.

Расчет здания по требованиям СП 385.1325800.2018 на удаление одной из несущих колонн первого этажа показал, что требования особого предельного состояния для запроектированного каркаса здания без дополнительной защиты не обеспечиваются. Поэтому при проектировании усиления рассматриваемого объекта необходимо запроектировать дополнительные конструктивные решения по защите здания от прогрессирующего обрушения.

Выводы

1. Разработанная система усиления конструкции здания позволяет предотвратить дальнейшие деформации и разрушение здания СББ путем переопирания колонн по оси «26» на новый ленточный фундамент.

2. Для обеспечения совместной работы конструкции усиления с основной системой здания целесообразно включение домкратов между системой усиления и дополнительным фундаментом для включения конструкции фундамента в работу и уменьшения деформаций конструкций здания.

3. Перед устройством конструкции усиления каркасных зданий целесообразно выполнение расчета на прогрессирующую обрушение. Это позволит разработать мероприятия по безопасности производства работ при монтаже конструкций усиления, а также внести коррективы в проект усиления для обеспечения устойчивости здания к прогрессирующему разрушению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондаренко В.М., Боровских А.В. Износ, повреждения и безопасность железобетонных сооружений. М.: ИД Русанова, 2000. 144 с.
2. Плевков В.С., Балдин И.В., Гончаров М.Е. Восстановление несущей способности железобетонного каркаса кардиологического центра в г. Кемерово // Наука и безопасность. 2011. № 1(9). С. 31-36.
3. Смоляго Г.А., Дрокин С.В., Дронов А.В., Белоусов А.П., Пушкин С.А., Смоляго Е.Г. Оценка остаточного ресурса несущей способности сборных безбалочных железобетонных перекрытий // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. № 6(69). С. 66-73.
4. Tsvetkov R., Shardakov I., Shestakov A., Gusev G., Eriп V. Deformation monitoring of load-bearing reinforced concrete beams // Procedia Structural Integrity. 2017. Vol. 5. Pp. 620-626.
5. Баранова Т.И., Гучкин И.С., Артюшин Д.В., Попов Д.В. Инженерные методы восстановления поврежденных конструкций в период строительства железобетонных каркасных зданий // Региональная архитектура и строительство. 2008. №2. С. 32-34.
6. Федорова Н. В., Губанова М. С. Расчетный анализ железобетонного составного ригеля панельно-рамного каркаса многоэтажного здания // Промышленное и гражданское строительство. 2018. N 9. С. 86-92
7. Ramesh M., Kuklik P., Válek M. Several comments on Numerical Modeling of Shallow Foundations // Procedia Engineering. 2017. Vol. 195. Pp. 73-80.
8. Плевков В.С., Мальганов А.И., Балдин И.В. Оценка технического состояния, восстановление и усиление строительных конструкций инженерных сооружений. Томск: ТГАСУ, 2011. 313 с.
9. Мальганов А.И., Плевков В.С. Восстановление и усиление ограждающих строительных конструкций зданий и сооружений. Томск: «Печатная мануфактура», 2002. 390 с.
10. Кодыш Э.Н., Трекин Н.Н., Чесноков Д.А. Защита многоэтажных зданий от прогрессирующего обрушения // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 6. С. 8-13.

11. Saffari H., Javad Mashhadi J. Assessment of dynamic increase factor for progressive collapse analysis of RC structures // *Engineering Failure Analysis*. 2018. 84. Pp. 300–310
12. Колчунов В.И., Осовских Е.В., Алькади С.А. Деформирование железобетонных пространственных конструкций многоэтажных зданий в запредельных состояниях // IV Крымская Международная научно-практическая конференция «Методология безопасности среды жизнедеятельности»: тезисы докладов. Симферополь: КАФУ, 2017. С. 43-44.
13. Голышев А.Г., Кривошеев П.И., Козелецкий П.М. Усиление железобетонных конструкций производственных зданий и просадочных оснований. К.: Логос, 2004. 217 с.
14. Motra H.B., Stutz H., Wuttke F. Quality assessment of soil bearing capacity factor models of shallow foundations // *Soils and Foundations*. 2016. Volume 56. Issue 2. Pp. 265-276
15. Mandy Korff. Deformations and damage to buildings adjacent to deep excavations in soft soils. 1001307-004-GEO-0002, Version 02, 26 November 2009, Deltares, 2009, 143 p.
16. Чунюк Д.Ю., Сергеев С.А. Оценка использования метода конечных элементов при усилении фундаментов реконструируемых зданий // В мире научных открытий. 2014. №2. С. 1-7.
17. EN 1997-1 (2004) (English): Eurocode 7: Geotechnical design - Part 1: General rules. Final draft. 2004
18. СП 22.13330.2016 Основания зданий и сооружений. М.: Стандартинформ, 2019.
19. Zhang, L. M. and Ng, A. M. Y. Probabilistic limiting tolerable displacements for serviceability limit state design of foundations // *Geotechnique*. 2005. 55(2). Pp. 151-161.

REFERENCES

1. Bondarenko V.M., Borovskikh A.V. *Iznos, povrezhdeniya i bezopasnost' zhelezobetonnykh sooruzheniy* [Depreciation, damage and safety of reinforced concrete structures]. Moscow: Publishing of Rusanov, 2000. 144 p.
2. Plevkov V.S., Baldin I.V., Goncharov M.Ye. *Vosstanovleniye nesushchey sposobnosti zhelezobetonnogo karkasa kardiologicheskogo tsentra v g. Kemerovo* [The restoration of the bearing capacity of the reinforced concrete frame of the cardiology center in the city of Kemerovo]. *Nauka i bezopasnost'*. 2011. 1(9). Pp. 31-36.
3. Smolyago G.A., Drokin S.V., Dronov A.V., Belousov A.P., Pushkin S.A., Smolyago Ye.G. Otsenka ostsatoch-nogo resursa nesushchey sposobnosti sbornykh bezbalochnykh zhelezobetonnykh perekrytiy [Estimation of the residual resource of the bearing capacity of prefabricated beam-free reinforced concrete floors]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta*. 2016. No 6(69). Pp. 66-73.
4. 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.
5. Baranova T.I., Guchkin I.S., Artyushin D.V., Popov D.V. *Inzhenernyye metody vosstanovleniya povrezhdennykh konstruktsiy v period stroitel'stva zhelezobetonnykh karkasnykh zdaniy* [Engineering methods for the restoration of damaged structures during the construction of reinforced concrete frame buildings]. *Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo*. 2008. No 2. Pp. 32-34.
6. Fedorova N. V., Gubanova M. S. *Raschetnyy analiz zhelezobetonnogo sostavnogo rigelya panel'no-ramnogo karkasa mnogoetazhnogo zdaniya* [Calculation analysis of the reinforced concrete composite crossbar of the panel-frame frame of a multi-storey building]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2018. No 9. Pp. 86-92
7. Ramesh M., Kuklik P., Válek M. Several somments on Numerical Modeling of Shallow Foundations. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 195. Pp. 73-80.
8. Plevkov V.S., Mal'ganov A.I., Baldin I.V. *Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya, vosstanovleniye i usileniye stroitel'nykh konstruktsiy inzhenernykh sooruzheniy* [Assessment of the technical condition, restoration and strengthening of building structures of engineering structures]. Tomsk: TGASU, 2011. 313 p.
9. Mal'ganov A.I., Plevkov V.S. *Vosstanovleniye i usileniye ogranichayushchikh stroitel'nykh konstruktsiy zdaniy i sooruzheniy* [Restoration and strengthening of building envelopes of buildings and structures]. Tomsk: "Pechatnaya manufaktura", 2002. 390 p.
10. Kodysh E.N., Trekin N.N., Chesnokov D.A. *Zashchita mnogoetazhnnykh zdaniy ot progressivnykh obrusheniya* [Protection of multi-storey buildings from progressive collapse]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2016. No 6. Pp. 8-13.
11. Saffari H., Javad Mashhadi J. Assessment of dynamic increase factor for progressive collapse analysis of RC structures. *Engineering Failure Analysis*. 2018. 84. Pp. 300–310
12. Kolchunov V.I., Osovskikh Ye.V., Al'kadi S.A. *Deformirovaniye zhelezobetonnykh prostranstvennykh konstruktsiy mnogoetazhnnykh zdaniy v zapredel'nykh sostoyaniyakh* [The deformation of reinforced concrete spatial structures of multi-storey buildings in transcendental conditions]. Proc. Of IV Crimean Int. Scientific and Techn. Conf. "Metodologiya bezopasnosti sredy zhiznedeyatel'nosti" ["Methodology for the Safety of the Living Environment"]. Simferopol: KAFU, 2017. Pp. 43-44.
13. Golyshev A.G., Krivosheyev P.I., Kozeletskiy P.M. *Usileniye zhelezobetonnykh konstruktsiy proizvodstvennykh zdaniy i prosadochnykh osnovaniy* [Reinforcement of reinforced concrete structures of industrial buildings and subsidence foundations]. Kyiv: Logos, 2004. 217 p.
14. Motra H.B., Stutz H., Wuttke F. Quality assessment of soil bearing capacity factor models of shallow foundations. *Soils and Foundations*. 2016. Volume 56. Issue 2. Pp. 265-276

15. Mandy Korff. Deformations and damage to buildings adjacent to deep excavations in soft soils. 1001307-004-GEO-0002, Version 02, 26 November 2009, Deltares, 2009, 143 p.
16. Chunyuk D.YU., Sergeev S.A. Otsenka ispol'zovaniya metoda konechnykh elementov pri usilenii fundamantov rekonstruiruyemykh zdaniy [Evaluation of the use of the finite element method for strengthening the foundations of reconstructed buildings]. V mire nauchnykh otkrytiy. 2014. No 2. Pp. 1-7.
17. EN 1997-1 (2004) (English): Eurocode 7: Geotechnical design - Part 1: General rules. Final draft. 2004
18. Russian Building Code SP 22.13330.2016 Osnovaniya zdaniy i sooruzheniy [Foundations of buildings and structures]. Moscow: Standartinform, 2019.
19. Zhang, L. M. and Ng, A. M. Y. Probabilistic limiting tolerable displacements for serviceability limit state de-sign of foundations. *Geotechnique*. 2005. 55(2). Pp. 151-161.

Информация об авторах:

Колчунов Владимир Иванович

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Россия,
Д-р техн. наук, проф., профессор кафедры уникальных зданий и сооружений,
E-mail: vlik52@mail.ru

Дьяков Игорь Михайлович

ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В.И.Вернадского», Академия строительства и архитектуры (структурное подразделение), г. Симферополь, Россия,
Канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой геотехники и конструктивных элементов зданий,
E-mail: karta3@mail.ru

Гречишников Сергей Владимирович

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Россия,
Аспирант кафедры уникальных зданий и сооружений,

E-mail: grecha3_5ser@mail.ru

Дьяков Михаил Игоревич

ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В.И.Вернадского», Академия строительства и архитектуры (структурное подразделение), г. Симферополь, Россия,
Аспирант кафедры строительных конструкций,
E-mail: dyakov2790@gmail.com

Information about authors:

Kolchunov Vladimir Ivanovich

South-West state University, Kursk, Russia,
Doctor of technical sciences, professor of the department of unique buildings and structures,
Email: vlik52@mail.ru

Diakov Igor Mikhailovich

Crimean Federal University named after V.I. Vernadsky, Academy of Construction and Architecture,
Simferopol, Russia,
Candidate of tech. sc., docent, head of the dep. of geotechnology and structural elements of buildings,
E-mail: karta3@mail.ru

Grechishnikov Sergey Vladimirovich

South-West state University, Kursk, Russia,
graduate student of the department of unique buildings and structures,
Email: grecha3_5ser@mail.ru

Diakov Mikhail Igorevich

Crimean Federal University named after V.I. Vernadsky, Academy of Construction and Architecture,
Simferopol, Russia,
graduate student of the department of building structures
Email: dyakov2790@gmail.com

ASSESSMENT OF EXISTING REINFORCED CONCRETE STRUCTURES WITH USAGE OF THE FUZZY LOGIC – BASED EXPERT SYSTEM

TUR V.V., YALAVAYA Y.S.
Brest State Technical University, Brest, Belarus

Abstract. Fuzzy logic is a useful tool when assessing the existing reinforced concrete structures. The introduction of expert system in assessing the technical condition of the existing structures built on the fuzzy logic represents a transition to a new and higher-quality level for the survey of constructions sites. The paper presents the principle of development and implementation of expert system for assessment of the damages of the existing structures. The process is based on the algorithm in which the input data (crack width and propagation, residual strength of materials, amount and condition of the steel reinforcement, deflection, corrosion level et al.) and information collected at each phase are processed and interpreted in order to define the successive step of the procedure. As a result, it is seen that the assessment of the existing building with precast concrete elements with usage of the proposed fuzzy system is in compliance with the estimation of the qualified experts.

Keywords: expert system, fuzzy logic, existing structures, assessment, technical condition.

АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ

ТУР В.В., ЯЛОВАЯ Ю.С.
Брестский государственный технический университет, г. Брест, Беларусь

Аннотация. Нечеткая логика является полезным инструментом при оценке существующих железобетонных конструкций. Внедрение экспертной системы оценки технического состояния существующих конструкций, построенной с использованием нечеткой логики, представляет собой переход на новый и более качественный уровень обследования зданий и сооружений. В статье представлен принцип разработки и внедрения экспертной системы оценки технического состояния существующих конструкций. Процесс основан на алгоритме, в котором входные данные (внешний вид бетона, наличие и ширина раскрытия трещин, степень коррозионного повреждения арматуры, относительные прогибы и др.) и информация, собранные на каждом этапе, последовательно обрабатываются и интерпретируются в уровень, а далее в класс повреждения конструкции. В результате видно, что оценка существующего здания с использованием сборных железобетонных элементов с использованием предложенной нечеткой системы соответствует оценке квалифицированных специалистов.

Ключевые слова: экспертная система, нечеткая логика, существующие конструкции, оценка, техническое состояние.

Introduction

In recent years assessment of existing structures is becoming a more and more important engineering task. The process of assessment and structure management is a decision process which aims to remove any doubts regarding its current condition and future structural performance and/or to identify the most effective interventions required to fulfil the basic requirements. This process must be optimised considering the total service life costs of the structure. The standard ISO 13822 [1], defines “assessment of existing structures” as the “set of activities performed in order to verify the reliability of an existing structure for future use”. It defines investigation as “collection and evaluation of information through inspection, document search, load testing and other testing”.

Moreover, inspection is “*on-site non-destructive examination to establish the present condition of the structure*”.

According to [1], the assessment of the existing structure can be initiated under the following circumstances:

- an anticipated change in use or extension of design working life;
- a reliability check (e.g. earthquakes, increased traffic actions) as required by authorities, insurance companies, owners, etc.;
- structural deterioration due to time-dependent actions and influences (e.g. corrosion, fatigue);
- structural damage by accidental actions (see [2]).

As it was shown in [3] the diagnostic process for evaluation of the safety level of existing buildings is based on a decisional tree in which the data information collected at each phase are processed and interpreted to define the successive step of the procedure. Following [3], in general case the estimation procedure consists of three main phases, which can be singled out as follow:

Phase A: Preliminary analysis (visual inspection; basic *in-situ* testing) is aimed at obtaining a coarse estimation but general information of the real present state conditions of the existing structure and defining a rapid mapping of instabilities, damage and vulnerability. Based on the data obtained, it will be then decided if further and more detailed investigation needs.

Phase B: Extensive or detailed in-depth investigation, including a complete and systematic survey of the degradation scenery; experimental and laboratory tests, including both destructive and non-destructive *in-situ* methods.

Phase C: Interpretation and assessment of the obtained results; formulation of the judgment on the level of damage and reliability; specification of the repair and retrofitting interventions need in order to meet safety format requirements.

The investigation, including updating of information, is one of the most important activities in the assessment process. It must take into consideration all available information and, in particular, the influences of present damage and deterioration mechanisms. The aim of a preliminary inspection (designed as Phase A) is to identify the structural system and possible damage of the structure by visual observation with simple tools. The information collected is related to aspects such as surface characteristics, visible deformations, cracks, spalling, corrosion, etc. The results of the preliminary inspection are expressed, traditionally, in terms of a qualitative grading of structural conditions (e.g. none, minor, moderate, severe, destructive, unknown) for possible damage. According to the Recommendation given by [4], the preliminary assessment (Phase A) is organized in three consecutive steps, each of which provides an intermediate judgment: (1) *Typological and structural description and existing original design documentation analysis*; (2) *Visual inspection*, which consists of visual evaluation of cracks (extension and amplitude), concrete condition (degradation, covering thickness), reinforcing bars conditions (corrosion); (3) *In-situ experimental testing* (non-destructive or destructive).

Thus, preliminary inspection (*visual inspection + in-situ testing*) becomes the ruling practice in the management of maintenance, even when the importance of the construction is significant. The process of evaluation of degradation based on the results of visual inspection is heavily affected by subjectivity. It is because most of the assessment approaches are similar in principle but varies in the details.

As was shown above, most practical cases the expert in charge of the inspection writes down on a safety assessment protocol a linguistic statement, which represents the subjective judgment for the degradation under examination. When relying only on visual inspection both the problems of dealing with different levels of expertise of the inspectors and the problems of handling subjective information on degradation raise this information, which needs to be turned into objective and reliable assessments.

To use the visual inspection as a robust and reliable instrument to evaluate the safety level of existing structures of the buildings, it was decided to take advantage of the ability of Fuzzy Logic to treat uncertainty as expressed by linguistic judgments [5, 6].

The Fuzzy Logic was introduced in the 60's by Zadeh, who stated that the “*key elements of human thought cannot be represented by numbers, but rather are the labels of fuzzy sets, that is to say, linguistic values identifying fuzzy sets*”. Fuzzy sets are classes of object characterized by a gradual transition from the membership conditions to the non-membership one, whereas crisp sets (that where the only one known before this new theory) only allow the drastic binary condition membership/non-membership.

Some common theoretical background of the Fuzzy Logic approach to the civil engineering problems described in detail in numerous international publications [7–10].

As it pointed in [3], “*a Fuzzy Logic is a versatile tool, particularly suitable for the management of decisional trees involving the processing of data endowed with “vague” nature (both numerical and qualitative one), and is naturally able to provide a linguistic, qualitative assessment of the health conditions of the building*”. In this context, the Fuzzy Logic appears the most qualified tool for the processing of numerical data and uncertain information to obtain a linguistic description of structural damage.

In order to create the multilevel expert system for existing structures assessment based on the diagnostic process outlined above, a Fuzzy Logic-based algorithm is proposed, which exploits the Fuzzy Logic Toolbox package of *MatLab* Software.

The developed expert system is based on the results of the own investigations of the basic variables, which are used for description of the membership function and fuzzy rules.

Methods

Fuzzy Logic System: Development Steps. Figure 1 presents a general view of a fuzzy logic system that is widely used for the assessment of the different technical problems. A fuzzy logic system maps crisp inputs into crisp outputs. It contains four basic components: (1) fuzzifier; (2) rules; (3) inference engine and (4) defuzzifier. Once the rules have been established, a fuzzy logic system can be viewed as a mapping from inputs to outputs [7, 8].

The theoretical background of the Fuzzy Logic approach is described in detail in numerous publications [3, 9–13].

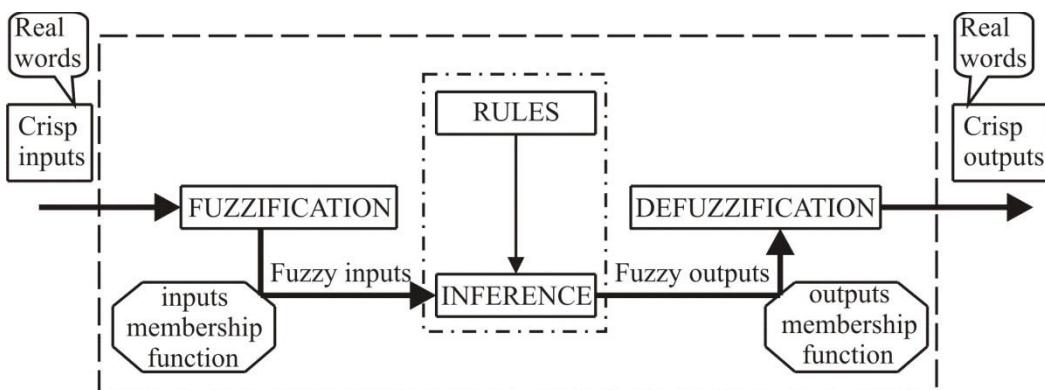


Figure 1 – Block diagram of the fuzzy logic system [8]

Following [8] the expert system designed and developed depending on the experience and expertise of experts. The procedures for developing the proposed system are divided into two main steps: (1) designing and (2) implementation. For each there is a list of procedures as follows:

- Designing: (a) Selecting Assessment Criteria; (b) Estimating the Importance of Assessment Criteria; (c) Designing of Damage Assessment Expert System.

- Implementation: (a) Investigation and Inspecting; (b) Input Data; (c) Assessing the Structural State of the Building.

As it was shown in [13–19] in the practical evaluation, one finds that the influence of the most basic variables is not as important as predicted. For instance, one originally regards that the deflection and strength of each member will result in decreased safety in the existing structure. Strength is generally satisfied by the specification requirements in the design. Therefore, to simplify the evaluation process, some variables, such as strength and so on are neglected in the evaluation method. In the proposed expert system, the basic variables are listed in Table 1.

Based on classification and ranges of parameters for the basic variables stated in own studies [20], the relationship between the evaluation of basic variables in existing structures was established.

Rule-Based Fuzzy Model/Expert System Development

For the development of the fuzzy production model for assessing of the performance of the existing structure, it is necessary to formulate the following set $X = \{x_i\}, i = \overline{1, n}$, consisting the basic variables (see Table 1) which are characterized performance of element and set $Y = \{y_j\}, j = \overline{1, m}$, characterizing damage level (see Table 2).

Table 1 – Input linguistic basic variables

Designation linguistic variables	Description of the linguistic variables	Term-set
Phase A: Visual Inspection (A-1)		
x_1	Crack propagation (bending/shear)	$T4 = \{\text{no «0»; single «S»; numerous «N»; massive «M»}\}$
x_2	Positions of the cracks (bending/shear)	$T4 = \{\text{no «0»; in the mid-span «1»; near support «2»; mid-span+ near support «3»}\}$
x_3	The longitudinal corrosion cracks propagation	$T4 = \{\text{no «0»; local «L»; partial «P»; solid «S»}\}$
x_4	Corrosion damage (deteriorations)	$T2 = \{\text{no «0»; yes «1»}\}$
x_5	Surface degradation of concrete (deteriorations)	$T2 = \{\text{no «0»; yes «1»}\}$
x_6	Propagation of the longitudinal corrosion cracks in compression zone of the section	$T2 = \{\text{no «0»; yes «1»}\}$
Phase A: Basic Testing (A-2)		
x_7	Concrete cover to diameter ratio, $\frac{c}{\emptyset}$	$T3 = \{\text{small «S»; mean «M»; large «L»}\}$
x_8	Load-induced cracks width, w_k (bending/shear)	$T4 = \{\text{small «S»; permissible «P»; exceeded «E»; excessive «Ex»}\}$
x_9	Longitudinal corrosion cracks width, w_l	$T3 = \{\text{small «S»; medium «M»; excessive «E»}\}$
x_{10}	Level of the reinforcement corrosion	$T3 = \{\text{small «S»; mean «M»; large «L»}\}$
x_{11}	Deflection ratio, $\frac{\delta}{L}$	$T4 = \{\text{small «S»; permissible «P»; exceeded «E»; excessive «Ex»}\}$
Phase A: Damage Class		
x_{12}	Visual Inspection (A-1)	$T3 = \{\text{critical «1»; significant «2»; minor «3»}\}$
x_{13}	Basic Testing (A-2)	$T3 = \{\text{critical «1»; significant «2»; minor «3»}\}$
x_{14}	Documentation	$T2 = \{\text{no «0»; yes «1»}\}$

Table 2 – Output linguistic basic variables

Designation linguistic variables	Description of the linguistic variables	Term-set
y_1	Damage level	$T_3 = \{\text{critical } «1»; \text{ significant } «2»; \text{ minor } «3»\}$
y_2	Damage level	$T_3 = \{\text{critical } «1»; \text{ significant } «2»; \text{ minor } «3»\}$
y_3	Damage class	$T_3 = \{\text{small } «1»; \text{ moderate } «2»; \text{ severe } «3»\}$

As it was shown above, in the damage assessment of an existing buildings (structures), several input data are required (crack width and propagation, residual strength of materials, amount and condition of the steel reinforcement, deflection, corrosion level et al.) that will all be treated, according to previous remarks, as fuzzy sets. The common structure deficiencies associated with the deterioration of the structural element are corrosion of steel reinforcement and the cracking, scaling and spalling concrete, deflections. The ranges for basic variables and correlation function were adopted based on their own numerical and experimental studies [3].

The architecture of the proposed Fuzzy production model/expert system for assessing the existing structural members is shown in Figure 2.

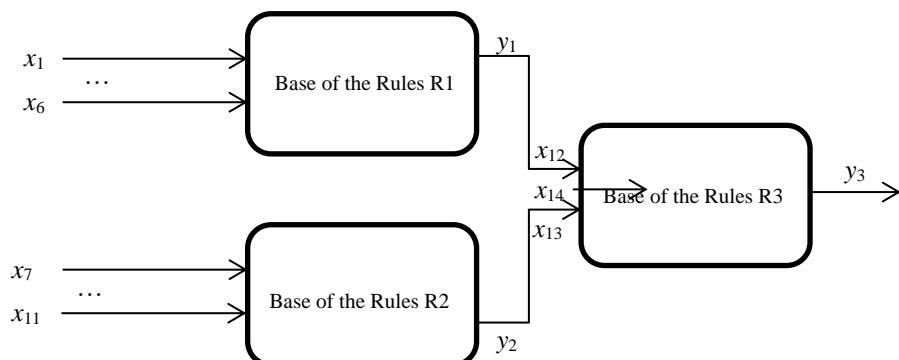


Figure 2 – The structure of the proposed Rule-Based Fuzzy Model

Results and Discussion

Realization of the Fuzzy production model for assessment of existing structures in MatLab Software is consisting of the following steps.

Step 1: Fuzzification – Input Fuzzy. At this stage, the membership function is adopted for term-sets of input and output linguistic variables, as shown in Table 3. The most commonly used membership functions are the trapezoidal and triangular one that will be indeed the functions adopted in the proposed algorithm.

Table 3 – Membership functions mathematical descriptions

Designation of the linguistic variables	Membership function type	Mathematical description (upper index designate the corresponding term)
x_1	Trapezoidal	$\mu_{\Delta}^0(x; 0; 0; 0), \mu_{\Delta}^S(x; 0.5; 0.5; 5; 15), \mu_{\Delta}^N(x; 5; 15; 35; 45), \mu_{\Delta}^M(x; 35; 45; 60; 60)$
x_2	Triangular	$\mu_{\Delta}^0(x; 0; 0; 0.5), \mu_{\Delta}^1(x; 0.5; 1; 2), \mu_{\Delta}^2(x; 1; 2; 2.5), \mu_{\Delta}^3(x; 2.5; 3; 3)$
x_3	Trapezoidal	$\mu_{\Delta}^0(x; 0; 0; 0), \mu_{\Delta}^L(x; 0.5; 0.5; 5; 15), \mu_{\Delta}^E(x; 5; 15; 35; 45), \mu_{\Delta}^{Ex}(x; 35; 45; 60; 60)$
x_4	Triangular	$\mu_{\Delta}^0(x; 0; 0; 1), \mu_{\Delta}^1(x; 0; 1; 1)$
x_5	Triangular	$\mu_{\Delta}^0(x; 0; 0; 1), \mu_{\Delta}^1(x; 0; 1; 1)$
x_6	Triangular	$\mu_{\Delta}^0(x; 0; 0; 1), \mu_{\Delta}^1(x; 0; 1; 1)$
x_7	Trapezoidal	$\mu_{\Delta}^S(x; 0; 0; 0.5; 1.5), \mu_{\Delta}^M(x; 0.5; 1.5; 2.5; 3.5), \mu_{\Delta}^S(x; 2.5; 3.5; 5; 5)$
x_8	Trapezoidal	$\mu_{\Delta}^S(x; 0; 0; 0.1), \mu_{\Delta}^P(x; 0; 0.1; 0.35; 0.45), \mu_{\Delta}^E(x; 0.35; 0.45; 0.95; 1.05), \mu_{\Delta}^{Ex}(x; 0.95; 1.05; 1.05; 1.05)$

Table 3 continuation

Designation of the linguistic variables	Membership function type	Mathematical description (upper index designate the corresponding term)
x_9	Trapezoidal	$\mu_{\Delta}^S(x; 0; 0; 0.1), \mu_{\Delta}^M(x; 0; 0.1; 0.95; 1.05), \mu_{\Delta}^E(x; 0.95; 1.05; 2; 2)$
x_{10}	Trapezoidal	$\mu_{\Delta}^S(x; 0; 0; 0.5; 1.5), \mu_{\Delta}^M(x; 0.5; 1.5; 2.5; 3.5), \mu_{\Delta}^L(x; 2.5; 3.5; 4; 4)$
x_{11}	Trapezoidal	$\mu_{\Delta}^S(x; 0; 0; 0.0005; 0.0015), \mu_{\Delta}^P(x; 0.0005; 0.0015; 0.0035; 0.0045), \mu_{\Delta}^E(x; 0.0035; 0.0045; 0.0195; 0.0205), \mu_{\Delta}^{Ex}(x; 0.0195; 0.0205; 0.021; 0.021)$
x_{12}	Triangular	$\mu_{\Delta}^1(x; 0.5; 1; 2), \mu_{\Delta}^2(x; 1; 2; 3), \mu_{\Delta}^3(x; 2; 3; 3.5)$
x_{13}	Triangular	$\mu_{\Delta}^1(x; 0.5; 1; 2), \mu_{\Delta}^2(x; 1; 2; 3), \mu_{\Delta}^3(x; 2; 3; 3.5)$
x_{14}	Triangular	$\mu_{\Delta}^0(x; 0; 0; 1), \mu_{\Delta}^1(x; 0; 1; 1)$
y_1	Triangular	$\mu_{\Delta}^1(x; 0.5; 1; 2), \mu_{\Delta}^2(x; 1; 2; 3), \mu_{\Delta}^3(x; 2; 3; 3.5)$
y_2	Triangular	$\mu_{\Delta}^1(x; 0.5; 1; 2), \mu_{\Delta}^2(x; 1; 2; 3), \mu_{\Delta}^3(x; 2; 3; 3.5)$
y_3	Triangular	$\mu_{\Delta}^1(x; 0.5; 1; 2), \mu_{\Delta}^2(x; 1; 2; 3), \mu_{\Delta}^3(x; 2; 3; 3.5)$

Step 2: Setting Fuzzy Rules following Table 4. The base of the Rules of the Fuzzy production model is defined as a structure with an appropriate member of inputs x_i and one output y_i (see Figure 3) following the logic relationships.

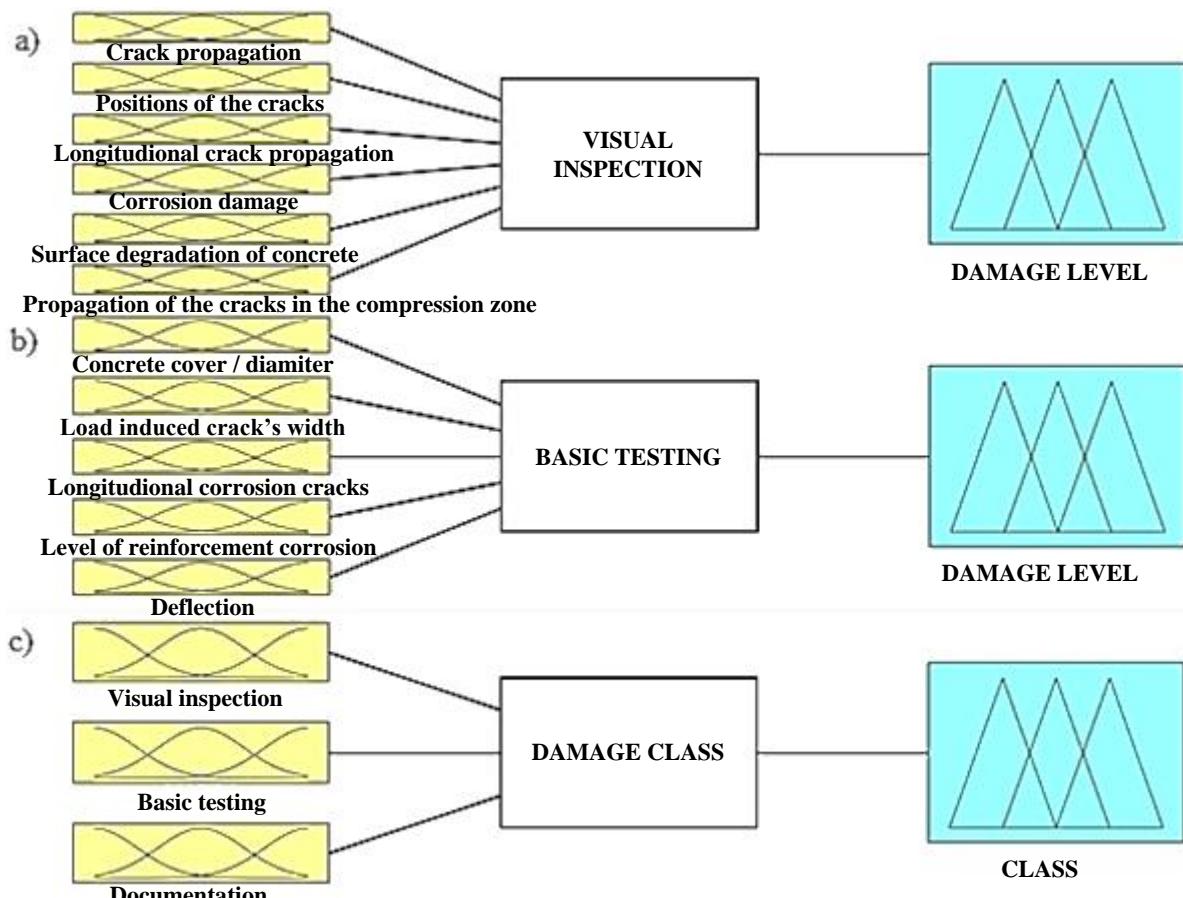


Figure 3 – The «black boxes» for the Visual Inspection (a), the Basic Testing (b), the Damage Class or Phase A (c)

Table 4 – Example of the Fuzzy Rules of the production model

Rule number	Antecedent	Consequent
The base of the rules R1		
R1.1	$(x_1 = 0 \wedge x_2 = 0 \wedge x_3 = 0 \wedge x_4 = 0 \wedge x_5 = 1 \wedge x_6 = 0) \vee$	$y_1 = 3$
	$(x_1 = 0 \wedge x_2 = 0 \wedge x_3 = 0 \wedge x_4 = 1 \wedge x_5 = 1 \wedge x_6 = 0) \vee$	
	$(x_1 = E \wedge x_2 = 1 \wedge x_3 = 0 \wedge x_4 = 0 \wedge x_5 = 0 \wedge x_6 = 0) \vee$	
	$(x_1 = E \wedge x_2 = 2 \wedge x_3 = 0 \wedge x_4 = 0 \wedge x_5 = 0 \wedge x_6 = 0) \vee$	
	$(x_1 = E \wedge x_2 = 1 \wedge x_3 = 0 \wedge x_4 = 0 \wedge x_5 = 1 \wedge x_6 = 0) \vee$	
	$(x_1 = E \wedge x_2 = 2 \wedge x_3 = 0 \wedge x_4 = 0 \wedge x_5 = 1 \wedge x_6 = 0) \vee$	
	$(x_1 = E \wedge x_2 = 3 \wedge x_3 = 0 \wedge x_4 = 0 \wedge x_5 = 0 \wedge x_6 = 0) \vee$	
	$(x_1 = E \wedge x_2 = 3 \wedge x_3 = 0 \wedge x_4 = 0 \wedge x_5 = 1 \wedge x_6 = 0)$	
<...>		
R3.3	$(x_{12} = 2 \wedge x_{13} = 1 \wedge x_{14} = 0) \vee$	$y_3 = 3$
	$(x_{12} = 1 \wedge x_{13} = 2 \wedge x_{14} = 0) \vee$	
	$(x_{12} = 1 \wedge x_{13} = 1 \wedge x_{14} = 1) \vee$	
	$(x_{12} = 1 \wedge x_{13} = 1 \wedge x_{14} = 0)$	

Step 3: Aggregation is the process by which the fuzzy set that represents the outputs of each rule are combined into a single fuzzy set. A rule premise, in general, is a compound fuzzy proposition. Aggregation only occurs once for each output variable, which is before the final defuzzification step. According to the original proposal of Zadeh for aggregation of the confidence, level of assumption min-conjunction is used:

$$\alpha_i = \min \{\mu_{A_{i1}}(x_1), \mu_{A_{i2}}(x_2), \mu_{A_{i3}}(x_3), \mu_{A_{i4}}(x_4)\}, i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

Step 4: Activation. A fuzzy “IF-THEN” rule is a connection of two (compound) fuzzy propositions. Hence, this connective has to be interpreted within the framework of set-theoretic or logical operators. The simplest interpretation is that of the conjunction of premise and conclusion, such that the appropriate operation is the minimum:

$$\mu_{B'_i}(y) = \min \{\alpha_i, \mu_{B_i}(y)\}, i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

Step 5: Accumulation. Usually, a rule base is interpreted as a disjunction of rules, i.e. rules are seen as independent “experts”. Accumulation has the task to combine the individual «expert statements», which are fuzzy sets of recommended output values. Consequently, an appropriate accumulation operation is the maximum:

$$\mu_{B'}(y) = \max \{\mu_{B'_1}(y), \mu_{B'_2}(y), \dots, \mu_{B'_n}(y)\} \quad (3)$$

Step 6: Defuzzification – from a fuzzy decision to real decision. As inference results in a fuzzy set, the task of defuzzification is to find the numerical value, which “best” comprehends the information contained in this fuzzy set. A frequently used method is the so-called Center-of-Gravity defuzzification.

According to [3] a nested fuzzy algorithm manages the whole phase: starting from the assessment of the single structural elements, and progressively proceeding through the structural hierarchy (element/storey/building), input data are processed and collated in order to obtain the new Phase – assessment of the whole building. It is worth remarking that part of the results provided by the preliminary investigation could be used also at this stage.

The starting point, as it has pointed out in numerous publications [3, 8], is the availability of an inventory of data and information derived from the investigation on the analyzed building, the collecting and organization of which is performed by using the survey diagnostic forms.

The form (see Table 5) to be used in Phase A of Diagnostic Protocol should trivially contain all the fields required as an input by the algorithm, organized in such a way to permit the correct implementation of the software.

For each of the diagnostic phases (see Table 5), a set of sequential operation is performed: at each step data are recorded in the program, fuzzified and then processed to obtain an intermediate output. At the end of the chain, the combination of the partial results provides the safety assessment, in the form of qualitative judgement, together with a numerical score.

According to the protocol outlined above (see Table 5), the fuzzy algorithm manages the assessment of the damage, in general, in two consecutive phases: Preliminary Investigation – Phase A and In-depth Investigation – Phase B. For each of them, a properly chosen set of data and information is collected and processed for the formulation of the synthetic final assessment.

In Figure 3, the scheme of the two “black boxes” is shown: the input data, represented by scores of the individual observations and testing, are processed through the fuzzy rules, providing the value of the damage. At this point, the judgment of the Visual Inspection and Basic Testing are combined with results derived from the evaluation of the general features of the structure (as it was shown in [3], this step is performed with no fuzzification).

The diagnosis about building, concerning the Phase A is eventually obtained from these three (two) partial scores (see Figure 3) and is once again expressed with a coefficient varying in the interval 1-10 according to [3].

The example of the assessment of the existing building with load-bearing precast concrete elements and masonry walls are presented in Table 5.

Table 5 – The Diagnostic Protocol Example

Phase A: Visual Inspection (A-1)					
Structural Member	Precast beam				
General Description	T-section with height 450 mm, web width 120 mm, flange width 200 mm and with 6 m span				
Propagation of the flexural (bending)/shear cracks, x_1	Parameter: propagation length of the damaged linear size, [%] span length				
	no	single	numerous	massive	
	0	0.5-10	10-40	>40	
<i>Inspection results</i>			35%		
Position of the flexural (bending)/shear cracks, x_2	Parameter: position in a span				
	no	mid-span	not sure	near support	mid-span+near support
	0	1	1.5	2	3
<i>Inspection results</i>					v
Propagation of the longitudinal corrosion cracks, x_3	Parameter: propagation length, [%] span length				
	no	local	partial	solid	
	0	0.5-10	10-40	>40	
<i>Inspection results</i>	v				
Corrosion damage (deterioration), x_4	Parameter: damage appearance				
	no	not sure	yes		
	0	0.5	1		
<i>Inspection results</i>				v	
Surface degradation of concrete (deterioration), x_5	Parameter: damage appearance				
	no	not sure	yes		
	0	0.5	1		
<i>Inspection results</i>				v	
Propagation of the longitudinal corrosion cracks in the compression zone of the section, x_6	Parameter: damage				
	no	not sure	yes		
	0	0.5	1		
<i>Inspection results</i>	v				
Damage Level	1 (critical)				

Table 5 continuation

Phase A: Basic Testing (A-2)						
Characteristic of the Structure	Parameters					
	Length, l [mm]		6000			
	Height, h [mm]		450			
	Concrete cover, c [mm]		22			
	Diameter of steel bar, \varnothing , [mm]		22			
Concrete						
Ratio c/\varnothing (concrete cover/diameter), x_7	Parameter: c/\varnothing					
	small		mean	large		
	<1		1-3	>3		
Inspection results						
Flexural (bending) cracks, x_8	Parameter: crack width, w_k					
	small		permissible	exceeded		
	no more 0.05 mm		from 0.05 to 0.4 mm	from 0.4 to 1 mm		
Inspection results						
Longitudinal corrosion crack, x_9	Parameter: corrosion crack width, w_l					
	small		medium	large		
	no more 0.05 mm		from 0.05 to 1 mm	more 1 mm		
Inspection results						
Reinforcement (steel)						
Level of the corrosion damage, x_{10}	Parameter: loss of the mass					
	small		mean	large		
	no more 1 %		from 1 to 3 %	more 3%		
Inspection results						
Deflections, deformations						
Deflections, x_{11}	Parameter: relative deflection					
	small		permissible	exceeded		
	no more 1/900		from 1/900 to 1/250	from 1/250 to 1/50		
Inspection results						
Damage Level	1 (critical)					
Documentation	no		partially	yes		
	0		from 0 to 1	1		
	v					
Damage Class	3 (severe damage)					

The results of the assessment of building under examination comply with the estimation formulated by the highly qualified experts.

Conclusions

1. An effective structural assessment expert system for evaluation of the existing reinforced concrete structural systems using Fuzzy Logic MatLab Toolbox was developed and verified on the real objects in this study.
2. Although the presented expert system based on close visual inspections and simple measurements, it may provide substantial assistance to more complicated work (for example, evaluation of existing structures based on detailed investigations).

REFERENCES

1. ISO 13822:2010 Bases for Design of Structures – Assessment of Existing Structures. Geneva. International Organization for Standardization. 44 p.
2. ISO 2394:2015 Reliability of Construction Structures. Geneva. International Organization for Standardization. 111 p.
3. Mezzina, M., Uva, G., Greco, R. Decisional trees and fuzzy logic in the structural safety assessment of damaged R.C. buildings. 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver. 2004. Pp. 149–159.

4. JRS, 2015 Scientific and Policy Report (N1247) New European Technical rules for the Assessment and Retrofitting of Existing Structures. Part III: Prospect for CEN Guidance. 125 p.
5. Carbone, V.I., Mancini, G., Tondolo, F. Structural safety evaluation by means of fuzzy-probabilistic approach. Proceedings of the 29th Conference on Our World in Concrete & Structures, Singapore. 2004. Pp. 29–37.
6. Zadeh, L.A. Fuzzy sets. *Information and Control*. 1965. Vol. 8. No. 3. Pp. 338–353.
7. Badiru, A., Cheung, J. Fuzzy engineering expert systems with neural network applications. John Wiley&Sons, New York. 2002. 291 p.
8. Khader, M. Hamdia Expert system for structural evaluation of reinforced concrete buildings in Gaza Strip using Fuzzy Logic. Master thesis, Islamic University of Gaza, Gaza Strip. 2010. 92 p.
9. Chen, L.H. Fuzzy regression models using the least-squares method based on the concept of distance. *Fuzzy Systems*. 2009. Vol. 17. Pp. 1259–1272.
10. Ross, T.J. Fuzzy logic with engineering applications. John Wiley&Sons, New York. 2004. 607 p.
11. Weng, T.-L. A risk assessment model for buildings of reinforced concrete containing high concentrations of chloride ions. *Journal of Marine Science and Technology*. 2016. 23(5). Pp. 1016–1025.
12. Mamdani, E.H., Assilian, S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man-Machine Studies*. 1975. Vol. 7. No. 1. Pp. 1–13.
13. Choi, B.I., Rhee, C.H. Interval type-2 fuzzy membership function generation methods for pattern recognition. *Information Sciences*. 2009. Vol. 179. Pp. 2102–2122.
14. Lundgren, K., Kettil, P., Hanjari, K.Z., Schlune, H., San Roman, A.S. Analytical model for the bond-slip behaviour of corroded ribbed reinforcement. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2012. Vol. 8. No. 2. Pp. 157–169.
15. Mak, M.W.T., Desnerck, P., Lees, J.M. Corrosion-induced cracking and bond strength in reinforced concrete. *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 208. Pp. 228–241.
16. Jamali, A., Angst, U., Adey, B., Elsener, B. Modeling of corrosion-induced concrete cover cracking: A critical analysis. *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 42. Pp. 225–237.
17. Coccia, S., Imperatore, S., Rinaldi, Z. Influence of corrosion on the bond strength of steel rebars in concrete. *Materials and Structures*. 2016. 49 (1-2). Pp. 537–551.
18. Andrade, C., Cesetti, A., Mancini, G., Tondolo, F. Estimating corrosion attack in reinforced concrete by means of crack opening. *Structural Concrete*. 2016. 17 (4). Pp. 533–540.
19. fib Model Code for Concrete Structures 2010 / CEB-FIP Committee. Lausanne, 2013. 402 p.
20. Tur, V.V., Yalavaya, Y.S. Influence of the reinforcing bar corrosion level on the flexural crack's width in the existing structure. *Modern Engineering*. 2019. Vol. 1. Pp. 1–9.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ISO 13822:2010 Bases for Design of Structures – Assessment of Existing Structures. Geneva. International Organization for Standardization. 44 p.
2. ISO 2394:2015 Reliability of Construction Structures. Geneva. International Organization for Standardization. 111 p.
3. Mezzina M., Uva G., Greco R. Decisional trees and fuzzy logic in the structural safety assessment of damaged RC buildings // 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver. 2004. Pp. 149–159.
4. JRS, 2015 Scientific and Policy Report (N1247) New European Technical rules for the Assessment and Retrofitting of Existing Structures. Part III: Prospect for CEN Guidance. 125 p.
5. Carbone V.I., Mancini G., Tondolo F. Structural safety evaluation by means of fuzzy-probabilistic approach // Proceedings of the 29th Conference on Our World in Concrete & Structures, Singapore. 2004. Pp. 29–37.
6. Zadeh L.A. Fuzzy sets // Information and Control. 1965. Vol. 8. No. 3. Pp. 338–353.
7. Badiru A., Cheung J. Fuzzy engineering expert systems with neural network applications. John Wiley&Sons, New York. 2002. 291 p.
8. Khader M. Hamdia Expert system for structural evaluation of reinforced concrete buildings in Gaza Strip using Fuzzy Logic. Master thesis, Islamic University of Gaza, Gaza Strip. 2010. 92 p.
9. Chen, L.H. Fuzzy regression models using the least-squares method based on the concept of distance // *Fuzzy Systems*. 2009. Vol. 17. Pp. 1259–1272.
10. Ross T.J. Fuzzy logic with engineering applications. John Wiley&Sons, New York. 2004. 607 p.
11. Weng T.-L. A risk assessment model for buildings of reinforced concrete containing high concentrations of chloride ions // *Journal of Marine Science and Technology*. 2016. 23(5). Pp. 1016–1025.
12. Mamdani, E.H., Assilian, S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller // *International Journal of Man-Machine Studies*. 1975. Vol. 7. No. 1. Pp. 1–13.
13. Choi, B.I., Rhee, C.H. Interval type-2 fuzzy membership function generation methods for pattern recognition // *Information Sciences*. 2009. Vol. 179. Pp. 2102–2122.

14. Lundgren K., Kettil P., Hanjari K.Z., Schlune H., San Roman A.S. Analytical model for the bond-slip behaviour of corroded ribbed reinforcement // Structure and Infrastructure Engineering. 2012. Vol. 8. No. 2. Pp. 157–169.
15. Mak M.W.T., Desnerck P., Lees J.M. Corrosion-induced cracking and bond strength in reinforced concrete // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 208. Pp. 228–241.
16. Jamali A., Angst U., Adey B., Elsener B. Modeling of corrosion-induced concrete cover cracking: A critical analysis // Construction and Building Materials. 2013. Vol. 42. Pp. 225–237.
17. Coccia S., Imperatore S., Rinaldi Z. Influence of corrosion on the bond strength of steel rebars in concrete // Materials and Structures. 2016. 49 (1-2). Pp. 537–551.
18. Andrade, C., Cesetti, A., Mancini, G., Tondolo, F. Estimating corrosion attack in reinforced concrete by means of crack opening // Structural Concrete. 2016. 17 (4). Pp. 533–540.
19. fib Model Code for Concrete Structures 2010 / CEB-FIP Committee. Lausanne, 2013. 402 p.
20. Tur V.V., Yalavaya Y.S. Influence of the reinforcing bar corrosion level on the flexural crack's width in the existing structure // Modern Engineering. 2019. Vol. 1. Pp. 1–9.

Information about authors:

Tur Viktar V.

Brest State Technical University, Brest, Belarus,
doctor in tech. sc., prof., head of department of concrete technology and building materials
E-mail: tur.s320@mail.ru

Yalavaya Yuliya S.

Brest State Technical University, Brest, Belarus,
senior lecturer of the department of economics and construction organization
E-mail: jul4onka@mail.ru

Информация об авторах:

Тур Виктор Владимирович

Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь,
доктор техн. наук, проф., заведующий кафедрой технологии бетона и строительных материалов
E-mail: tur.s320@mail.ru

Яловая Юлия Сергеевна

Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь,
старший преподаватель кафедры экономики и организации строительства
E-mail: jul4onka@mail.ru

НАДЕЖНОСТЬ БУРОИНЬЕКЦИОННОЙ СВАИ С УШИРЕНИЕМ ПО КРИТЕРИЮ ОСАДКИ

СОЛОВЬЕВ С.А., УТКИН В.С.

Вологодский государственный университет, Вологда, Россия

Аннотация. В работе представлены методы расчетов надежности буроинъекционных свай с уширением по критерию осадки. В представленных методах расчетов надежности учитывается ограниченность статистической информации о контролируемых параметрах в расчетных математических моделях предельных состояний, что повышает их практическую значимость (требуется меньшее количество контрольных образцов грунта для испытаний), но снижает информативность полученного результата. Также в работе приведены методы расчетов надежности сваи при наличии полной статистической информации для отдельных параметров, повышающих информативность результатов расчетов надежности. В статье рассмотрены числовые примеры расчета надежности буроинъекционной сваи с уширением на нижнем конце. Работа направлена на выполнение требований Закона РФ №384-ФЗ и Межгосударственного стандарта ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований» при проектировании и обследовании свайных оснований с буроинъекционными сваями.

Ключевые слова: осадка, буроинъекционная свая, надежность, теория нечетких множеств, уширение сваи, интервал надежности

RELIABILITY ANALYSIS OF CFA PILES WITH UNDER-REAM ON SETTLEMENT

SOLOVYEV S.A., UTKIN V.S.

Vologda State University, Vologda, Russia

Abstract. The article presents the methods for reliability analysis of CFA (Continuous flight augering) piles with under-ream on settlement criterion. The presented methods of reliability analysis take into account the limited statistical information about the controlled parameters in the design mathematical models of limit states. That increases their practical significance (fewer control soil samples are required for testing), but reduces the informativeness of the reliability analysis results. The paper also presents methods for reliability analysis of CFA piles in the presence of complete (full) statistical information for individual parameters that increase the informativeness of the reliability analysis results. The article deals with numerical examples of reliability analysis for CFA piles with under-ream at the lower end. The paper is aimed at fulfilling the requirements of Russian Federal Law No. 384-FZ and Interstate standard GOST 27751-2014 "Reliability of structures and foundations" for the design and inspection of pile foundation with CFA piles.

Keywords: settlement, CFA pile, reliability, fuzzy set theory, pile under-ream, confidence interval

Введение

Свайные фундаменты с буроинъекционными сваями используются в качестве конструктивных решений для строительных объектов на сравнительно слабых грунтах и при усилении фундаментов зданий и сооружений. От надежности свай и свайного фундамента в целом зависит надежность всего строительного объекта. Основное назначение свай заключается в использовании несущей способности грунтов оснований на большой глубине при меньшем расходе материалов в фундаментах и передаче действующей нагрузки на нижележащие слои грунта, как правило, обладающих более высокой механической прочностью.

В соответствии с требованиями Закона РФ №384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений», несущие элементы строительных конструкций должны отвечать требованиям механической (конструкционной) безопасности. Количественной мерой надежности (безопасности эксплуатации) может служить значение вероятности безотказной работы.

В соответствии с Межгосударственным стандартом ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований» под понятием надежности строительного объекта понимается его способность «выполнять требуемые функции в течение расчетного срока эксплуатации». Надежность строительного объекта определяется через надежность каждого несущего элемента объекта с учетом их взаимодействия. Для этого объект рассматривается в виде совокупности элементов, которые образуют системы с последовательным, параллельным и смешанным соединением элементов систем [1, 2, 3 и др.]. Свая может рассматриваться как условный элемент системы, состоящий также из элементов – критериев ее работоспособности. Расчет надежности одиночной сваи является необходимым условием для расчета надежности свайного основания фундамента как системы, состоящей из свай, ростверка и тела фундамента.

По ГОСТ 27751-2014 для расчетов надежности рекомендуется применять вероятностно-статистические методы расчетов, для которых необходима полная статистическая информация о контролируемых параметрах. На практике расчетов надежности несущих элементов конструкций, в том числе буроинъекционных свай (и тем более одной сваи), зачастую не удается получить требуемую согласно ГОСТ 27751-2014 по объему статистическую информацию о контролируемых параметрах для математической модели предельного состояния по всем критериям работоспособности, в т.ч. по осадке. В связи с этим, нашли свое применение альтернативные методы расчетов надежности [4, 5, 6 и др.], которые дают менее информативный результат расчета надежности для систем с ограниченной по объему статистической информацией. Эти методы построены на новых теориях математического анализа, которые и будут использованы в предлагаемых в статье методах расчетов надежности буроинъекционных свай с уширением. В качестве методов расчета будут рассмотрены методы на основе теории нечетких множеств и комбинированные методы, построенные на возможностных и вероятностных распределениях случайных величин.

Вопросы расчетов надежности свай по осадке и перемещениям (линейным и угловым) при полной статистической информации рассмотрены в работах отечественных и зарубежных авторов [7-10]. Данные методы построены на основе положений теории вероятностей и математической статистики. Использование таких подходов на практике зачастую ограничено вследствие неполноты статистической информации, а в случае игнорирования этих условий, могут привести к ошибочным результатам расчета надежности.

В работе [11] описывается процесс пересмотра норм проектирования свайных фундаментов в Китае на основе положений теории надежности. В [12] рассматривается подход к прогнозированию осадки сваи на основе положений теории вероятностей. Вероятностный анализ работы группы свай с учетом жесткости сооружения и пространственной изменчивости грунта рассмотрен в [13].

В данной работе рассмотрен расчет надежности буроинъекционной сваи с уширением (расчетная схема представлена на рис. 1 по критерию осадки сваи при ограниченной статистической информации о значениях осадки s).

Математическую модель предельного состояния для расчета надежности сваи с уширением по критерию осадки можно записать в виде (где волнистыми линиями обозначены случайные величины):

$$\tilde{s} \leq s_u, \quad (1)$$

где \tilde{s} – осадка сваи от расчетной эксплуатационной нагрузки (случайная величина); s_u - предельная допустимая осадка сваи (детерминированная величина).

В соответствии с СП 24.13330.2011 «Свайные фундаменты», п. 7.4.2, расчет осадки одиночной висячей сваи с уширением на нижнем конце проводится по формуле:

$$s = \frac{0,22N}{G_2 d_b} + \frac{Nl}{EA}, \quad (2)$$

где N - вертикальная эксплуатационная нагрузка на сваю; l - длина сваи; G_2 - модуль сдвига грунта; d_b - диаметр уширения сваи; E - модуль упругости материала ствола сваи; A - площадь поперечного сечения ствола сваи.

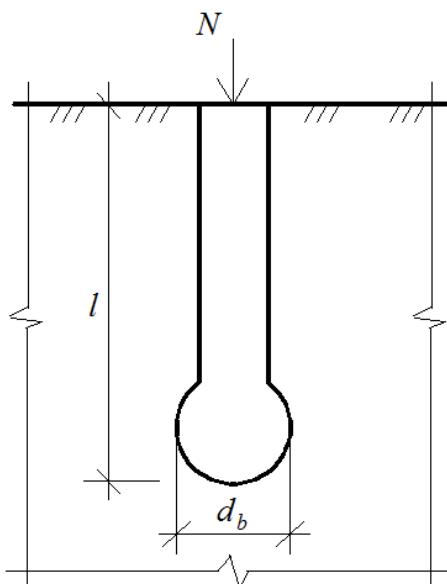


Рисунок 1 – Расчетная схема буроинъекционной сваи с уширением
 N – нагрузка на сваю; db – диаметр уширения; l – длина сваи

В других исследованиях содержатся другие предложения для второго слагаемого в (2). Так в [14] предлагается рассчитывать осадку верхнего конца сваи от укорочения ствола сваи по формуле: $s = \frac{2Nl}{5EA}$. В [15] приведено значение $s = \frac{Nl}{2EA}$. В общем виде второе слагаемое в (2) можно записать как $k \frac{Nl}{EA}$, где $k=1$ в соответствии с СП 24.13330.2011. При необходимости расчета осадки по другим формулам, дальнейший расчет может быть легко перестроен с помощью коэффициента k .

Предельное допустимое значение осадки принимается по приложению Г СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений». Например, для промышленных и гражданских зданий с полным железобетонным каркасом максимально допустимая осадка $s_u=100$ мм.

Модели и методы

Вертикальная эксплуатационная нагрузка N и модуль сдвига грунта G_2 определяются по результатам измерений и испытаний и являются случайными величинами. Параметры l , d_b и A определяются по результатам измерений и в (2) являются детерминированными (по-

стоянными) величинами в силу их малой изменчивости при измерениях. Примем для первого варианта расчета надежности свай модуль упругости материала свай E детерминированной величиной. Математическую модель (1) с учетом (2) можно записать в виде:

$$\tilde{N} \left(\frac{0,22}{\tilde{G}_2 d_b} + \frac{l}{EA} \right) \leq s_u. \quad (3)$$

Рассмотрим расчет надежности свай по критерию (3) возможностным методом, принимая \tilde{N} и \tilde{G}_2 нечеткими переменными [16].

Введем в (3) принятые в теории возможностей [16] обозначения $\tilde{N} = X$, $\left(\frac{0,22}{\tilde{G}_2 d_b} + \frac{l}{EA} \right) = Y$. Тогда математическую модель предельного состояния (3) можно записать в виде:

$$X \cdot Y \leq s_u. \quad (4)$$

Т.к. число измерений параметров X и Y в (4) для одной или нескольких пробных свай на практике ограничено, будем использовать для расчета надежности свай по критерию осадки положения теории нечетких множеств [17]. Примем по [5] для описания нечетких переменных X и Y функцию распределения возможностей с аналитическим видом:

$$\pi_X(x) = \exp \left[- \left(\frac{x - a_x}{b_x} \right)^2 \right], \quad (5)$$

где $a_x = 0,5 \cdot (X_{\max} + X_{\min})$ – «условное среднее»; $b_x = 0,5(X_{\max} - X_{\min}) / \sqrt{-\ln \alpha}$ – мера «рассеяния», где X_{\max} и X_{\min} – наибольшее и наименьшее значение во множестве значений $\{x\}$ нечеткой переменной X , полученных из результатов измерений; $\alpha \in [0;1]$ – уровень среза (риска), значением которого задаются, например, по рекомендациям, приведенным в [18]. Обратную функцию от $\pi_X(x)$ найдем из (5) в виде $x = a_x \pm b_x \sqrt{-\ln \alpha}$ или $x = a_x \pm b_x \beta$, где $\beta = \sqrt{-\ln \alpha}$. Аналогичные выражения, характеризующие функцию (5), будут и для нечеткой переменной Y .

Графический вид функции распределения возможностей (5) представлен на рис. 2, где область всех возможных функций распределения ограничена функциями $F_X(x)$ и $\bar{F}_X(x)$ (нижней и верхней функцией распределения возможностей).

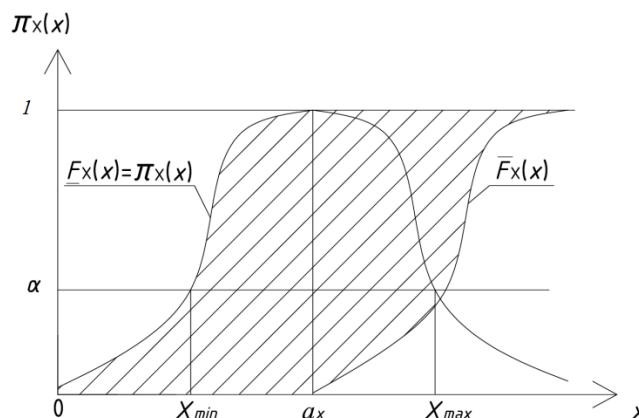


Рисунок 2 – Область графиков функций распределения возможностей $\pi_X(x)$

Расчет надежности по математической модели (4) проведем с использованием принципа обобщения Л. Заде из теории нечетких множеств [17]. Формируем из (4) нечеткую переменную T как функцию от нечетких аргументов X, Y в виде:

$$T = XY \leq s_u. \quad (6)$$

Графический вид функции $\pi_T(t)$ неизвестен, но она характеризуется значениями a_t, b_t, α , по аналогии с $\pi_X(x)$. Условная «средняя» a_t для функции T определяется по (6) в виде $a_t = a_x a_y$, с левой ветвью $t \leq a_t$ и правой ветвью $t > a_t$ функции $\pi_T(t)$, а обратная функция t от T будет определяться через обратные функции x, y от X, Y , которые имеют вид обратной функции x от $\pi_X(x)$, описанной выше. Для левой и правой ветвей функции $\pi_T(t)$ имеем:

$$t_{лев} = (a_x - b_x \beta)(a_x + b_x \beta) \leq s_u, \quad (7)$$

$$t_{np} = (a_x + b_x \beta)(a_y + b_y \beta) \leq s_u, \quad (8)$$

где $\beta = \sqrt{-\ln \pi_T(t)} = \sqrt{-\ln \alpha_*}$. Перед « b » в $t_{лев}$ ставят знак минус в числителе, если от этой величины значение левой ветви в (7) возрастает, а в (8) наоборот. При $t = a_t$ имеем $\pi_T(t) = 0$ или $\beta = 0$. По (8) при выполнении $a_t \leq s_u$ значение возможности безотказной работы балки принимается $R=1$. Возможность отказа Q (для правой ветви функции $\pi_T(t)$) найдем по значению β , полученного из (8) при $t_{np} = s_u$, которое соответствует наименьшей расчетной надежности. По результатам решения (8), при $t_{np} = s_u$ находят β_{min} по абсолютному значению и возможность отказа $Q = \exp(-\beta_{min}^2)$. В [] нечеткая переменная характеризуется мерами возможности R и необходимости N . В понятиях надежности, необходимость N безотказной работы свай равна $N=1-Q$. Надежность как мера безопасности характеризуется интервалом $[N; R]$ или в вероятностных показателях $[\underline{P}; \bar{P}]$, где \underline{P} и \bar{P} – нижнее и верхнее значение вероятности безотказной работы.

Пример 1. Дано: $d_b = 0,5$ м, $l = 6$ м, $A = 0,071$ м², $E = 30 \cdot 10^3$ МПа, $\tilde{N} = X = \{1,9; 2,1; 2,0\}$ МН; $\tilde{G}_2 = \{10,1; 9,9; 10,0\}$ МПа, тогда $Y = \{4,638; 4,726; 4,682\} \cdot 10^{-8}$ м/Н. Вычислим параметры функций распределения возможностей: $a_x = 2,0 \cdot 10^6$ Н; $b_x = 5,74 \cdot 10^4$ Н; $a_y = 4,682 \cdot 10^{-8}$ м/Н; $b_y = 2,544 \cdot 10^{-10}$ м/Н при уровне среза (риска) $\alpha = 0,05$. Т.к. $a_x a_y = 0,094 < s_u = 0,1$ м, то принимаем $R=1$. Из (8) при $t_{np} = s_u$ вычислим $\beta = \{-220,620; 1,963\}$. Соответственно $\beta_{min} = 1,963$. Тогда возможность отказа $Q = \exp(-\beta_{min}^2) = \exp(-1,963^2) = 0,0212$. Необходимость безотказной работы $N=1-Q=1-0,0212=0,979$. Надежность свай характеризуется интервалом $[0,979; 1]$.

Рассмотрим вариант, в котором модуль упругости материала ствола свай является нечеткой переменной. Математическая модель предельного состояния (3) примет вид:

$$\tilde{N} \left(\frac{0,22}{\tilde{G}_2 d_b} + \frac{l}{E A} \right) \leq s_u. \quad (9)$$

Введем обозначения: $\tilde{N} = X$, $\frac{0,22}{\tilde{G}_2 d_b} = Y$, $\frac{l}{\tilde{E} A} = Z$. Расчет надежности будем проводить также на основе принципа обобщения Л. Заде из теории нечетких множеств [17]. Формируем из (9) нечеткую переменную T как функцию от нечетких аргументов X, Y, Z в виде:

$$T = X(Y + Z) \leq s_u. \quad (10)$$

Условная «средняя» a_t определяется по (10) в виде $a_t = a_x(a_y + a_z)$, с левой ветвью $t \leq a_t$ и правой ветвью $t > a_t$ функции $\pi_T(t)$, а обратная функция t от T будет определяться через обратные функции x, y, z от X, Y, Z которые имеют вид обратной функции x от $\pi_X(x)$, описанной выше. Для левой и правой ветвей функции $\pi_T(t)$ имеем:

$$t_{лев} = (a_x - b_x \beta)(a_y - b_y \beta) + (a_z - b_z \beta) \leq s_u, \quad (11)$$

$$t_{np} = (a_x + b_x \beta)(a_y + b_y \beta) + (a_z + b_z \beta) \leq s_u. \quad (12)$$

По (10) при выполнении $a_t \leq s_u$ значение возможности безотказной работы балки принимается $R=1$. Возможность отказа Q (для правой ветви функции $\pi_T(t)$) найдем по значению β , полученного из (12) при $t_{np} = s_u$, которое соответствует наименьшей расчетной надежности. По результатам решения (12), при $t_{np} = s_u$ находят β_{min} по абсолютному значению и возможность отказа $Q = \exp(-\beta_{min}^2)$. Надежность также характеризуется интервалом $[N; R]$.

Пример 2. Воспользуемся данными примера 1: $d_b = 0,5$ м, $l = 6$ м, $A = 0,071$ м², $\tilde{N} = X = \{1,9; 2,1; 2,0\}$ МН; $\tilde{G}_2 = \{10,1; 9,9; 10,0\}$ МПа, $\tilde{E} = \{30,0; 28,4; 31,6\} \cdot 10^3$ МПа, $Y = \{4,400; 4,356; 4,444\} \cdot 10^{-8}$ м/Н, $Z = \{2,976; 2,735; 2,674\} \cdot 10^{-9}$ м/Н. Вычислим параметры функций распределения возможностей: : $a_x = 2,0 \cdot 10^6$ Н; $b_x = 5,74 \cdot 10^4$ Н; $a_y = 4,400 \cdot 10^{-8}$ м/Н; $b_y = 2,543 \cdot 10^{-10}$ м/Н; $a_z = 2,817 \cdot 10^{-9}$ м/Н; $b_z = 8,728 \cdot 10^{-11}$ м/Н при уровне среза (риска) $\alpha = 0,05$. Т.к. $a_x(a_y + a_z) = 0,094 < s_u = 0,1$ м, то принимаем $R=1$. Из () при $t_{np} = s_u$ вычислим $\beta = \{-173,518; 1,858\}$. Соответственно $\beta_{min} = 1,963$. Тогда возможность отказа $Q = \exp(-\beta_{min}^2) = \exp(-1,858^2) = 0,0317$. Необходимость безотказной работы $N=1-Q=1-0,0317=0,968$. Надежность свай характеризуется интервалом $[0,968; 1]$.

Результаты исследования и их анализ

Как видно из результатов расчетов в примере 1 и примере 2, с введением дополнительной нечеткой переменной интервал надежности становится шире, т.е. менее информативным, т.к. в расчет вносится дополнительная неопределенность.

Для оценки надежности свай по всем критериям работоспособности следует условно рассматривать сваю как механическую систему с последовательным соединением элементов. Надежность свай в целом по всем критериям работоспособности (несущей способности материала, несущей способности грунта основания, осадке) по [19] определяется по формулам:

$$\begin{cases} \underline{P} = \max \left(0, \sum_{i=1}^n \underline{P}_i - (n-1) \right), \\ \overline{P} = \min(\overline{P}_i) \end{cases}$$

где \underline{P}_i и \bar{P}_i - нижняя и верхняя граница вероятности безотказной работы свай по i -му критерию работоспособности; n – количество критериев работоспособности. В данной работе задача ограничена критерием осадки.

Если в модели (3) удается по некоторым параметрам получить полную статистическую информацию, то результат расчета надежности можно сделать более информативным с меньшей шириной интервала, применяя комбинированный метод расчета надежности [5], например, комбинацию функции распределения возможностей для нечетких переменных и функции распределения вероятностей для случайных величин. Представим математическую модель предельного состояния (3) в виде:

$$\left(\frac{0,22}{\tilde{G}_2 d_b} + \frac{l}{EA} \right) \leq \frac{s_u}{\tilde{N}}. \quad (13)$$

Введем обозначения $\left(\frac{0,22}{\tilde{G}_2 d_b} + \frac{l}{EA} \right) = X$, $\frac{s_u}{\tilde{N}} = Y$. Тогда (13) можно записать в виде:

$$X \leq Y, \quad (14)$$

где X – нечеткая переменная; Y – случайная величина.

Нижняя и верхняя граница вероятности безотказной работы в комбинированном методе расчета надежности по модели в общем случае записываются в виде:

$$\begin{cases} \underline{P} = \int_0^{a_x} \rho_Y(x) 0 dx + \int_{a_x}^{+\infty} \rho_Y(x) (1 - \pi_X(x)) dx; \\ \bar{P} = \int_0^{a_x} \rho_Y(x) \pi_X(x) dx + \int_{a_x}^{+\infty} \rho_Y(x) 1 dx, \end{cases} \quad (15)$$

где $\rho_Y(x)$ – плотность вероятности «прочности»; $\pi_X(x)$ – функция распределения возможностей для «нагрузки», как показано на рис. 3.

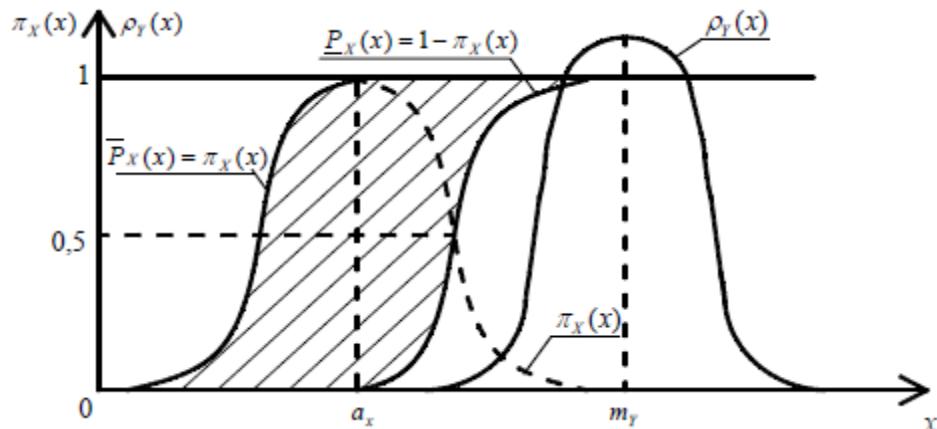


Рисунок 3 – Функция распределения возможностей $\pi_X(x)$ и ее границы для нечеткой переменной X и функция плотности вероятности $\rho_Y(x)$ нормального закона распределения для случайной величины Y

Если случайная величина Y описывается нормальным законом распределения, то в соответствии с [5] нижнюю и верхнюю границу вероятности отказа можно вычислить по формулам:

$$\left\{ \begin{array}{l} \underline{P} = \int_{a_x}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi} S_Y} \exp\left[-\frac{(x - m_Y)^2}{2S_Y^2}\right] \left[1 - \exp\left(-\left(\frac{x - a_x}{b_x}\right)^2\right)\right] dx; \\ \bar{P} = \int_0^{a_x} \frac{1}{\sqrt{2\pi} S_Y} \exp\left[-\frac{(x - m_Y)^2}{2S_Y^2}\right] \left[\exp\left(-\left(\frac{x - a_x}{b_x}\right)^2\right)\right] dx + \int_{a_x}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi} S_Y} \exp\left[-\frac{(x - m_Y)^2}{2S_Y^2}\right] dx, \end{array} \right. \quad (16)$$

где m_Y и S_Y – математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение случайной величины (прочности) $Y = \frac{s_u}{\tilde{N}}$.

Пример 3. Воспользуемся данными примера 1: $d_b = 0,5$ м, $l = 6$ м, $A = 0,071$ м², $E = 30 \cdot 10^3$ МПа, $\bar{N} = 2,0$ МН; $\tilde{G}_2 = \{10,1; 9,9; 10,0\}$ МПа, $s_u = 0,1$ м, тогда $X = \{4,638; 4,726; 4,682\} \cdot 10^{-8}$ м/Н. Вычислим параметры функций распределения: $a_x = 4,682 \cdot 10^{-8}$ м/Н; $b_x = 2,544 \cdot 10^{-10}$ м/Н при уровне среза (риска) $\alpha = 0,05$; $m_Y = 5 \cdot 10^{-8}$ м/Н; $S_Y = 2 \cdot 10^{-9}$ м/Н. Тогда по () вычислим нижнюю и верхнюю границу вероятности безотказной работы: $\underline{P} = 0,993$, $\bar{P} = 1$. Надежность характеризуется интервалом [0,993; 1], что информативнее интервала [0,979; 1] в примере 1.

Рассмотрим вариант расчета надежности комбинированным методом, в котором модуль упругости материала ствола свай является случайной величиной. Представим математическую модель предельного состояния (13) к виду:

$$\left(\frac{0,22}{\tilde{G}_2 d_b} + \frac{l}{\tilde{E} A} \right) \leq \frac{s_u}{\tilde{N}}. \quad (17)$$

Введем обозначения $\left(\frac{0,22}{\tilde{G}_2 d_b} \right) = X_1$, $\frac{l}{\tilde{E} A} = X_2$, $X = X_1 + X_2$, $\frac{s_u}{\tilde{N}} = Y$. Тогда (9) можно

записать в виде:

$$X = X_1 + X_2 \leq Y. \quad (18)$$

Выражение $X = X_1 + X_2$ представляет собой сумму нечетких переменных. Пример графической реализации суммы для наглядности с линейными функциями распределения возможностей нечетких переменных F_1 и F_2 представлен на рис. 4.

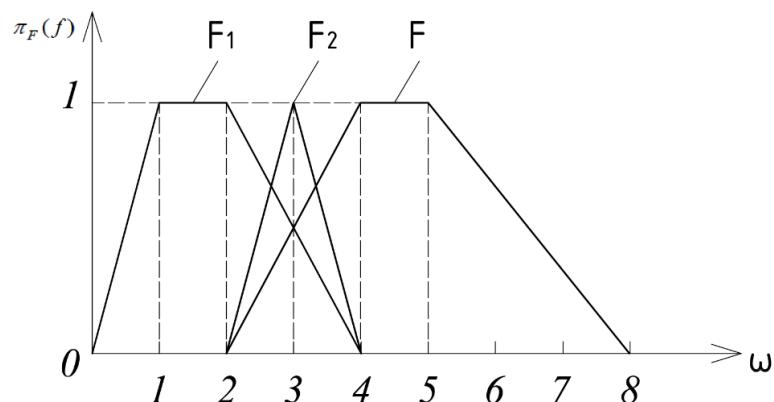


Рисунок 4 – Графическое представление суммы нечетких переменных $F = F_1 + F_2$
 $\pi_F(f)$ - функция распределения возможностей

В этом случае параметры функции распределения $\pi_X(x)$ определяются как $a_x = a_{x1} + a_{x2}$, $b_x = b_{x1} + b_{x2}$. Надежность по модели (18) вычисляется аналогично предыдущему примеру.

Пример 4. Воспользуемся данными примера 2: $d_b = 0,5$ м, $l = 6$ м, $A = 0,071$ м², $\bar{N} = 2,0$ МН; $\tilde{G}_2 = \{10,1; 9,9; 10,0\}$ МПа, $\tilde{E} = \{30,0; 28,4; 31,6\} \cdot 10^3$ МПа. Вычислим параметры функций распределения возможностей: $a_{x1} = 4,400 \cdot 10^{-8}$ м/Н; $b_{x1} = 2,543 \cdot 10^{-10}$ м/Н; $a_{x2} = 2,817 \cdot 10^{-9}$ м/Н; $b_{x2} = 8,728 \cdot 10^{-11}$ м/Н при уровне среза (риска) $\alpha = 0,05$. Тогда $a_x = a_{x1} + a_{x2} = 4,628$ м/Н, $b_x = b_{x1} + b_{x2} = 3,416 \cdot 10^{-10}$ м/Н. По примеру 3: $m_Y = 5 \cdot 10^{-8}$ м/Н; $S_Y = 2 \cdot 10^{-9}$ м/Н. Тогда по () вычислим нижнюю и верхнюю границу вероятности безотказной работы: $P = 0,990$, $\bar{P} = 1$. Надежность характеризуется интервалом [0,990; 1], что информативнее интервала [0,968; 1] в примере 2.

Выводы

1. Разработаны новые методы расчета надежности свай с уширением по осадке при различной по полноте статистической информации о контролируемых параметрах;
2. На числовых примерах расчета надежности проиллюстрированы алгоритмы расчетов надежности свай с уширением по критерию осадки при различных параметрах математической модели предельного состояния и различным методам расчета надежности;
3. На числовых примерах расчета надежности проиллюстрировано влияние количества нечетких переменных и влияние полноты статистической информации на интервал, характеризующий надежность свай;
4. Разработанные методы расчетов надежности могут быть использованы при оценке надежности условной механической системы «основание-здание-сооружение», а также для количественной оценки безопасности эксплуатации свайных фундаментов и включены в нормативную литературу по расчетам надежности буроинъекционных свай.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Райзер В.Д. Теория надежности сооружений. М.: АСВ, 2010. 384 с.
2. Лычев А.С. Надежность строительных конструкций. М.: Изд. АСВ, 2008. 188 с.
3. Fischer K., Vijoen C., Kohler J., Faber M.H. Optimal and acceptable reliabilities for structural design // Structural Safety. 2019. Vol. 76. pp. 149-161.
4. Уткин В.С. Расчет надежности висячих железобетонных свай в грунте основания // Строительная механика и расчет сооружений. 2018. № 1 (276). С. 31-36.
5. Уткин В.С., Уткин Л.В. Новые методы расчетов надежности строительных конструкций. Вологда: ВоГТУ, 2011. 98 с.
6. Уткин В.С., Соловьев С.А. Расчет надежности железобетонных балок по критерию прочности поперечной арматуры при образовании наклонных трещин // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2017. № 5. С. 34-42.
7. Ivanova, T.V., Albert I.U., Kaufman B.D., etc. The load-bearing capacity of hanging piles by the strength criterion of a pile or soil material // Magazine of Civil Engineering. 2016. No. 7 (67). pp. 3-12.
8. Альберт И.У., Д.А. Ивашинцов, С.Г. Шульман. Определение прогибов и углов поворота одиночной сваи с учетом случайного характера параметров системы свая - грунтовое основание // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. – 2017. Т. 286. С. 35-42.
9. Jiang C., Li T., Zhou K. Reliability analysis of piles constructed on slopes under laterally loading // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. Vol. 26. 2016. pp. 1955-1964.
10. Kozubal J., Pula W., Stach M. Reliability Assessment of a Single Pile in Unsaturated Substrate under Climate Factors Influence // Procedia Engineering. Vol. 91. 2014. pp. 310-316.
11. Li J. P., Zhang J., Liu S. N., Juang C. H. Reliability-based code revision for design of pile foundations: Practice in Shanghai, China // Soils and Foundations. 2015. Vol. 55. pp. 637-649.

12. Suzuki M., Ishii K. Parameter identification and probabilistic prediction of settlement of embankment. *Structural Safety*. 1994. No.14(1–2). pp. 47–59.
13. Leung Y.F., Lo M.K. Probabilistic assessment of pile group response considering superstructure stiffness and three-dimensional soil spatial variability // *Computers and Geotechnics*. 2018. Vol. 103. pp. 193-200.
14. Zhou Z., Wang D., Zhang L. Determination of large diameter bored pile's effective length based on Mindlin's solution // *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2015. Vol. 2. Issue 6. Pp. 422-428.
15. Уткин В.С. Новый метод расчета осадки висячей сваи в грунте основания фундамента // Вестник Вологодского государственного университета. 2018. №1. С. 86-90.
16. Dubois D., Prade H. Possibility theory. New York: Plenum Press. 1988. 411 p.
17. Zadeh L. Fuzzy Sets as the Basis for a Theory of Possibility // *Fuzzy Sets and Systems*. 1978. No. 1. pp. 3-28.
18. Уткин В.С., Соловьев С.А., Каберова А.А. Значение уровня среза (риска) при расчете надежности несущих элементов возможностным методом // Строительная механика и расчет сооружений. 2015. № 6. С. 63-67.
19. Гуров С.В., Уткин Л.В. Надежность систем при неполной информации. СПб: Любович, 1999. 166 с.

REFERENCES

1. Rajzer V.D. Teoriya nadezhnosti sooruzhenij [Theory of structural reliability]. Moscow: ASV, 2010. 384 p. (rus)
2. Lychev A.S. Nadezhnost' stroitel'nyh konstrukcij [Reliability of structures]. Moscow: Izd. ASV, 2008. 188 p. (rus)
3. Fischer K., Vijoen C., Kohler J., Faber M.H. Optimal and acceptable reliabilities for structural design. *Structural Safety*. 2019. Vol. 76. Pp. 149-161.
4. Utkin V.S. Raschet nadezhnosti visyachih zhelezobetonnyh svaj v grunte osnovaniya [Friction piles reliability analysis in soil base]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenij*. 2018. No. 1 (276). Pp. 31-36. (rus)
5. Utkin V.S., Utkin L.V. Novye metody raschetov nadezhnosti stroitel'nyh konstrukcij [New methods of structures reliability analysis]. Vologda: VoGTU, 2011. 98 p. (rus)
6. Utkin V.S., Solov'ev S.A. Raschet nadezhnosti zhelezobetonnyh balok po kriteriyu prochnosti poperechnoj armatury pri obrazovanii naklonnyh treshchin [Reliability analysis of reinforced concrete beams with shear chocks on shear bar strength]. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernyh konstrukcij i sooruzhenij*. 2017. No. 5. Pp. 34-42. (rus)
7. Ivanova, T.V., Albert I.U., Kaufman B.D., etc. The load-bearing capacity of hanging piles by the strength criterion of a pile or soil material. *Magazine of Civil Engineering*. 2016. No. 7 (67). Pp. 3-12.
8. Al'bert I.U., D.A. Ivashincov, S.G. SHul'man. Opredelenie progibov i uglov poverota odinochnoj svai s uchetom sluchajnogo haraktera parametrov sistemy svaya - gruntovoe osnovanie [Determination of deflections and angles of rotation of a single pile taking into account the random nature of the pile parameters of the pile - soil base]. *Izvestiya Vserossijskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrotehniki im. B.E. Vedeneeva*. 2017. Vol. 286. Pp. 35-42. (rus)
9. Jiang C., Li T., Zhou K. Reliability analysis of piles constructed on slopes under laterally loading. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. Vol. 26. 2016. Pp. 1955-1964.
10. Kozubal J., Pula W., Stach M. Reliability Assessment of a Single Pile in Unsaturated Substrate under Climate Factors Influence. *Procedia Engineering*. Vol. 91. 2014. Pp. 310-316.
11. Li J. P., Zhang J., Liu S. N., Juang C. H. Reliability-based code revision for design of pile foundations: Practice in Shanghai, China. *Soils and Foundations*. 2015. Vol. 55. pp. 637-649.
12. Suzuki M., Ishii K. Parameter identification and probabilistic prediction of settlement of embankment. *Structural Safety*. 1994. No.14(1–2). pp. 47–59.
13. Leung Y.F., Lo M.K. Probabilistic assessment of pile group response considering superstructure stiffness and three-dimensional soil spatial variability. *Computers and Geotechnics*. 2018. Vol. 103. Pp. 193-200.
14. Zhou Z., Wang D., Zhang L. Determination of large diameter bored pile's effective length based on Mindlin's solution. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2015. Vol. 2. Issue 6. Pp. 422-428.
15. Utkin V.S. Novyj metod rascheta osadki visyachej svai v grunte osnovaniya fundamenta [New method of settlement evaluation of friction pile in soil base]. *Vestnik Vologodskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2018. No. 1. Pp. 86-90. (rus)
16. Dubois D., Prade H. Possibility theory. New York: Plenum Press. 1988. 411 p.
17. Zadeh L. Fuzzy Sets as the Basis for a Theory of Possibility. *Fuzzy Sets and Systems*. 1978. No. 1. Pp. 3-28.

18. Utkin V.S., Solov'ev S.A., Kaberova A.A. Znachenie urovnya sreza (riska) pri raschete nadezhnosti nesushchih elementov vozmozhnostnym metodom [Value of risk level in reliability analysis of structural elements with probabilistic methods]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenij*. 2015. No. 6. Pp. 63-67. (rus)
19. Gurov S.V., Utkin L.V. Nadezhnost' sistem pri nepolnoj informacii [Systems reliability with limited information]. SPb: Lyubovich, 1999. 166 p. (rus)

Информация об авторах:

Соловьев Сергей Александрович

ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет», г. Вологда, Россия,
аспирант, старший преподаватель кафедры промышленного и гражданского строительства
E-mail: ser6sol@yandex.ru

Уткин Владимир Сергеевич

ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет», г. Вологда, Россия,
д.т.н., профессор, профессор кафедры промышленного и гражданского строительства
E-mail: utkinvogtu@mail.ru

Information about authors:

Solovev Sergey A.

Vologda State University, Vologda, Russia
post-graduate student, lecturer of industrial and civil engineering department
E-mail: ser6sol@yandex.ru

Utkin Vladimir S.

Vologda State University, Vologda, Russia
doct. in tech.sc., professor, professor of industrial and civil engineering department
E-mail: utkinvogtu@mail.ru

**СОЦИАЛЬНО-ПСИХОЛОГИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ
В ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОЙ ПОЛИТИКЕ НА ПРИМЕРЕ
ВОРОНЕЖСКОЙ АГЛОМЕРАЦИИ**

ГУРЬЕВА Е.И., ЯНЬШИНА Н.А.

Аннотация. Рассматриваются социально-психологические факторы, которые могут воздействовать на самочувствие человека при формировании устойчивого развития территорий Воронежской агломерации.

Обосновывается актуальность развития городских рекреационных пространств, приодомовых территорий, преобразования и модернизация уже сложившейся застройки в контексте решения проблем градостроительной деятельности.

Приведены требования к оценке по каждому характерному показателю, влияющему на психологическое состояние человека: плотность застройки, высотность застройки, ситуация с дворовыми пространствами, озеленение.

Ключевые слова: социально-психологические факторы, градостроительство, город, озеленение, плотность застройки, двор, квартал, микрорайон.

**SOCIO-PSYCHOLOGICAL FACTORS IN URBAN POLICY BY EXAMPLE
VORONEZH AGGLOMERATION**

GUREVA E. I., YANSHINA N. A.

Abstract. Social and psychological factors that can affect human well-being in the formation of sustainable development of the Voronezh agglomeration are considered.

The article substantiates the relevance of the development of urban recreational spaces, adjacent territories, transformation and modernization of existing buildings in the context of solving the problems of urban development.

The requirements to the assessment for each characteristic indicator affecting the psychological state of a person are given: the density of building, the height of construction, the situation with yard spaces, landscaping.

Keywords: socio-psychological factors, urban planning, city, landscaping, density of building, yard, quarter, neighborhood.

Введение

В настоящее время агломерация Воронежской области самая крупная в Центральном федеральном округе России после Московской. Руководитель департамента строительной политики региона в своем ежегодном отчете отмечает, что область входит в тройку лидеров России по темпу возводимого жилья [1]. Но увеличение численности населения городов области не ведет к улучшению качества жизни городской среды (Рис. 1).

Об этом свидетельствует, рейтинг городов России по качеству жизни по 12 критериям (Рис. 2) в 2018 году показал, что в десятку лучших не вошел ни один город-миллионик [2]. Так Воронеж находится на 68 строке рейтинга из 150 городов России. Известно всемирное ухуд-

шение экологической ситуации в городах приводит к глобальным социальным проблемам в обществе. В связи с этим, проблемы урбанизации не перестают требовать всестороннего анализа, так как в градостроительстве идет постоянный поиск формы, которая обеспечивала бы безопасность и комфорт, но когда эти изменения достигаются путем «точечной» застройки, то это способствует ухудшению социально-психологических факторов. По данным Центра городского дизайна и психического здоровья известно, что в городах людей с расстройствами настроения на 39% больше, а с тревожными неврозами – на 21% вдвое выше риск развития шизофрении [3]. Жизнь в городе требует от жителя развития таких важных интеллектуальных качеств, как планирование и структурирование времени, находясь в постоянном информационном воздействии. В качестве основных критериев оценки качества пространства социумом являются доступность и комфортность среды.

Основное направление исследовательской работы: изучение пространственного поведения человека. Оно связано с организацией пространства и учетом уменьшения количества озелененных территорий, вследствие интенсивной урбанизации. В сфере интересов также оказываются дворовые пространства и городские рекреационные пространства.

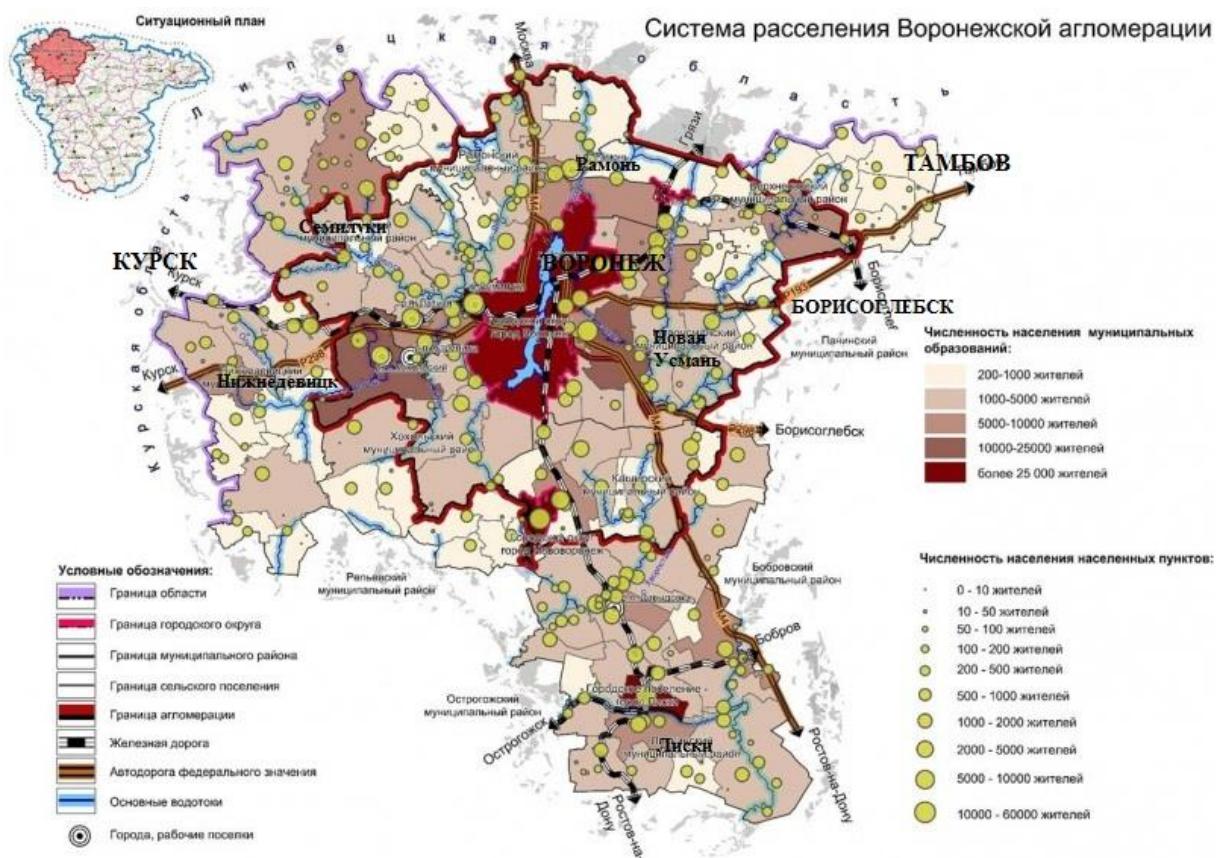


Рисунок 1 – Асимметричная организация территории Воронежской области [4]

Согласно докладу Всемирной организации здравоохранения, зеленые зоны могут улучшить и сохранить психическое здоровье городских жителей, снизить уровень стресса и агрессии [5]. Человеческое развитие во многом формируется искусственной средой, что делает вопросы градостроительства еще более важными.

Нами были выявлены и исследованы факторы, которые действуют на человека:

1. плотность застройки;
2. высотность застройки;
3. ситуация дворовых пространств;
4. озеленение.



Рисунок 2 – Критерии оценки качества жизни по 10-балльной шкале (диаграмма составлена автором статьи по данным опроса domofond.ru жителей городов России)

Намеченные к решению задачи:

- рассмотреть проблему взаимодействия человека с окружающей средой (Рис. 3);
- привести требования к оценке по каждому характерному из 4х показателю, влияющему на психологическое состояние человека.

Модели и методы

Объектами были выбраны города (Рис. 4), все входящие в Воронежскую агломерацию:

1. Воронеж как город-миллионник;
2. г. Бобров – как исторический, входит в список исторических городов России;
3. г. Семилуки как моногород;
4. г. Поворино - как стратегически важный пункт (узел дорог).



Рисунок 3 – Концептуальная модель исследования



Рисунок 4 – Объекты исследования

Результаты исследования и их анализ

Плотность застройки. Сложившаяся в настоящее время в России ситуация со стратегическим территориальным планированием и общим признанием в градостроительной политике квартальной застройки, в отличие от прошлой структуры города – микрорайона, должна создавать комфортность, безопасность, повышать экологичность, культурно-образовательный уровень, экономичность, социальную инфраструктуру.

Но сильное увеличение **плотности** г. Воронежа приводит к тому, что людям негде погулять с детьми во дворе, поставить машину и т.д. (Рис. 5, 6). Все это не делает жилье таким уж комфорtnым, а все потому, что многие архитекторы и проектировщики прошлого не учитывали социально-психологические факторы, что осложнило рациональное размещение объектов в городском пространстве. Плотность застройки влияет на эмоциональную оценку населения окружающей реальности. Ретроспективный (оценочный) анализ застройки показал, что численность в микрорайоне в 30-е годы равнялась 8-12 тысяч человек. Затем она увеличивалась и достигла 50-70 тысяч жителей. Сегодня с учетом транспортной возможности, высотного строительства зданий, требованиям экологии жилищная политика города изменилась. Площадь микрорайона стала варьироваться от 10 до 60 гектаров с численностью населения более 100 тысяч человек [6,7]. Перечисленные действия способствуют ухудшению комфорта и социально-психологического самочувствия жителей.

В связи с этим выявлено, что комфортность для жителей с превышением плотности в г. Воронеже уменьшена фактически в 10 раз.



Рисунок 5 – Застройка по ул. Шишкова
г. Воронежа



Рисунок 6 – Жилой дом б-р Олимпийский
г. Воронеж

Высотность застройки. Жить постоянно на **высоте** вредно для общего состояния организма человека [8]. В организме появляется вялое состояние, апатия, частые головные боли, снижение иммунитета и многое другое, поэтому строительные компании, реализующие построенное жилье выше 7-го этажа, снижают цену на квартиры на 10-15%.

Исследования, проведенные в прошлом, показали, что негативными факторами, влияющими на жизнь на высоте, являются:

1. высота сама собой дискомфортна и не является естественной для человека;
2. электромагнитное поле;
3. радиоволны [9-14].

Высокие этажи имеют и преимущества, такие как:

1. Чистота воздуха на высоте гораздо выше, ведь пыль от движения транспорта оседает внизу, но выше 30 метров концентрация выбросов промышленными объектами резко увеличивается.

2. Относительная тишина – преимущество низких площадок.

3. Отсутствие влаги, постоянно поднимающейся из цоколя дома вплоть до 2-го этажа. Грибки и плесень в квартире, а отсюда появляются бронхит, аллергия, пневмония и т.д.

Исследование показало, на каком этаже жить наиболее благоприятно. По рекомендациям врачей полезнее жить в городе до 7-го этажа. В лучшем случае между 2-7 этажами [15]. Выше 7-го есть одни нюансы, ниже 2-го другие. Первые 7 этажей называют «золотыми этажами» (Рис. 7,8).



Рисунок 7 – «Пять звезд»
г. Воронежа, 25 этажей

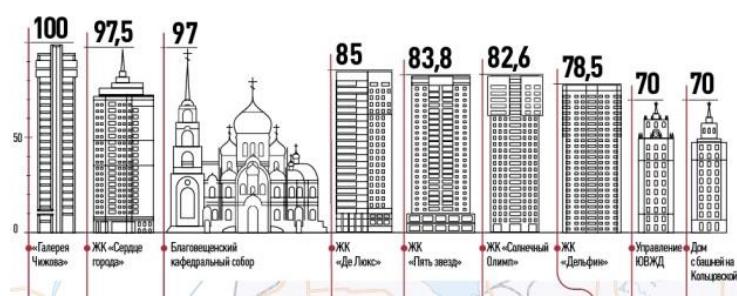


Рисунок 8 – Самые высокие здания
г. Воронежа

Высотные здания могут спровоцировать развитие психических заболеваний. К такому выводу пришел директор Лаборатории городской реальности (Urban Realities Laboratory) в канадском Университете Уотерлу - Колин Эллард [16].

Как рассказала директор Центра градостроительных компетенций РАНХиГС при Президенте РФ Ирина Ирбитская, большинство людей живут на равнинных или холмистых местностях и предпочитают селиться "не выше крон деревьев", то есть 12-го этажа. Полезнее жить в городе до 7-го этажа. В лучшем случае между 2-7 этажами. По словам директора Центра градостроительных компетенций РАНХиГС Ирины Ирбитской, на подсознание человека влияет несколько факторов:

1. люди отстранены от земли;
2. верхние этажи изолированы от общества;
3. на верхних этажах сильнее вибрации.

Ситуация дворовых пространств.

С каждый годом во дворах жилых домов становится все больше машин, отсюда возникает проблема парковочных мест, ведь их стало существенно не хватать. Каждый владелец автомобиля старается решить эту проблему, находя свои способы, например, применением силы к другому человеку, чья машина встала на «занятое» место. Отсюда в людях возникают приступы агрессии, что уж никак нельзя назвать благоприятным фактором, влияющим на человека.

ка. Иногда места, незаконно ставшие парковочными превышают допустимую норму, и озелененных мест, отведенных под тихий отдых жильцов, становится крайне мало.

В некоторых случаях места, незаконно ставшие парковочными, превышают допустимую норму, и озелененных мест, отведенных под тихий отдых жильцов становятся крайне мало. А ведь именно такой отдых в тишине и на воздухе буквально необходим городским людям, которые большую часть своего дня проводят на работе в шумном замкнутом помещении. Опыт разработки архитектурно-планировочных решений и функциональной организации дворовых территорий помогал бы людям снимать напряжение после трудного дня и психологически оказывал бы благотворное влияние.

Такая ситуация во дворах влияет не только на взрослых, но и на детей, ведь на сегодняшний день существует достаточно много дворов, игровая зона которых находится фактически в плачевном состоянии. В новых домах застройщики пытаются решить проблему, устанавливая небольшие аттракционы для детей и делая минимальное ландшафтное озеленение, но в старых домах подобные проблемы до сих пор остаются нерешенными.

Вопросы типологии жилых дворовых пространств современного города.

Проведенные исследования исторических районов г. Боброва, которые активно реконструируются-внутриквартальные территории, освоенные пешеходами позволили выделить территорию, которую можно отразить (Рис. 9) как пешеходная зона и дополнительная зеленая зона. Данный проект добавить рекреационную зону в центре города. В рамках проекта создан туристический маршрут, несущий в себе несколько функций, первой из которых является досуговая, обеспечивающая активность отдыхающих и жителей города в разное время суток. Вторая – рекреационная, обеспечивающая развитие культурного и исторического каркаса города. Третья – образовательная, обоснованная большим числом мест историко-культурного наследия, в том числе памятников архитектуры, а также малую экологическую тропу, на протяжении которой встречается множество малоизвестных представителей флоры и фауны.

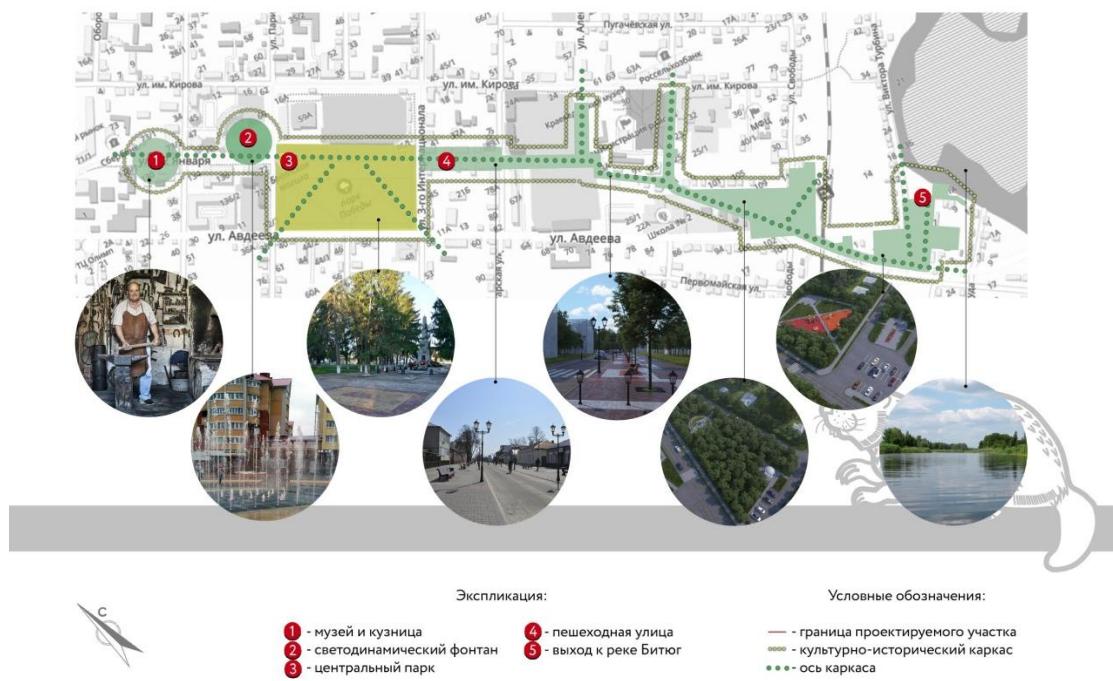


Рисунок 9 – Развитие культурного и исторического каркаса г. Бобров (автор Гурьева Е.И.)

Архитектурно планировочное решение сформировано согласно принципу минимального вмешательства в сложившуюся городскую среду. Все изменения городского каркаса не наносят вред историко-культурному наследию города.

В городе Семилуки развита промышленность. Но исследования показали, что основным потенциалом города являются наукоемкое и инновационное производство, вытесняя доминирующую в прошлом промышленность. Тем самым превращая бывшие промышленные территории в депрессивную застройку, являясь изолированными от социальной среды города. На этих территориях можно провести экологическую реабилитацию – рекультивацию территорий, попавших в зону загрязнения (устройство новых зеленых массивов – парков, скверов, аллей), тем самым увеличить процент рекреационных зон. Тем более в г. Семилуки сложилась культура организации городского благоустройства силами жителей (Рис. 10).

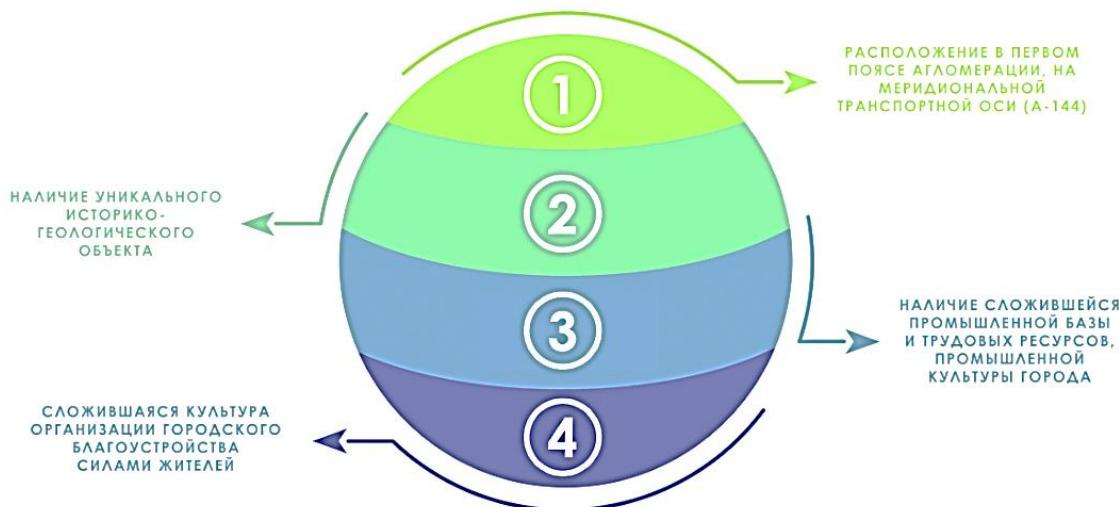


Рисунок 10 – Положительные предпосылки к развитию г. Семилуки (автор Гурьева Е.И.)

Озеленение. Исследователь Колин Эллард выяснил, что на психическое состояние городских жителей также влияют дизайн фасадов, степень озеленения и геометрия улиц.

Если территория, где расположен дом, является спальным районом без зелени вокруг него, то в таком случае выбираться на природу рекомендуется регулярно. Идеальное жилье имеет конкретные критерии: невысокий до 7-го этаж, удаленность минимум 200 метров от трассы с интенсивным движением, природные ландшафты вокруг дома с деревьями и желательно небольшой пруд неподалеку.

Какие эмоции вызывают у человека те или иные городские пространства и архитектура, исследователь определил с помощью технологии виртуальной реальности. "Люди находятся в плотной среде, которая угнетает и вызывает негативные эмоции.

Кажется логичным, что она оказывается на том, как мы понимаем людей и относимся к ним. Это может быть связано с увеличением психических заболеваний", - рассказал Эллард [17].

Согласно докладу Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), зеленые зоны могут улучшить и сохранить психическое здоровье городских жителей, снизить уровень стресса и агрессии [18]. К тому же растения охлаждают города, поглощают шум, очищают воздух. Исследователи Центра городского дизайна и психического здоровья призывают создавать безопасные и ухоженные парковые зоны, озеленять улицы и архитектуру.

Так исследования дворовых территорий г. Поворино показали, что рассмотренные придомовые территории районов с пятиэтажной застройкой - придомовые территории, на которую выходят несколько подъездов жилого дома, освоенную преимущественно жильцами имеют хорошие размеры, но морально устарелые элементы благоустройства (МАФ) (Рис. 11).



Рисунок 11 – Градостроительный анализ дворовой территории г. Поворино (автор Гурьева Е.И.)

Устойчивые зеленые города - одна из целей развития мира, принятых Генеральной Ассамблеей ООН 25 сентября 2015 года. К 2030 году странам необходимо "обеспечить всеобщий доступ к безопасным, открытым для всех и легкодоступным зеленым зонам и общественным местам отдыха, в частности для женщин и детей, пожилых людей и инвалидов" [19]. Дворовые территории г. Поворино позволяют выдержать все вышеперечисленные пункты (Рис. 12).

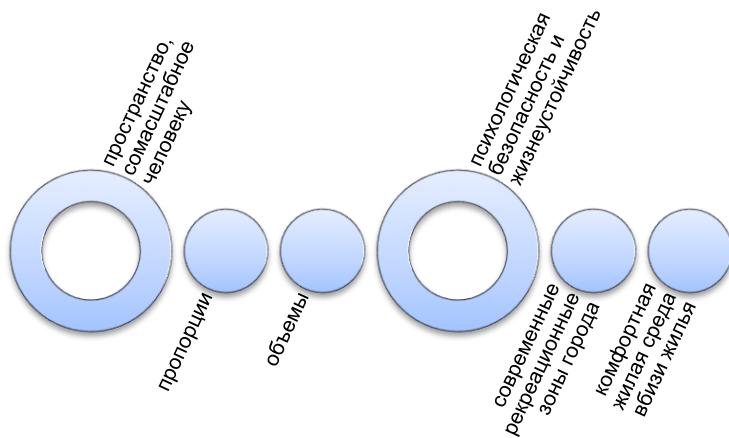


Рисунок 12 – Концепция дворовой территории г. Поворино (автор Гурьева Е.И.)

«Доказано, что люди предпочитают обходить места с разреженной застройкой. Они выберут улицу, которая образована фасадами, где на первых и вторых этажах обычно помещают кафе, сервисные центры. Человек чувствует себя комфортнее, когда знает, что в любой момент может зайти и перекусить», - отмечает директор Центра градостроительных компетенций РАНХиГС - Ирина Ирбитская [20].

По словам эксперта, в малых городах с плотной горизонтальной застройкой люди реже носят с собой зонтики, так как знают, что смогут укрыться от дождя или обсохнуть в кафе. Важно также красиво оформлять улицы, высаживать деревья. Зелень успокаительно влияет на человека, снижает уровни агрессии и стресса", - рассказала Ирбитская.

Перечисленные факторы имеют огромное влияние не только на настроение, но и на здоровье человека (Рис. 13).



*Рисунок 13 – Требования к оценке показателей, влияющих на психологическое состояние человека
(автор Гурьева Е.И.)*

В заключении отметим, что на психологическое состояние человека влияют многочисленные социально-психологические факторы в сфере градостроительства. В обобщении многочисленных исследований, проведенных не только российскими, но и зарубежными учеными, работающими в градостроительной сфере, как на территории РФ, так и вне ее выявлено: зачастую застройщики проектируют и строят жилье, не учитывая влияние перечисленных факторов на человека, а ведь именно они являются наиболее важными и влияют не только на настроение, но и на здоровье.

Градостроительная деятельность в агломерации Воронежской области должна быть направлена на решение устойчивого развития территорий, которое предполагает формирование современной городской среды Воронежской области.

Выводы

1. Сильное увеличение плотности в городах Воронежской области не делает жилье комфортным. Сейчас мы видим, что город у нас развивается экстенсивно, осваиваются окраинные территории города. Повышается нагрузка на общественный транспорт, используют больше личных автомобилей. А когда люди будут оставаться в исторически сложившихся границах, плотностные характеристики там можно будет повысить без ущерба для комфортности проживания.

2. Высота неестественна для человека. Жить на высоте вредно для общего состояния организма человека. Исследователи установили негативные факторы, влияющие на жизнь на высоте: электромагнитное поле и радиоволны. Реализация проектов комплексного развития территории, предусматривающих строительство жилья в идеале должно представлять: дом до 7 этажей с удаленностью от трассы минимум 200 м, с примыкающей рекреацией для жителей - ландшафт вокруг дома

3. «Умный город – умный регион» - области и аспекты психологического исследования. Благоустройство дворовых и общественных территорий.

4. Обеспечение роста уровня жизни населения, создание комфортной среды его жизнедеятельности, повышение престижа проживания и работы в местности. Благоустройство парков, скверов, пляжей, садов, ремонт и благоустройство военно-мемориальных объектов, устройство тротуаров, что позволяет создать условия для более комфортного проживания граждан, повышения туристской привлекательности территории.

5. Результаты исследований объектов Воронежской агломерации показали, что при детальной проработке городов можно выявить уникальные территории для создания гармоничных рекреационных зон: в исторических городах-это может стать концепция создания пешеходного исторически-культурного каркаса согласно принципу минимального вмешательства в сложившуюся городскую среду; в моногородах – экологическая реконструкция заброшенных промышленных территорий и превращение их в парки; в городах с большими дворами, но морально устарелыми МАФ – возможна реконструкция в крайчайшие сроки при наличии финансировании строительных работ для формирования комфортной среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основные показатели строительной отрасли. Объем ввода жилья за 2018 г. [Электронный ресурс]. – URL: <http://daspvo.ru/page/pokazateli-effektivnosti-deyatelnosti.html> (дата обращения: 25.11.2019).
2. Полный рейтинг городов России по качеству жизни в 2018 году [Электронный ресурс]. – URL:https://www.domofond.ru/statya/polnyy_reyting_gorodov_rossii_po_kachestvu_zhizni_v_2018_godu/7679 (дата обращения: 26.11.2019).
3. Событие и приемная программа Центра городского дизайна и психического здоровья [Электронный ресурс]. – URL: <https://rus.architecturaldesignschool.com/centre-urban-design-78223> (дата обращения: 26.11.2019).
4. Проект стратегии социально-экономического развития Воронежской области на период до 2035 года : принят Воронежской областной Думой 17.12.2018. Закон Воронежской области от 20.12.2018 N 168-ОЗ. [Электронный ресурс]. – URL: <https://econom.govrn.ru/its/proekt-strategii-sotsialno-ekonomicheskogo-razvitiya> (дата обращения: 25.11.2019).
5. Доклад о состоянии здравоохранения в Европе 2018. Больше, чем просто цифры: фактические данные для всех. Копенгаген, Европейское региональное бюро ВОЗ, 2018. [Электронный ресурс]. – URL:<http://www.euro.who.int/ru/data-and-evidence/european-health-report/european-health-report-2018/european-health-report-2018-more-than-numbers-evidence-for-all-2018> (дата обращения: 26.11.2019).
6. Ананьева А.А., Пуляевская О.В. Влияние градостроительных особенностей рекреационных объектов города на психологическое состояние человека // Социальная компетентность. 2017. Т. 2. № 4 (6). С. 66-70.
7. Градостроительный кодекс Российской Федерации: Федеральный закон от 29.12.2004 №190-ФЗ (ред. от 03.07.2016) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.09.2016): Принят Государственной Думой 22 декабря 2004 г. Одобрен Советом Федерации 24 декабря 2004 г. [Электронный ресурс]. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_51040/ (дата обращения: 19.11.2019).
8. Гурьева Е.И., Ульянкина В.А. Воздействие человеческой деятельности на ландшафт (на примере г. Липецк) // Архитектурные исследования. 2018. № 3 (15). С. 71-80.
9. Гурьева Е.И. Психологическая оценка парков санаториев Воронежской области // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки. 2008. № 7 (47). С. 11-17.
10. Кругляк В.В., Семенютина А.В., Гурьева Е.И. Модели архитектоники рекреационных насаждений для адаптивных систем озеленения // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. 2017. № 3. С. 108-112.
11. Кругляк В.В., Гурьева Е.И. Методологические основы мониторинга системы озеленения (на примере мегаполиса Воронежа) // В сборнике: Международна научна школа "Парадигма". Лято-2015 сборник научни статии в 8 тома. 2015. С. 70-76.
12. Пуляевская О.В. К вопросу определения психологического аспекта устойчивого развития территорий в контексте решения проблем градостроительной деятельности // Социальная компетентность. 2016. Т. 1. № 1 (1). С. 33-35.
13. Фирсова Н.В., Капустин П.В., Гурьева Е.И. Эволюция природного комплекса города Воронежа: функция, образ, смысл // Экология урбанизированных территорий. 2016. № 2. С. 98-104.
14. Глазычев В.Л. Устроение российского пространства // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2009. № 1 (11). С. 41-44.
15. Соловьев Е.А. Человек в городской среде: история и перспективы психологических исследований // Вестник гражданских инженеров. 2011. № 4 (29). С. 195-200.

16. Хорькова Г.Р. Формирование безбарьерного городского пространства в контексте средового подхода // Вестник гражданских инженеров. 2012. № 5 (34). С. 42-46.
17. Шмелева И.А. Проблема взаимодействия человека с окружающей средой: области и аспекты психологического исследования // Вестник Московского университета. Серия 14: Психология. 2010. № 3. С. 105-120.
18. Третьякова П. А., Шутова О. А. Исследование основных проблем благоустройства придомовых территорий районов с пятиэтажной застройкой // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2013. № 2. С. 131-138.
19. Барсукова Н. И., Фомина Э. В. Вопросы типологии жилых дворовых пространств современного города // Вестник ОГУ. 2015. № 5 (180). С. 115–120.
20. Гришина М.П. Современная практика архитектурно-планировочных решений и функциональной организации дворовых территорий на примере Казани // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. № 1 (43). С. 103-111.

REFERENCES

1. Osnovnyye pokazateli stroitel'noy otrassli. Ob'yem vvoda zhil'ya za 2018 g. [The main indicators of the construction industry. The volume of housing commissioning in 2018]. - URL: <http://daspvo.ru/page/pokazateli-effektivnosti-deyatelnosti.html> (data obrashcheniya: 25.11.2019).
2. Polnyy reyting gorodov Rossii po kachestvu zhizni v 2018 godu [Full rating of Russian cities on quality of life in 2018]. - URL: https://www.domofond.ru/statya/polnyy_reyting_gorodov_rossii_po_kachestvu_zhizni_v_2018_godu/7679 (available on 26.11.2019).
3. Sobytiye i priyemnaya programma Tsentral'nogo gorodskogo dizayna i psikhicheskogo zdorov'ya [Event and reception program Of the center for urban design and mental health]. - URL: <https://rus.architecturaldesignschool.com/centre-urban-design-78223> (available on 26.11.2019).
4. Proyekt strategii sotsial'no-ekonomiceskogo razvitiya Voronezhskoy oblasti na period do 2035 goda: prinyat Voronezhskoy oblastnoy Dumoy 17.12.2018. Zakon Voronezhskoy oblasti ot 20.12.2018 N 168-OZ. [Draft strategy of social and economic development of the Voronezh region for the period up to 2035: adopted by the Voronezh regional Duma 17.12.2018. The law of the Voronezh region of 20.12.2018 N 168-OZ]. - URL: <https://econom.govvrn.ru/its/proekt-strategii-sotsialno-ekonomiceskogo-razvitiya> (available on 25.11.2019).
5. Doklad o sostoyanii zdravookhraneniya v Yevrope. Kopenagen, Yevropeyskoye regional'noye byuro VOZ, 2018. [Report on the state of health in Europe 2018. More than just numbers: facts for everyone. Copenhagen, who regional office for Europe, 2018]. - URL: [http://www.euro.who.int/ru/data-and-evidence/european-health-report/european-health-report-2018.-more-than-tsifry-dokazatel'stva-dlya-vsekh-2018](http://www.euro.who.int/ru/data-and-evidence/european-health-report/european-health-report-2018/european-health-report-2018.-more-than-tsifry-dokazatel'stva-dlya-vsekh-2018) (available on 26.11.2019).
6. Anan'yeva A.A., Pulyayevskaya O.V. Vliyanie gradostroitel'nykh svoystv rekreatsionnykh ob'yektorov na psichologicheskoye sostoyaniye cheloveka [Influence of town-planning features of recreational objects of the city on the psychological state of a person]. *Sotsial'naya kompetentnost'*. 2017. T. 2. No 4 (6). Pp. 66-70.
7. Gradostroitel'nyy kodeks Rossiyskoy Federatsii: Federal'nyy zakon ot 29.12.2004 №190 - FZ (red. Ot 03.07.2016) (s izm. I dop., Vstup. V silu s 01.09.2016): Prinyat Gosudarstvennoy Dumoy 22 dekabrya 2004 g , Odobren Sovetom Federatsii 24 dekabrya 2004 g. [The town-planning code of the Russian Federation: Federal law No. 190-FZ of 29.12.2004 (ed. of 03.07.2016) (with ed. and extra, of course. effective from 01.09.2016): Adopted by the State Duma on December 22, 2004. Approved by the Federation Council on December 24, 2004]. - URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_51040/ (available on 19.11.2019).
8. Gur'yeva Ye.I., Ul'yankina V.A. Vozdeystviye chelovecheskoy deyatelnosti na landshaft (na primere g. Lipetsk) [the Impact of human activity on the landscape (on the example of Lipetsk)]. *Arkhitekturnyye issledovaniya*. 2018. No 3 (15). Pp. 71-80.
9. Gur'yeva Ye.I. Psichologicheskaya otsenka parkov sanatoriiev Voronezhskoy oblasti [Psychological assessment of parks of sanatoriums of the Voronezh region]. *Nauchnyye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Yestestvennyye nauki*. 2008. No 7 (47). Pp. 11-17.
10. Kruglyak V.V., Semenyutina A.V., Gur'yeva Ye.I. Modeli arkhitekturnykh dlya rekreatsionnykh sistem dlya adaptivnykh sistem ozeleneniya [Models of architectonics of recreational plantings for adaptive systems of gardening]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya. Geoekologiya*. 2017. No 3. Pp. 108-112.
11. Kruglyak V.V., Gur'yeva Ye.I. Metodologicheskiye osnovy monitoringa sistemy ozeleneniya (na primere megapolisa Voronezha) [Methodological bases of monitoring of greening system (on the example of Voronezh megalopolis)]. Proc. of Int. Scientific Scool "Paradigma". 2015. Pp. 70-76.
12. Pulyayevskaya O.V. Voprosy sotsial'noy problematiki [On the question of determining the psychological aspect of sustainable development of territories in the context of solving the problems of urban development]. *Sotsial'naya kompetentnost'*. 2016. Vol. 1. No 1 (1). Pp. 33-35.

13. Firsova N.V., Kapustin P.V., Gur'yeva Ye.I. Evolyutsiya prirodnogo kompleksa goroda Voronezha: funktsiya, obraz, smysl [Evolution of the natural complex of Voro-nezha: function, image, meaning]. *Ekologiya urbanizirovannykh territoriy*. 2016. No 2. Pp. 98-104.
14. Glazychev V.L. Ustroyeniye rossiyskogo prostranstva [the Structure of the Russian space]. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhi-tekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2009. No 1 (11). Pp. 41-44.
15. Solov'yeva Ye.A. Chelovek v gorodskoy srede: istoriya i perspektivy psichologicheskikh issledovaniy [Man in the urban environment: history and prospects of psychological research]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2011. No 4 (29). Pp. 195-200.
16. Khor'kova G.R. Formirovaniye bezbar'yernogo gorodskogo prostranstva v kontekste sredovogo podkhoda [Formation of a barrier-free urban space in the context of the environmental approach]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2012. No 5 (34). Pp. 42-46.
17. Shmeleva I.A. Problemy psikho-logicheskogo issledovaniya [the Problem of human interaction with the environment: the areas and aspects of psychological research]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 14: Psichologiya*. 2010. No 3. Pp. 105-120.
18. Tret'yakova P. A., Shutova O. A. Issledovaniye osnovnykh problem blagoustroystva pridomovykh ter-ritoriy rayonov s pyatietazhnou zastroykoj [Analysis of the main problems of improvement of the adjoining areas of a five-story building]. *Vestnik PNIPU. Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2013. No 2. Pp. 131-138.
19. Barsukova N. I., Fomina E. V. Voprosy tipologii zhilykh dvorovykh prostranstv sovremennoj goroda [Typologies of residential yard spaces of the modern city]. *Vestnik OGU*. 2015. No 5 (180). Pp. 115-120.
20. Grishina M.P. Sovremennaya praktika arkhitekturno-planirovочных reshenij i funktsional'noj organizatsii dvorovykh territorij na primere Kazani [Modern practice of architectural and planning decisions and functional organization of yard territories on the example of Kazan]. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhi-tekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2018. No 1 (43). Pp. 103-111.

Информация об авторах:

Гурьева Елена Ивановна

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж, Россия,
канд. с/х наук, доцент кафедры градостроительства
E-mail: gurjeva_el@mail.ru

Яньшина Наталия Александровна

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж, Россия,
магистр кафедры градостроительства
E-mail: tektillar@mail.ru

Information about authors:

Gureva Elena I.

Voronezh state technical University, Voronezh, Russia,
PhD. agricultural Sciences, associate Professor of urban planning
E-mail: gurjeva_el@mail.ru

Yanshina Natalia A.

Voronezh state technical University, Voronezh, Russia,
master of urban planning
E-mail: tektillar@mail.ru

АРХИТЕКТУРА УСАДЕБНЫХ ЗДАНИЙ КУРСКОЙ ГУБЕРНИИ XVIII - ПЕРВОЙ ПОЛОВИНЕ XIX ВВ.

ХОЛОДОВА Е.В.

Научно-исследовательский институт теории и истории архитектуры и градостроительства (НИИТИАГ)
Филиал ФГБУ "ЦНИИП Минстроя России", г. Москва, Россия

Аннотация. Исследование основано на выявленных архивных и печатных источниках, натурных исследованиях автора, которые позволяют более обоснованно реконструировать архитектуру утраченных и сохранившихся фрагментов дворянских и купеческих усадеб на территории порубежного региона России.

Научная новизна исследования связана с проведением авторских экспедиций по выявлению признаков существования и натурном обследовании ряда сохранившихся усадебных комплексов, не привлекавшие ранее в должной мере внимание исследователей. Особую значимость имеет выявление архивных и печатных источников, которые позволяют более обоснованно реконструировать образную и материальную структуру утраченных элементов дворянских и купеческих усадеб.

Особая значимость выполненной комплексной исследовательской работы обусловлена возможностью заполнить лакуны в изучении важных страниц истории общеноциональной и региональной русской культуры, отразившихся на формировании региональных особенностей строительных приёмов и образности архитектурных ансамблей усадеб Курского края.

Ключевые слова: Курский край (губерния), архитектура, стилизация, композиция, планировка, господские дома, церкви, строительство, реконструкция.

THE ARCHITECTURE OF MANOR HOUSES IN KURSK PROVINCE XVIII-FIRST HALF OF XIX CENTURY

KHOLODOVA E.V.

Research Institute of theory and history of architecture and urban planning (NIITAG)
branch of "TSNIIIP of the Ministry of construction of Russia", Moscow, Russia

Abstract. The study is based on the identified archival and printed sources, field studies of the author, which allow more reasonably reconstruct the architecture of the lost and preserved fragments of noble and merchant estates in the territory of the border region of Russia.

The scientific novelty of the study is associated with the author's expeditions to identify signs of existence and full-scale survey of a number of surviving manor complexes, which had not previously attracted the attention of researchers. Of particular importance is the identification of archival and printed sources that allow more reasonably reconstruct the figurative and material structure of the lost elements of noble and merchant estates.

The special significance of the complex research work is due to the possibility to fill in the gaps in the study of important pages in the history of national and regional Russian culture, reflected in the formation of regional features of construction techniques and imagery of architectural ensembles of estates of the Kursk region.

Keywords: Kursk region (province), architecture, stylization, composition, planning, manor houses, churches, construction, reconstruction.

Введение

Предметом исследования является загородное усадебное строительство Курского края, рассмотренное в рамках значительного в историко-культурном отношении хронологическом периоде – XVIII – 1-й половины XIX вв.

Объекты исследования – поместья, имения, усадьбы и дачи привилегированных сословий Курского края: дворянства и купечества.

Поскольку административные границы послереволюционного периода развития страны менялись, при определении территориальных границ исследования принят термин «Курский край», как рабочий инструмент, позволяющий рассматривать существовавшую на протяжении XVIII – 1-й половины XIX веков как территориальную целостность, определявшую формирование в её пределах специфических черт культуры.

Историография проблемы исследования на территории Курского края.

Исторические сведения об усадьбах Курского края редко встречаются на страницах дореволюционных изданий. Нет отдельных статей и монографических работ комплексных исследований, посвящённых теме строительства и архитектуре Курского края.

Исследователи конца XIX – начала XX вв., оставаясь в рамках исторической фактологии, к сожалению, не развили в своих трудах художественного осознания усадебной архитектуры.

В местной периодической печати (в Курских губернских и Епархиальных ведомостях и др.) упоминания об усадьбах встречаются лишь в фактических сообщениях.

Значительным явлением в курской летописной истории стал выход ряда изданий А.А. Танкова, Д.И. Багалея.

В течение XX века усадьбы Курского края не привлекали должного внимания архитекторов и искусствоведов. Наиболее удачливой оказалась усадьба Барятинских "Марьино", которой посвятили свои работы архитектор С.И. Фёдоров историк Е.В. Кончин, искусствоведы М.С. Тарасова, Н.А. Синянская.

Описание памятников архитектуры отдельных белгородских усадеб встречаются в очерках архитектора Л.И. Колесниковой.

Исторические сведения из жизни отдельных усадеб Курской губернии и их владельцев прозвучали в публикациях курских исследователей и краеведов (1990-е – 2004 гг.).

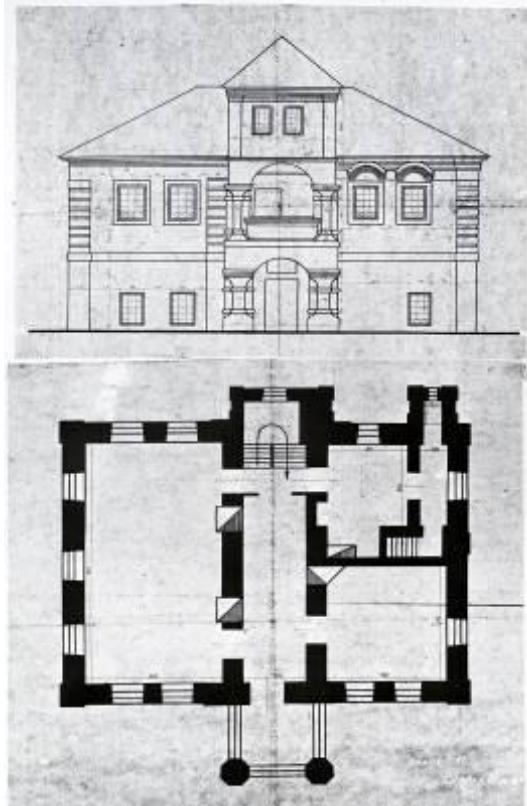
Большой вклад в изучение эволюции строительства сельского жилища русско-украинского пограничья внесли труды Л.Н. Чижиковой.

Дворянские имения в процессе крепостничества Центрального Черноземья 1-й половины XVIII в. (эволюция поместно-вотчинного фонда, статистика и структура дворянских поместий) представлены в работах историка С.В. Черникова. Эволюция дворянских и купеческих землевладений Центрального Черноземья в пореформенный период рассмотрены в трудах историков В.А. Шаповалова, В.С. Кулабухова, Г.И. Старченко, В.В. Бычковского, И.Т. Шатохина и др.

Обзор литературы и научных работ, дающий представление о степени достаточно полного освещения проблемы, подтверждает, что Курские усадьбы не были ещё предметом целостного историко-архитектурного исследования периода XVII - начала XX вв. Зарубежные исследования так же отсутствуют.

Актуальность исследования обусловлена тем, что русская усадьба сегодня является реликтовой исчезающей темой. Сегодня бывшие дворянские и купеческие загородные усадьбы Курского края самая незащищённая часть объектов культурного наследия - бесхозные, разбираемые на стройматериалы, калечащиеся некомпетентными ремонтами. К началу XX в. в Курской губернии было более 6 000 усадеб. На территории современных регионов, входящих в бывшую Курскую губернию, можно назвать лишь около 100 мест, где фрагменты усадебных комплексов, различимы по остаткам аллей парков, прудов и усадебных строений. Усадебных комплексов, поддерживаемых регулярной реставрацией единицы. В результате хозяйственной деятельности исчезают семейные некрополи и уникальные усадебные ландшафты.

а)



б)



Рисунок 1 – Дом купцов Хлопониных в Закурной слободе близ г. Курска, начало XVIII в.:

- а) фасад и план - обмеры архитектора О.В. Левицкого, 1970 г.,*
- б) вид со двора - графика архитектора А.Г. Шуклина, 1940-е гг.*

Ивановское, в котором по описанию на 1708 г. было три церкви, развитый экономический посёлок и жилая хозяйственная усадьба. «Постройки во дворе Мазепы расположены по древнерусскому обычаю: хоромы стояли во дворе, а вокруг них по сторонам надворные постройки, как около центра. На дворе находилось 11 одноэтажных «поземных» светлиц; из них 5 было новых, а 6 старых. Возле светлиц находились две варни, а между ними стояла кухня». При усадьбе имелся довольно развитый хоздвор. В документе перечислены несколько амбаров, конюшня, ледники, погреба. «Позади светлиц распланирован сад, в нем была баня – «мыльня со стенами» [1, с. 37-38].

С курскими усадьбами связаны жизнь и деятельность многих известных исторических личностей, общественных и политических деятелей и деятелей науки и искусства. Курская усадьба стала колыбелью становления отечественной науки, искусства и культуры.

Основная цель работы – исследование основных стилистические этапов и объёмно-планировочные решения в архитектуре усадебных зданий, в контексте общих художественных процессов XVIII - 1-й пол. XIX вв. на одной из значительных территорий чернозёмных областей южного побережья России – Курского края.

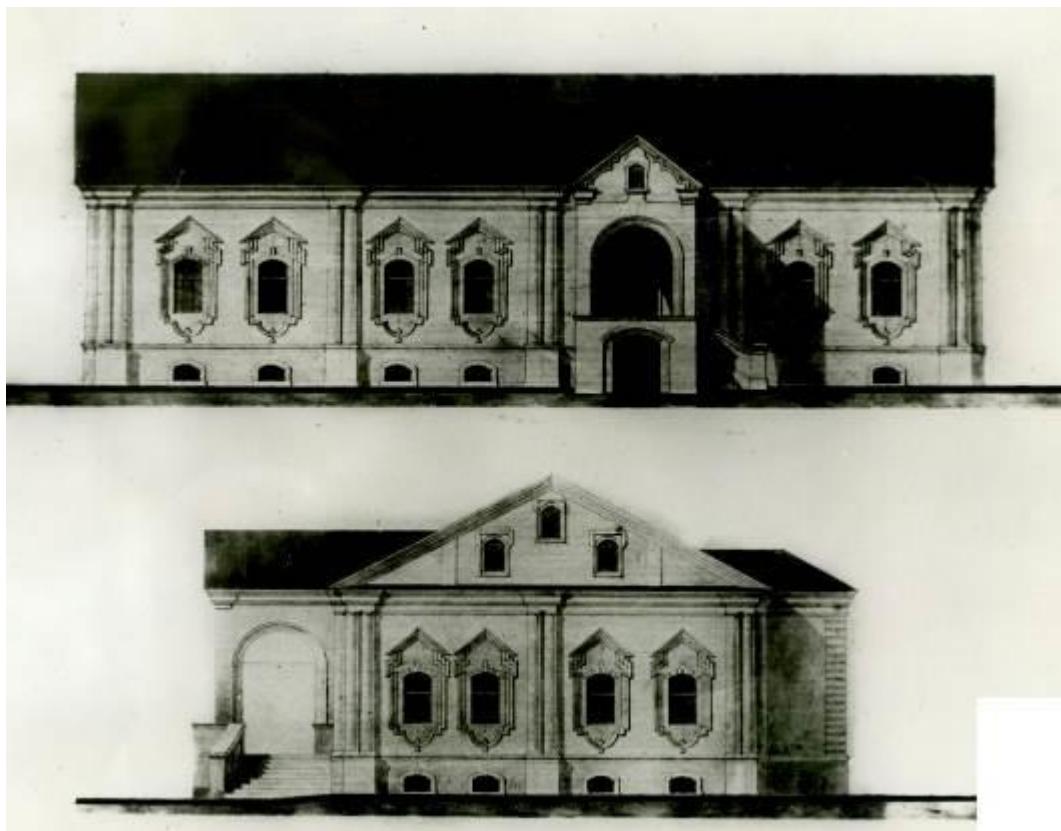
Основная часть.

Более ранние усадебные объекты изучаемого периода не дошли до нас в достаточной степени сохранности и документальных свидетельств. Однако, единичные сохранившиеся до нас документы и каменные усадебные здания этого времени дают представление о том, что архитектура загородных усадеб Курского края развивалась в традициях объёмно-планировочных решений древнерусских жилых домов – палат XVI-XVII вв. (см. рисунки 1-6) характерной для городов и областей центральной России и Украины. Их внутренне убранство так же следовало традициям древнерусского жилого дома: на втором этаже – парадные комнаты, внизу – подсобные помещения, а жилые комнаты располагались в верхней части.

Речь идёт, например, о двух-трёхэтажных зданиях 1-й четверти XVIII в., так называемых «Дом Ромодановских» (купцов Хлопониных) в Закурной слободе под г. Курском, ныне территория г. Курска (см. рисунок 1), «Дом Петра Великого» в г. Рыльске и «Дом Петра Первого» в усадьбе Б.П. Шереметева в Борисовке (см. рисунок 5,6), «палаты гетмана Мазепы» в с. Ивановском (см. рисунок 2,3,4) и др.

Рассмотрим некоторые из них.

В сёлах курского имения гетмана И.С. Мазепы были им основаны усадьбы и экономические дворы из которых наибольшее развитие получает



*Рисунок 2 - «Палаты Мазепы» с. Ивановском Рыльского уезда Курской губернии.
Проект восстановления архитектор А.Ю. Ехауеким, 1949 г.:
а) вверху – западный фасад, б) внизу – южный фасад.*



*Рисунок 3 - «Палаты Мазепы» в с. Ивановском Рыльского уезда Курской губернии.
Реконструкция К. Лопяло, 1970-е гг.*

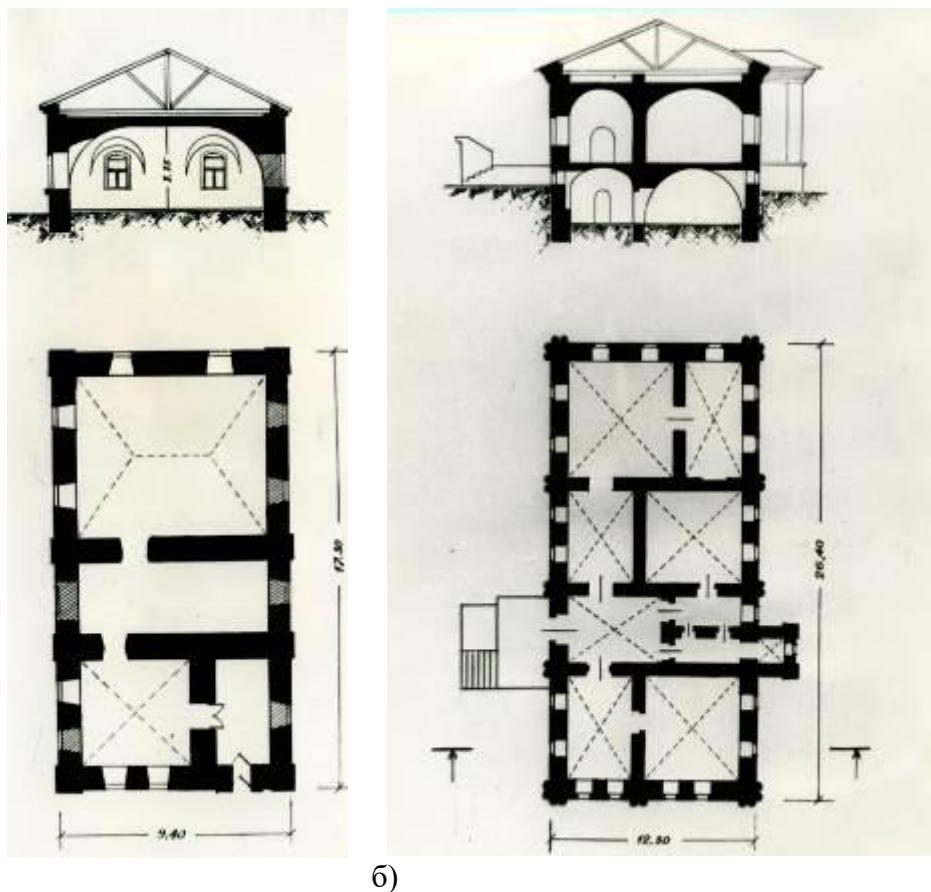


Рисунок 4 - Усадебные строения в с. Ивановском Рыльского уезда Курской губернии. Обмеры архитектора О.В. Левицкого, 1950-е гг.:
 а) каменица – разрез (вверху) и план этажа,
 б) «Палаты Мазепы» – разрез (вверху) и план 1-го этажа.

До наших дней сохранился кирпичный главный дом усадьбы, т.н. «палаты Мазепы» (вероятней всего построенные др. владельцами в 1730-х гг. – Е.Х.) и небольшая «каменица» - ценные и редкие памятники гражданской архитектуры, соединившие в себе черты русско-украинского барокко XVIII в..

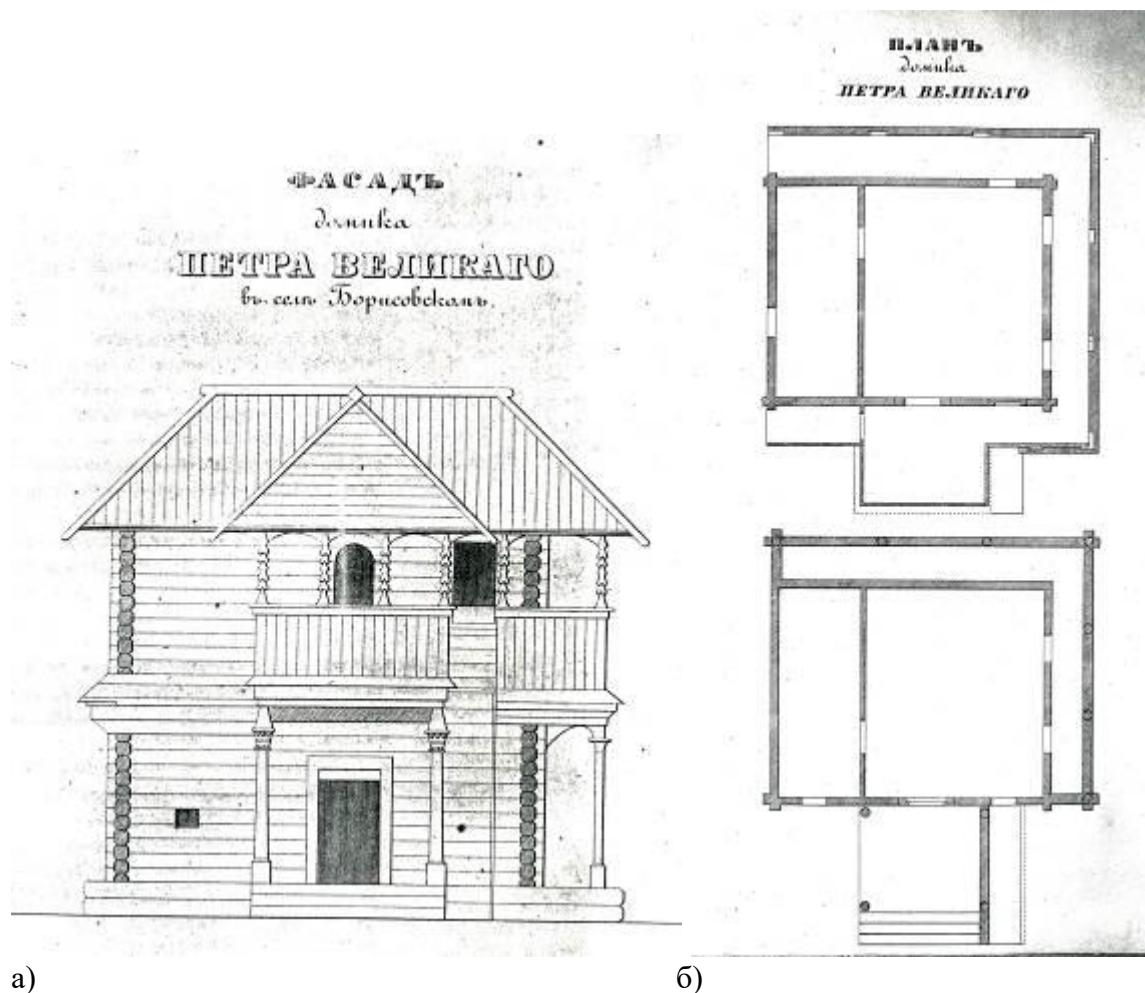
Кроме того в с. Крупце Мазепа основал укреплённую усадьбу – «острожек городок». Усадебный комплекс, окружённый треугольною в плане деревянною крепостью с башнями «без верха» был расположен на горе над мельничным прудом на реке Крупец. Внутри крепости располагался главный дом-светлица в окружении хозпостроек.

Борисовка, ставшая главной конторой управления экономиями развитого крупного центрально-чернозёмного имения и образцового хозяйства Шереметевых, помимо жилой части - усадьбы для приезда хозяев (которые бывали редко) здесь находились административные здание конторы имения. Усадьба включала: господский дом, флигели, кухню, вотчинную контору, дом управляющего имения, каретный сарай, конюшню, скотный сарай, две избы для дворовой прислуги, три погреба, баню, три амбара, сад-парк [2, с.392].

В первой четверти XVIII в. усадебный комплекс Шереметевых представлял собой близкий к квадрату участок (около 1 дес.), ограниченный сельской улицей, рекой Ворсклой, садом и крестьянскими усадьбами.

В состав барской усадьбы входил и так называемый «Домик Петра Великого». По преданию до и после Полтавской битвы в этом доме останавливался Пётр I, гостивший у своего сподвижника - белгородского воеводы Б.П. Шереметева. Это здание, как старейшая усадебная постройка привлекало внимание учёных XIX в. и благодаря чему, сохранились обмеры, зари-

совки и его описания: «...Небольшое деревянное здание, на левом берегу Ворсклы, обращённое фасадом на восток. Оно построено в начале XVIII века из толстого дубового леса, в два этажа, наподобие старинного теремка. Каждый этаж состоит из двух небольших комнат, а нижний соединяется с верхним посредством наружной лестницы, откуда наверху с трёх сторон идёт небольшая галерея. Крыша из гонта, выкрашена красною краскою. Мебель в нижнем этаже состоит из одного стола и нескольких скамеек старинной отделки... над входом надпись "Генеральная Квартира"... при домике сохраняются восемь орудий разного калибра (7 пушек и один единорог), подаренные, по преданию, Императором после Полтавского сражения графу Б.П. Шереметеву, вероятно отбитых у шведов, т.к. они очень повреждены...» [3;64].



*Рисунок 5 - «Домик Петра Великого» в с. Борисовке Хотмыжского уезда Курской губернии.
Обмеры сер. XIX в.: а) главный фасад, б) планы этажей.*

К памятнику прошлого относились бережно, как к музейной реликвии: поновляли наружную отделку, окружили изгородью. В доме хранили архив имения. В 1845 г. над теремом был устроен деревянный шатёр для защиты от непогоды [4, л.1-173].

Архитектура остальных усадебных построек до нас не дошла, кроме краткой характеристики барского дома: «...построен в итальянском вкусе и украшен под верх гербом графов Шереметевых...». Жилая часть усадьбы не сохранилась, все постройки вместе с домашним и конторским архивами сгорели в пожарах крестьянских восстаний 1905-1906 гг. [3; 5].



Рисунок 6 - Интерьер жилой комнаты «Домика Петра Великого» в с. Борисовке Хотмыжского уезда Курской губернии. Рисунок с фотографии 1904 г. Фонды КОКМ.

Самым ранним и наиболее распространённым типом деревянного церковного здания в Курском крае, так же как и на всей территории центральной России, был храм «корабль», характеризующийся расположением частей церкви (храма, трапезной и колокольни) в одну линию - с продольно осевой композицией, с одноглавым двусветным четвериком, почти квадратным в плане, небольшой трапезной и колокольней в два или три яруса, прямоугольной или трехгранной в плане алтарной частью. А так же вариации этой формы, определяющейся повышением ярусов центральной части и колокольни и параметрами планировочных частей.

Примером такого церковного строительства является деревянная церковь Знамения Курской иконы Божией Матери «Успенская, что в Бору» под городом Рыльском, построена в середине XVII в. в своём имении рыльским князем Василием Ивановичем Шемякой, в честь чудесного своего исцеления. Дошедшие до нас фотографии, рисунки и описания храма являются примером типичных деревянных церквей, которые имели распространения в Курском крае XVII-XVIII вв. (см. рисунок 7).



Рисунок 7 - Церковь Успенская в с. Боровском близ г. Рыльска. Фото середины XX в.: а) южный фасад, б) северный фасад.

Ценным и редким является описание храма современником начала XX в., в котором сказано: «За древность храма говорит и собственный его фасад: в нем и до сих пор существуют волоковые "задвижные" окна без рам крошечных размеров, от пяти до семи вершков длины, и от четырех с половиной до шести вершков ширины (длина здесь разумеется не вертикальная, а горизонтальная); колокольня устроена не на паперти, как обыкновенно строятся колокольни; а на трапезе; в трапезе, при входе с левой стороны, существовало на чердак отверстие, служившее некогда единственным ходом на звонницу; следы этого отверстия видны и теперь; в алтаре и трапезе потолки устроены поверх матиц (балок) без всяких правил архитектуры, трапезнaya матица даже и топором не отесана; вышина обоих потолков не более трех с четвертью аршин; стены храма рублены одними лишь топорами, без всяких почисток их усовершенствованными орудиями, как-то: шершбеками, рубанками и проч.: так что на внутренних стенах храма, несмотря на покраску их, до сих пор замечается лезвие топора; колокольня устроена на трапезе. Весь древний храм без галерей имеет в длину 22 арш., в ширину от 5,5 до 7 арш., в разных отделениях. Храм долгое время существовал без фундамента и покрыт был тесом; а в 1830-х гг. под него подложен кирпичный фундамент и покрыт листовым железом. Из-под бортов настоящей крыши выглядывают и теперь концы досок прежней кровли.

В общем храм до сих пор пребывает в том самом виде, в каком первоначально и построен был. Но две досчатых галерей с западной стороны пристроены к нему уже в последнее время, одна в начал 1850-х гг., а вторая в середине 1860-х гг.

В храме существовало не менее трех иконостасов. Последний построен в 1836 г., возобновлен в 1892 г. Существование прежних двух иконостасов доказывается тем, что в храм и до сих пор хранятся иконостасные иконы давних времен сохранились одни Царская врата и один большой деревянный крест, красовавшийся на верху всего иконостаса. Другие же Царские врата, по свидетельству очевидцев недавно еще находились в склад на колокольне, но неизвестно когда и кем утрачены...» [6, с.296-298].

Наибольшее развитие строительства усадебных комплексов в Курском крае, как и по всей территории центральной России, происходило в последней трети XVIII в. что было связано с освобождением дворян от обязательств несения воинской службы (Манифест о вольности дворянства 1762 г.) и с расширением их экономической и политических привилегий («жалованная грамота дворянству», 1785 г.). Благодаря привилегиям многие дворяне прочно обосновались на земле в своих усадьбах .

Современники отмечали, что во второй половине XVIII в. «...помещичьи усадьбы значительно улучшились. До того времени они состояли преимущественно из тесных низких домиков, легко возобновляемых после погромов переносимых с места на место, причем предпочтителось такое их расположение, чтобы из барского дома было видно как на ладони, что делается в деревне. С тех пор как наша область была навсегда ограждена от вражеских нападений, усадьбы сделались вполне оседлыми. Дома, окруженные садами или парками, помещики стали строить обширнее, выше и даже изредка и из более прочного материала, например кирпича и камня и крыть железом. Самая жизнь в таких усадьбах сделалась более комфортабельной и более культурной» [7, с.141] (см. рисунки 8-15).

Об объемах главных усадебных домов Курского края по данным из «Описания Курского наместничества» 1784 г. по этажности и числу покоев в крупных усадьбах: Белгородская округа: с. Болховец - Андреев М.М. «2-х этажное 16 покоев»; Дмитриевская округа: с. Карманово - И.П. Анненков «о 9 покоях»; с. Петровское-Шегарово - Г.П. Шагаров «о 9 покоев»; Льговская округа - Колпаково - А.Г. Изъединов «50 покоев»; Фатежская округа - с. Покровское-Алисово - Алисов А.Е. «3-х этажный 39 покоев»; Щигровская округа - д. Кшенева - А.И. Сухотина «о 6 покоев» [4].

Приведенные ниже описания дают ценный материал о расположении и устройстве на примере подобных усадеб:

«Рышково село (в 6 верстах от Курска). Селением лежит при реке Семи по течению оной по левую сторону. Во оном селе церковь каменная во имя Дмитрия Мученика при кото-

рой священно и церковно служительских дворов два. Во оных душ четыре, да господской деревянной дом, при котором суконная фабрика деревянною строения с одним упокоем, в котором один стан. В той фабрике работу производят ткальную и прядильную крепостные люди, а материалы покупаются в Москве, сукна же для валки и крошения вытканные отправляются Москву же. Да один постоянный двор. При том же доме на реке Семи мельница о шести мучных поставах и двух толчехах, не доезжая до оной мельницы на солянке мост тритцати двух сажень. Лес состоит около оного дому по лугу и островам принадлежит полковнику Алексею Ивановичу Панину» [1, Ч.1.Л.83об.].



*Рисунок 8 - Вид усадебного места. Село Яковлевка Обоянского уезда Курской губернии (?).
Художник К.А. Трутовский, сер. XIX в.*



Рисунок 9 - Вид Курской усадьбы. Картина неизвестного художника, 1883 г..



Рисунок 10 - Вид на усадьбу Устимовичей в с. Вознесенское Обоянского уезда Курской губернии. Фото нач. XX в.



Рисунок 11 - Парковый вид господского дома Букреевых в селе Меловом Тимского уезда Курской губернии. Фото нач. XX в.

«Колонтаево Износково тож. Селением лежит при речке Густомое от идущей из Курска в Рыльск дороге в левой стороне в шести верстах. Во оном селе церковь каменная во имя святого Николая Чудотворца при которой священно и церковно служительских дворов два. Во оных душ девять да помещиков [...] Арсеньевых четыре дома, из коих два каменные Луки (Степанова сына Арсеньева) в один этаж о семи покоях и конюшня каменная, Юрии (Степанова сына Арсеньева) в два этажа о двадцати покоях. Во оных имеют сами они жительство да ево же, Юрии Арсеньева один кирпичный завод. Кузниц устроено деревянных три, а на означенной речки мельница об одном мучном поставе...» [4, Ч.5.Л.81об.].



*Рисунок 12. Типы сельской застройки Курской губернии –
а) рядовая историческая застройка юга Курской губернии, фото нач. XX в.,
б) тип ветряной мельницы, фото нач. XX в.,
в) жилая крестьянская усадьба Обоянского уезда Курской губ., фото автора 2000 г.*

«Никольское на Тускоре Колпаковка Тож. Селением лежит на при речке Реуте... на большой из Рыльска в Курск дороге, во оном селе две церкви. Первая каменная во имя Знамения богоордицы с двумя приделами святого Николая Чудотворца и Димитрия Ростовского. Вторая деревянная во имя святого Николая Чудотворца, при которых священно и церковно служительской двор один. Во оном душ семь да его, Изъединова ("надворного советника Еггея Григорьева сына Изъединова") дом каменной до пятидесяти покоев в круг оного ограда каменная да для людей связей восемь о шестнадцати покоях на берегу реки Реута каменная солодовня ево же Изъединова, две мельницы... Заводы его Изъединова в конце селения кирпичной, а внутри оного известной и одна имеется деревянная кузница при речке Бобрике винной в том же селе в год бывает пять ярманков...»[4, Ч.5.Л.87-87об.]

«Жигаева Слободка. Дмитриевская Округа. Селением лежит на Фатежской дороге при речке Жигаевой. В оном селе церковь деревянная во имя Казанской богоматери... дом его сиятельства графа Якова Александровича Брюса деревянной, а на речке Жигаевой мельница о трёх мучных поставах и об одной просяной ступе. Заводы имеются его сиятельства кирпичной и конской, для которого устроены две каменные конюшни...» [4,Ч.5.Л.140-141об.]

Статистика 1780-х гг. показывает, что большинство дворян были мелкопоместными: «дворян живущих и не живущих в наместничестве 2 622 [дано число городских и загородных – Е.Х.], из оного числа богатых 100, средних 1500, бедных - 1022 человека» [4,Ч.15.Л.101].



*Рисунок 13 - Вид усадьбы Киреевских в селе Быстрицы Тымского уезда Курской губернии.
Фото нач. XX в.*



Рисунок 14 - Вид усадьбы Лазаревых Суджанский уезд Курской губернии. Фото нач. XX в.

Здесь же приведены общие данные, позволяющие увидеть картину усадебного строительства в Курском крае в последней четверти XVIII в. где видно, что большинство владельцев – «дворяне живущие в деревнях», мелкие и средней руки усадьбы и лишь пятая часть (по всей видимости, средние и крупные) – «дворяне, имеющие деревни и людей, а жительствующие в других городах и уездах, а так же состоящие на службе». По числу господских домов предполагается, что в то время число усадеб немногим превышало две тысячи. Причём, деревянное строительство было преобладающим [8, с.38].

Вторая половина XVIII – 1-я пол. XIX вв. в России является по истине «золотым веком» дворянства. Новые реформы дают большую оседлость в своих имениях, и продолжение роста усадебного строительства, характер которого наглядно иллюстрирует статистика второй половины XVIII – 1-й половины XIX вв..



Рисунок 15 - Сельский дом в д. Быховке Дмитриевского уезда Курской губернии. Фото 1935 г.

Исторические источники подтверждают [4, ч.1-15], что в XVIII-1-й половине XIX вв. преобладающее количество владений Центрально-Чернозёмного региона принадлежали дворянам и 1-я половина XVIII столетия стала новым этапом в развитии дворянского землевладения, более половины которых, являлись мелкопоместными, и более 30 % среднепоместными. В эти же показатели входил и Курский край.

Исследование показывает, что в провинциальном строительстве прослеживаются региональные стилистические особенности развития архитектуры.

Современных сельские дома северных районов Курской области, очевидно сохраняют традиционные черты крестьянских построек прошлого. Это характерная беленая изба крыльцо которой имеет глухое досчатое ограждение и навес, как правило полукруглой формы. Последний опирается на четыре столбика, расположенных попарно.

Большинство усадеб мелкопоместных дворян, мало отличались от крестьянских однодворческих построек, что было характерно для значительной территории чернозёмных областей и районов русско-украинского пограничья.

Так, в "многоусадебном" Сухоребрике усадьба "наиболее богатого" дворянина Н.И. Горяинова (99 дес.) состояла из "деревянного господского дома (9 x 12 арш.), крытого соломой, фруктового сада на 6 дес., людской избы, двух амбаров пластовых рубленых, крытых соломой и огороженного плетневым сараевом двора" [9, л.107об.].

В мемуарной литературе встречаем описание мелкопоместной усадьбы Л.М. Кусакова конца XIX в. в с. Береза, где жизнерадостный весёлый нрав хозяина сроднился с обликом его небогатого жилища. В памяти современника он был "...необыкновенным домом, деревянный, крытый соломой <...>, наполнен прирученными зверями и птицами <...> на побеленных стенах своего домишко сам (Лев Михайлович – Е.Х.) изобразил "трёх нищих и трёх сытых", переделав древнюю притчу на новый лад." [10, с.61-63].

"Дворянских домов хорошего строения немного, т.к. большая часть дворян недостаточны, то дома их необширны и мало красивы", – сообщали статисты Щигровского уезда середины XIX в. [9,Л.107 об.].

Скромность и простота распространялась и на другие постройки усадьбы. Например, дворянская усадьба Горяиновых в д. Сухоребрик Щигровского у. в XIX в. Н.И.Горяинову принадлежала усадьба с господским домом и фруктовым садом на 6 дес. Усадьба находилась в южной части деревни и по описи 1854 г. представляла собой следующее: "Господский дом де-

ревянный. Крыт соломой, длиною 12, а шириной 9 арш. Людская изба, два анбара пластовых рубленых. Огорожен плетневым сараем. Двор крытый весь соломой". [9,Л.107 об.].

Усадьбы таких мелкопоместных дворян, таких как Н.И. Горяинов, видимо, мало чем отличались от крестьянских, что было характерно для всей Курской губернии. В статистическом описании Щигровского уезда сер. XIX в. сообщалось: "Дворянских домов хорошего строения немного, т.к. большая часть дворян недостаточны, то дома их необширны и мало красивы". [9,Л.107 об.].

Современники так описывали крестьянскую застройку Щигровского уезда в начале XIX в.: "Строения крестьянские обыкновенно суть: Чёрная изба деревянная с плетневыми сенями и пуньюкою, изредка и белою горницею, анбары рубленые; конюшни, закуты и сараи плетневые; прочая огорожа вообще плетневая или рвы, окладенные соломою и землёю, огуменники с овинами по большей части удалены бывают от дворов. Вообще жилища и одежда крестьян нечисты и неопрятны". [4,Д.18809.Л.1].

Статистическое описание 1848 г. дополняет эти сведения: "Избы строят почти все одна с другой и редко отделяют двором, а чаще одними только воротами, кои крыты соломою, дворы находятся позади и застроены разными хозяйственными строениями. У русских - курные избы, которые они белят только по воле помещиков или когда живут в одних селениях с малороссиянами, к этому в южных уездах Курской губернии у великоруссов гораздо более беленных изб по крайней мере 9 из 10 . У некоторых из поселян стены изб сделаны из двойного плетня, обмазанного глиною и набитого в середине мусором" [4,Д.18822].

До настоящего времени во многих сёлах бывшей Курской губернии (Курская, Белгородская, часть Сумской областей) сохранились рубленые и плетневые хозяйственные постройки - амбары, пуньки, повалени (реже жилые хаты) под соломенными крышами, отражающие облик застройки прошлых столетий.

В XIX вв. в Курской губернии так крыли все крестьянские дома и даже усадебные строения помещичьей усадьбы, не редко и господские дома. Объяснялось это дорогоизной леса в этих краях. В "Записке из Правительствующего Сената Министру внутренних дел" от 6 мая 1807 г. "О разрешении жителям города Белгорода Курской губернии делать на домах крыши из соломы с глиной" сказано: "По неимению в близости лесов, а потому по дорогоизне для крыши зданий гонта и драны о позволении крыть в городе всякие строения соломою с глиною по примеру как в Малороссии делается. Подобному положению подвержены и другие Курской губернии города, каковое положение по безопасности сего рода крыш от пожара считал ещё г. Сенатор не бесполезным" [11].

План крестьянской усадьбы имел все особенности характерные для средней полосы России. За нею располагался двор с задворками, затем гумно, рига и огород.

По статистическому описанию 1847 г. "Великороссияне Курской губернии, имея существенную нужду только в редьке, капусте и огурцах почти ничего другого не разводят" [4,Д.18822]

Для курской загородной усадьбы, как и для других поместий провинциальной России, более характерна практичность, функциональная продуманность, утилитарный подход нежели дворцовая парадность и новомодный шик.

Так, известный русский поэт А.А. Фет, обосновавшись в своём курском имении **Воробьёвке** в 1870-1880-х гг., коренным образом переустраивает усадьбу, парк и всё хозяйство имения в соответствии со своими вкусами (см. рисунок 16, 17).

Сохранившиеся документы, воспоминания современников и самого владельца позволяют подробней остановится на этапе преобразования старинной усадьбы, как наиболее характерном примере переустройства среднепоместных имений пореформенного времени [12, с.330,338].

Господский дом был построен в конце XVIII в. и при прежних владельцах представлял собой одноэтажное здание с антресолями, часть которых была занята мезонином, а часть чердаком без окон "высотой три аршина" [12, с.334] (см. рисунок.16).



Рисунок 16 - Главный усадебный дом А. Фета в д. Воробьёвке Курской губернии. Фото нач XX в.



Рисунок 17 - Вид на парковый террасу и фонтан в усадьбе А. Фета в д. Воробьёвке Курской губернии. Фото нач XX в.

"Всюду предстояли безотлагательные поправки, начиная с каменной террасы под балконом, чугунные плиты которой были покрыты грудой развалившихся каменных столбов... Очищенный от обломков балкон получил прежний вид с новыми тумбами и прежними решётками" – вспоминал А. Фет [12, с.334]. В своих воспоминаниях и письмах поэт ничего не говорил о перепланировке первого этажа ртищевского дома. Поэтому будем считать, что она не менялась и господский дом сохранил анфиладный принцип расположения комнат, унаследованный из XVIII в..



Рисунок 18 - Главный усадебный дом А. Фета в д. Воробьёвке Курской губернии, фото нач. XX в.: а) интерьер жилой комнаты, б) интерьер гостиной.

На первом этаже главного дома времени Фета располагались: парадные комнаты – гостиная, столовая; жилые – кабинет поэта, спальня, комната жены поэта; а также сени и коридор, деливший здание на две половины – парадную и жилую [13].

В гостиной, против выхода на террасу, помещался большой камин с зеркалом и бюстом бывшего владельца усадьбы Ртищева. Фет шутливо почитал его, как "гения места" и покровителя.¹¹³ (см. рисунок 18). Гостиная имела три выхода в малую гостиную, расположенную в юго-восточном углу здания, и столовую – на юго-западе, вход в которую был оформлен ионическими колоннами и панелями с зеркалами [13]. Из столовой был вход в переднюю [12, с.330,338] из передней – выход, называемый Фетом "буфетным крыльцом". Всего при жизни поэта господский дом имел четыре выхода [12, с.330,338].

Верхняя часть здания, которая при Ртищевых представляла собой мезонин и чердак, была полностью реконструирована, увеличена высота этажа, в результате чего появились три новые комнаты. В южной части второго этажа, над гостиной, располагалась бильярдная, рядом с ней "верхний" кабинет поэта и ряд комнат для гостей [12, с.330,338] (см. рисунок 19).

Во втором этаже были использованы полы парадных комнат старого дома.

Фасады воробьевского дома были выкрашены в жёлтый цвет. Их украшали междуетажные тяги, сандрики над окнами и простые карнизы. Над главным входом, с северной стороны, находился балкон, на который вела дверь с лучковым завершением.

Замыкающий господский дом с северной стороны, находились каретный сарай с востока и конюшня – с запада, объединённые каменной оградой.

Среди прочих построек, доставшихся Фету от усадьбы Ртищевых, был каменный флигель, с восточной стороны от главного дома, который неоднократно ремонтировался, а к весне 1889 года был окончательно приведен в порядок и использовался для приёма гостей [14;15].



*Рисунок 19 -. Главный усадебный дом А. Фета в д. Воробьёвке Курской губернии.
Интерьер бильярдной комнаты второго этажа. Фото нач XX в.*

К 1879 г. усадьба значительно преобразилась, о чём свидетельствует следующее описание, сделанное Фетом в письме к Н.Н. Страхову: "...Если Вы хоть мало-мальски наблюдательны, то Воробьёвка при въезде в неё сделает на Вас совершенно другое впечатление. Уже ни одной соломенной крыши не существует. Всё крашеное железо и штукатурные стены. Я нашёл, что вещь тогда хороша, когда она не носит своего типа. Город хороши, когда зеленью, парками напоминает деревню, а деревня, когда постройками напоминает чистый город" [13].

Выводы

В основной схеме развития архитектуры загородного усадебного строительства Курского края XVIII – 1-й половины XIX вв. прослеживаются несколько периодов, в общих тенденциях общероссийского художественного русла. В первой пол. XVIII в. продолжены традиции объёмно-планировочных решений древнерусских жилых домов – палат (XVI-XVII вв.), далее в 1780 – 1840-е гг. значительного развития классицизма и параллельно ему во второй пол. XIX в. проявления эклектики в формах романтизма и в дальнейшем историзма, но отличалась значительной упрощённостью и стилизаторством. Причем данные тенденции относятся преимущественно к крупным и некоторым среднепоместным усадьбам.

В создании внутреннего пространства усадебного дома учитывалась практичность и рациональность, а также традиционная связь с окружающей природой, где жилые комнаты и рабочие кабинеты были обращены во двор, а парадные – для отдыха и приёма гостей открывались в парк.

Высокий художественный уровень отдельных построек и целых комплексов курских крупных загородных усадеб обусловлен участием видных столичных зодчих, что сближало провинциальные усадьбы с культурой столичной.

В Курской губернии, так же как и в других чернозёмных областях русско-украинского пограничья, архитектура и пространственная композиция мелкотоместных имений напоминала усадьбы государственных крестьян, отличаясь от соседей лишь большим объёмом главного дома, традиционным мезонином и классицистическим портиком.

В стилистических чертах крупных и части среднепоместных усадеб Курской губернии первой пол. XIX в. находим проявления различных направлений эклектики, заложенных в ар-

хитектуре столичных школ. Архитектурный облик большинства средних и мелкопоместных усадеб отличался эклектически-стилизаторским характером с широким использованием приёмов регионального зодчества – русско-украинского порубежья.

Благодарности

Исследование выполнено за счет средств Государственной программы Российской Федерации «Развитие науки и технологий» на 2013-2020 годы в рамках Плана фундаментальных научных исследований Министерства России и РААСН, тема 1.2.2.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Плохинский М. Гетман Мазепа в роли великорусского помещика // Сборник Харьковского историко-филологического общества. Харьков: Типография К.Счастни, 1892. 53 с.
2. Холодова Е.В. Пореформенные усадьбы Курской губернии 1861-1917 годов. Орёл: ООО «Новое время». – 392 с.
3. Домик Петра Великого в слободе Борисовке // Труды Курского губернского статистического комитета. – Курск: Типография Губернского правления, 1863. – С. 579-581.
4. РГВИА.Ф.ВУА (Российский государственный Военно-исторический архив). «Топографическое описание Курского наместничества по минувшей 3-й и нынешней 4-й ревизии, сочинено тщанием сея правителем господином Зубовым в 1784-м году». – Д.18800. – Ч.1-15.
5. Щекатов А.М. Словарь географический Российского государства. - Ч. 3: К—М. М.: Унив. тип. у Любия, Гария и Попова, 1804. [2] с., 1238 стб.
6. Выпись из летописи Успенской, что в Бору церкви г. Рыльска // Труды Курской Губернской Учёной архивной Комиссии. - Курск: Типография Курского Губернского Земства, 1911. - В.1. - С.296-298.8.
7. Россия. Полное географическое описание нашего Отечества. Настольная и дорожная книга для русских людей. Среднерусская чернозёмная область / Под ред. В.П. Семёнова. - СПб.: Изд. А.Ф. Девриена, 1902. - Т.2. - 716 с.
8. ГНИМА (Государственный научный музей архитектуры им. Щусева). Р-5931. План усадьбы в селе Ивановском. 1790 г.
9. ГАКО (Государственный архив Курской области).Ф.59. Курская палата гражданского суда за 1780-1869 гг. - Оп.1.- Д.8236. - Л.107 об.
10. Изергина А. Н. О моём отце-художнике Н. Д. Бартраме // Н. Д. Бартрам: Избр. статьи. Воспоминания о художнике. – М.: Сов. художник, 1979. – С.61-63.11. РГИА.Ф.1285.- Оп.8.- Д.129.- Л.1об.
12. Фет А.А. Мои воспоминания. – М., 1890. – 452 с.
13. РГБ НИОР (Российская государственная библиотека, научно-исторический отдел рукописей). Ф.315. Переписка А.А. Фета. – К.3. – №2,3.
14. ЛМ ПД (Литературный музей Пушкинского дома в Санкт-Петербурге). Ф.365. Переписка А.А. Фета. – Оп.1. – №59.
15. Холодова Е.В. Усадьбы Курской губернии: Историко-архитектурные очерки. – Курск: Крона, 1997. – с.18-25.

REFERENCES

1. Plokhinskiy M. Getman Mazepa v roli velikorusskogo pomeshchika. Sbornik Khar'kovskogo istoriko-filologicheskogo obshchestva [Getman Mazepa in the role of the Great Russian landowner. Collection of Kharkov Historical and Philological Society]. Khar'kov: Tipografiya K.Schastni, 1892. 53 p.
2. Kholodova Ye.V. Poreformennyye usad'by Kurskoy gubernii 1861-1917 godov [The post-reform estates of the Kursk province, 1861-1917]. Orel: OOO “Novoye vremya”. 392 p.
3. Domik Petra Velikogo v slobode Borisovke [The house of Peter the Great in Borisovka settlement]. Trudy Kurskogo gubernskogo statisticheskogo komiteta [Transactions of the Kursk Provincial Statistical Committee]. Kursk: Tipografiya Gubernskogo pravleniya, 1863. Pp. 579-581.
4. RGVI.A.F.VUA (Rossiyskiy gosudarstvennyy Voyenno-istoricheskiy arkhiv). «Topograficheskoye opisanie Kurskogo namestnichestva po minuvshey 3-y i nyneshney 4-y revizii, sochineno tshchaniyem seja pravitelem gospodinom Zubovym v 1784-m godu» [(Russian State Military Historical Archive). “A topographical description of Kursk governorship according to the past 3rd and current 4th revisions was composed by carefully sowing by the ruler of the state subordinate Zubov in 1784.”]. D.18800. CH.1-15.

5. Shchekatov A.M. Slovar' geograficheskiy Rossiyskogo gosudarstva [Dictionary geographic Russian state]. Part 3: Kyiv - Moscow. Moscow: Univ. tip. u Lyubiya, Gariya i Popova, 1804. [2] p., 1238 col.
6. Vypis' iz letopisi Uspenskoy, chto v Boru tserkvi g. Ryl'ska [An extract from the annals of the Assumption, that in Bor the church of the city of Rylsk]. Trudy Kurskoy Gubernskoy Uchonoy arkhivnoy Komissii [Transactions of the Kursk Provincial Scientific Archival Commission]. Kursk: Tipografiya Kurskogo Gubernskogo Zemstva, 1911. Vol. I. Pp.296-298.8.
7. Rossiya. Polnoye geograficheskoye opisaniye nashego Otechestva. Nastol'naya i dorozhnaya kniga dlya russkikh lyudey. Srednerusskaya chernozomnaya oblast' [Russia. Full geographical description of our country. Handbook and travel book for Russian people. Central Russian chernozem region]. Under ed. V.P. Semonov. Saint Petersburg: Publishing of A.F. Devriyen, 1902. T.2. 716 p.
8. GNIMA (Gosudarstvennyy nauchnyy muzey arkitektury im. Shchuseva). R-5931. Plan usad'by v sele Ivanovskom. 1790 g. [(State Scientific Museum of Architecture named after Shchusev). P-5931. The plan of the estate in the village of Ivanovsky. 1790]
9. GAKO (Gosudarstvennyy arkhiv Kurskoy oblasti).F.59. Kurskaya palata grazhdanskogo suda za 1780-1869 gg. [(State Archives of the Kursk Region). F. 59. The Kursk Chamber of the Civil Court for 1780-1869]. Op.1. D.8236. L.107 ob.
10. Izergina A. N. O moyom ottse-khudozhnik N. D. Bartrame [About my father-artist N. D. Bartram]. N. D. Bartram: Izbr. stat'i. Vospominaniya o khudozhnik [N. D. Bartram: Fav. articles. Memories of the artist]. Moscow: Sov. khudozhnik, 1979. Pp. 61-63.
11. RGIA.F.1285.- Op.8.- D.129.- L.1ob.
12. Fet A.A. Moi vospominaniya [My memories]. Moscow, 1890. 452 p.
13. RGB NIOR (Rossiyskaya gosudarstvennaya biblioteka, nauchno-istoricheskiy otdel rukopisey). F.315. Perepiska A.A. Feta [(Russian State Library, scientific and historical department of manuscripts). F.315. Correspondence of A.A. Fet]. K.3. No 2,3.
14. LM PD (Literaturnyy muzey Pushkinskogo doma v Sankt-Peterburge). F.365. Perepiska A.A. Feta [(Literary Museum of the Pushkin House in St. Petersburg). F.365. Correspondence of A.A. Fet]. Op.1. No 59.
15. Kholodova Ye.V. Usad'by Kurskoy gubernii: Istoriko-arkhitekturnyye ocherki [Manors of the Kursk province: Historical and architectural essays]. Kursk: Krona, 1997. Pp.18-25.

Информация об авторах:

Холодова Елена Васильевна

Научно-исследовательский институт теории и истории архитектуры и градостроительства (НИИТИАГ) Филиал ФГБУ "ЦНИИП Минстроя России", г. Москва, Россия,
ведущий научный сотрудник, кандидат архитектуры, член Союза архитекторов России; советник РААЧ;
эксперт по проведению государственной историко-культурной экспертизы.
E-mail: tora-9@yandex.ru

Information about authors:

Kholodova Elena V.

Research Institute of theory and history of architecture and urban planning (NIITAG) branch of "TSNIIP of the Ministry of construction of Russia", Moscow, Russia,
leading researcher, candidate of architecture, member of the Union of architects of Russia; RACAS Advisor; expert on state historical and cultural expertise.
E-mail: tora-9@yandex.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 страницами текста на листах **формата А4** и содержит от **4 до 9 страниц**; все страницы рукописи должны иметь сплошную нумерацию.
- Статья должна быть набрана шрифтом Times New Roman, размер 12 pt с одинарным интервалом, текст выравнивается по ширине; абзацный отступ – 1,25 см, правое поле – 2 см, левое поле – 2 см, поля внизу и вверху – 2 см.
- Статья предоставляется в **1 экземпляре** на бумажном носителе и в электронном виде (по электронной почте или на любом электронном носителе).
- В одном сборнике может быть опубликована только **одна** статья **одного** автора, включая соавторство.
- **Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.**
- Если статья возвращается автору на доработку, исправленный вариант следует присыпать 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)** описывает цели и задачи проведенного исследования, а также возможности его практического применения, указывает, что нового несет в себе материал; рекомендуемый объем – не менее 100 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.

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 www.oreluniver.ru/science/journal/sir

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) 777-318

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

Адрес редакции

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»
302006, г. Орел, ул. Московская, 77.
+7 (4862) 73-43-49

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

Право использования произведений предоставлено авторами на основании
п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации

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

Подписано в печать 06.09.2019 г.
Дата выхода в свет 13.09.2019 г.
Формат 70×108 1/16. Печ. л. 8,00.
Цена свободная. Тираж 500 экз.
Заказ №_____

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической
базе ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»
302030, г. Орел, ул. Московская, 65.