

Главный редактор:

Колчунов В.И., *акад. РААСН, д.т.н., проф. (Россия)*

Заместители главного редактора:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Птичкина 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)*

Скобелева Е.А., *канд. техн. наук, доц. (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)*

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

Исполнительный редактор:

Савин С.Ю., *канд. техн. наук, доц. (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.

Подписной индекс **86294** по объединенному

каталогу «Пресса России»

© ОГУ имени И.С. Тургенева, 2019

Содержание

Теория инженерных сооружений. Строительные конструкции

Абашин Е.Г. Определение класса бетона железобетонных балок по коэффициенту затухания колебаний	3
Демьянов А. И., Наумов Н. В., Колчунов В. И. Третья стадия напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций при кручении с изгибом (случай 2)	10
Мартынов Ю.С., Надольский В.В., Верева Ф.А. Стеновые панели на основе кассетных профилей. Часть 1. Теоретические исследования	26
Потапов Ю.Б., Поликутин А.Э., Левченко А.В. Методика расчета трещиностойкости нормальных сечений каутоновых балок со смешанным армированием	38
Трещев А.А., Жулин Е.А. Изгиб кольцевых пластин из ортотропного нелинейно разнсопротивляющегося материала	48
Турков А.В., Марфин К.В., Баженова А.В. Прогибы и частоты собственных колебаний составных многослойных квадратных изотропных пластин с шарнирным опиранием по контуру при изменении жесткости связей сдвига	64

Безопасность зданий и сооружений

Королёв В.П. Методический подход к обеспечению работоспособности металлоконструкций в условиях коррозионной опасности	70
Смоляго Г.А., Дрокин С.В., Дронов А.В., Белоусов А.П., Смоляго Е.Г. Конструктивная безопасность монолитных железобетонных перекрытий по несущей способности и деформативности	83
Шубин И. Л., Дорф В. А., Красновский Р.О., Капустин Д. Е., Султыгова П.С. О характере изменения свойств сталефибробетона после температурного воздействия	93

Архитектура и градостроительство

Пилипенко О.В., Колчунов В.И., Скобелева Е.А., Борисов М.В. Методика оценки доступности социально-значимых объектов экологически безопасного биосферно-совместимого города	101
Холодова Е.В. Образцовые усадебные хозяйства и экономические посёлки в системе крупных и крупнейших имений Курского края XVIII – 1-й половины XIX веков	115

Editor-in-Chief

Kolchunov V.I., *Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)*

Editor-in-Chief Assistants:

Kolesnikova T.N., *Doc. Arc., Prof. (Russia)*

Korobko V.I., *Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)*

Danilevich D.V., *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)*

Gordon V.A., *Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)*

Emelyanov S.G., *Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)*

Karpenko N.I., *Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)*

Kolchunov V.I., *Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)*

Korobko A.V., *Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)*

Korol E.A., *Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)*

Krivoshapko S.N., *Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)*

Lafhaj Z., *Doc. Sc. Tech., Prof. (France)*

Melkumov V.N., *Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)*

Orlovic R.B., *Doc. Sc. Tech., Prof. (Poland)*

Ptichnikova G.A., *Doc. Arc., Prof. (Russia)*

Rebolj D., *Doc. Sc. Tech., Prof. (Slovenia)*

Rimshin V.I., *Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)*

Sergeychuk O.V., *Doc. Sc. Tech., Prof. (Ukraine)*

Serpik I.N., *Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)*

Skobeleva E.A., *Candidate Sc. Tech., Docent. (Russia)*

Tamrazyan A.G., *Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)*

Travush V.I., *Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)*

Treschev A.A., *Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)*

Tur V.V., *Doc. Sc. Tech., Prof. (Belorussia)*

Turkov A.V., *Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)*

Fedorov V.S., *Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)*

Fedorova N.V., *Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)*

Chernyshov E.M., *Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)*

Schach R., *Doc. Sc. Tech., Prof. (Germany)*

Iakovenko I.A., *Doc. Sc. Tech., Prof. (Ukraine)*

Managing Editor:

Savin S.Yu., *Candidate Sc. Tech., Docent. (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 №ФЦ 77-67169 from 16.09.2016 г.

Index on the catalogue of the «Pressa Rossi»

86294

© Orel State University, 2019

Contents

Theory of engineering structures. Building units

Abashin E.G. Determination of concrete class of RC beams by vibration-damping coefficient	3
Demyanov A. I., Naumov N. V., Kolchunov V. I. Third stage of stressed-deformed condition of reinforced concrete structures under torsion with bending (case 2)	10
Martynov Y.S., Nadolski V.V., Viarouka F.A. Wall panels based on cassette profiles. Part 1. Theoretical researches	26
Potapov Yu.B., Polikutin A.E., Levchenko A.V. Calculation method of the normal sections crack resistance of the rubcon beams with mixed reinforcement... ..	38
Treschev A.A., Zhurin E.A. Bending of ring plates from orthotropic nonlinear miscellaneous material	48
Turkov A.V., Marfin K.V., Bazhenova A.V. The deflections and natural frequencies of the composite layered square isotropic plates with hinged supports along the contour at different stiffness values of shear ties	64

Building and structure safety

Korolov V.P. Methocal approach to assuring structural steel servicability under corrosion hazard	70
Smolyago G.A., Drokin S.V., Dronov A.V., Belousov A.P., Smolyago E.G. Assessment of structural safety in strength and durability of the corrugated concrete slab	83
Shubin I.L., Dorf V.A., Krasnovskiy R.O., Kapustin D.E., Sulytsova P.S. The character of change of properties of steel fibre concrete after temperature exposure	93

Architecture and town-planning

Pilipenko O.V., Kolchunov V.I., Skobeleva E.A., Borisov M.V. Accessibility assessment methodology of socially-valuable objects of environmentally safe biospheric compatible city	101
Kholodova E.V. Exemplary estate farms and towns in the economic system of large and very large estates Kursk region in the XVIII – 1st half of XIX centuries... ..	115

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КЛАССА БЕТОНА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК ПО КОЭФФИЦИЕНТУ ЗАТУХАНИЯ КОЛЕБАНИЙ

АБАШИН Е.Г.

ФГБОУ ВО «Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина», г. Орел, Россия

Аннотация. В статье рассматривается возможность применения коэффициента затухания колебаний для определения класса бетона железобетонных балок без предварительного напряжения арматуры в упругой стадии работы. Предложено использовать данный параметр в качестве характеристики, учитывающей потери энергии в колебательной системе. Вероятно, что изменение класса бетона окажет прямое влияние на интенсивность затухания колебаний, поскольку с увеличением класса бетона упругие свойства конструкции начинают преобладать над пластическими. При обеспечении одинаковых условий опирания и контроля экспериментальных конструкций потери энергии за счет различных физических и деформативных свойств изделий проявятся в полной мере, а коэффициент затухания колебаний позволит определить эти свойства с меньшими погрешностями и большей стабильностью по сравнению с ультразвуковым или механическим методами. Разработан способ определения класса бетона, основанный на использовании эталонных конструкций и построении аналитической зависимости коэффициента затухания колебаний от класса бетона. Для исследуемого типа и размера железобетонных конструкций получена меньшая погрешность определения класса бетона по сравнению с известными методами.

Ключевые слова: железобетонные балки, класс бетона, неразрушающие методы контроля, вибрационный метод, коэффициент затухания колебаний.

DETERMINATION OF CONCRETE CLASS OF RC BEAMS BY VIBRATION-DAMPING COEFFICIENT

ABASHIN E.G.

Orel state agrarian university named after N.V. Parakhin, Orel, Russia

Abstract. The article considers the possibility of using the vibration-damping coefficient to determine the concrete class of reinforced concrete beams without prestressing reinforcement in the elastic stage of work. It is proposed to use this parameter as a characteristic that takes into account energy losses in an oscillatory system. It is likely that a change in the class of concrete will have a direct effect on the intensity of the damping of vibrations, since with an increase in the class of concrete the elastic properties of the structure begin to prevail over the plastic ones. Providing the same conditions of support and control of experimental designs, energy losses due to various physical and deforming properties of the products will be fully manifested, and the damping coefficient of vibrations will allow determining these properties with less errors and greater stability compared to ultrasonic or mechanical methods. A method has been developed for determining the class of concrete, based on the use of reference structures and constructing an analytical dependence of the damping coefficient of vibrations on the class of concrete. For the studied type and size of reinforced concrete structures, a smaller error in determining the class of concrete is obtained in comparison with known methods.

Keywords: reinforced concrete beams, concrete class, non-destructive testing methods, vibration method, vibration-damping coefficient.

Введение

Известен способ определения класса бетона в железобетонной конструкции путем испытания образцов (кубиков), специально изготавливаемых одновременно с бетонированием конструкции либо в заводских условиях, либо на стройплощадке [1]. Этот способ имеет недостаток, который заключается в том, что со временем физико-механические свойства бетона изменяются в зависимости от условий эксплуатации, и в случае необходимости для определения класса бетона следует прибегать к другим методам. Кроме того данный способ имеет высокую погрешность порядка – 10...15%. В процессе эксплуатации физико-механические свойства бетона в железобетонной конструкции могут меняться под воздействием как внешних факторов, таких как температура, влажность, агрессивные среды [2], так и внутренних [3].

В связи с этим возникает необходимость оценки класса бетона конструкций, находящихся в стадии эксплуатации [4]. Для этой цели разработаны и внедрены механический и ультразвуковой методы [5]. У этих методов существует целый ряд недостатков [6].

Механические методы основаны на предварительно установленной градуировочной (корреляционной) зависимости между классом бетона и косвенными характеристиками: значением отскока, размером отпечатка, усилием скалывания ребра конструкции, условным напряжением при отрыве, установленными испытанием приборами механического действия [7]. Данные методы имеют высокую погрешность, так как на их точность может оказать влияние физическое состояние поверхностного слоя, его карбонизация, зерновой состав бетонной смеси, влажность поверхности, крупность заполнителя и его глубина залегания, разница прочностей на поверхности и в теле конструкции, а также и субъективные факторы, такие как навыки оператора [8]. Неудивительно, что даже при соблюдении всех технологических и статистических требований ГОСТов регламентированная погрешность механических методов весьма высока и составляет от 12 до 15% в зависимости от конкретного метода [9].

Ультразвуковые методы основаны на экспериментально установленной корреляционной зависимости скорости прохождения ультразвуковых волн от класса бетона [10]. Регламентированная погрешность данного метода составляет 10...12% [11]. Основным недостатком является то, что модуль упругости и скорость ультразвука по-разному зависят от количества и качества цемента, соотношения долей мелкого и крупного заполнителей и их прочности, степени армирования и т.д. Также несколько процентов в общую погрешность метода добавляют ошибки при отсчете времени распространения ультразвукового импульса, ошибки за счет контакта датчиков с образцом, влажность, шероховатость поверхности конструкции. Кроме того, ультразвуковые методы позволяют определить класс бетона только на отдельном участке, а не интегрально у всей конструкции в целом [12].

Также известен способ определения класса бетона по основной или первой резонансной частоте продольных или поперечных колебаний балки [13]. У конструкции, находящейся в стадии эксплуатации, затруднен доступ к обоим торцам одновременно, поэтому применение способа с продольными колебаниями возможно только при производстве ЖБИ на заводах-изготовителях. При использовании варианта данного способа с поперечными колебаниями погрешность составляет порядка 10% [14].

Исходя из вышеизложенного, сформулируем задачу исследования: разработать и экспериментально подтвердить способ определения класса бетона в железобетонных балках без предварительного напряжения арматуры по результатам их динамических испытаний с погрешностью ниже, чем у существующих методов.

Методы исследования

Коэффициент затухания колебаний α известен из курса физики [15] как один из параметров, учитывающий потери энергии в колебательной системе. Коэффициент затухания определяется по формуле:

$$\alpha = \frac{1}{\tau}, \quad (1)$$

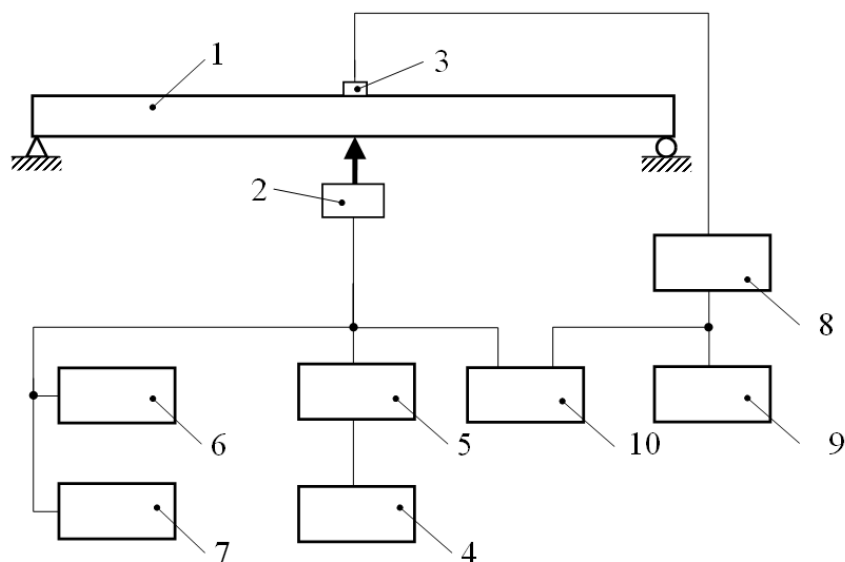
где τ – время релаксации (время, за которое амплитуда колебаний уменьшается в e раз, $e \approx 2,72$ – основание натурального логарифма).

В отличие от логарифмического декремента затухания колебаний коэффициент затухания ранее не рассматривался для диагностики железобетонных конструкций вибрационным методом. Касательно строительных конструкций и материалов известна и регламентирована лишь методика определения звукоизолирующей способности оконного остекления по величине коэффициента затухания колебаний звукового диапазона [16].

Поскольку коэффициент затухания колебаний определяется по большему участку виброграммы, чем логарифмический декремент затухания колебаний, который рекомендуется рассчитывать по двум соседним амплитудам, на его значение окажет меньшее влияние наложение амплитуд колебаний более высокого (низкого) порядка, а значит, коэффициент затухания колебаний можно определить с большей точностью, что приведет и к повышению точности определения физических и деформативных свойств контролируемых конструкций. Также нестабильно поведение логарифмического декремента затухания колебаний с ростом нагрузки, что ранее было исследовано в работе [17].

По аналогии с логарифмическим декрементом затухания колебаний коэффициент затухания характеризует величину потери колебательной энергии в конструкции. Вероятно, что изменение класса бетона окажет прямое влияние на интенсивность затухания свободных колебаний, поскольку с увеличением класса бетона упругие свойства конструкции начинают преобладать над пластическими. Если обеспечить одинаковые условия опирания и контроля экспериментальных конструкций, то потери энергии за счет различных физических и деформативных свойств изделий проявятся в полной мере, а коэффициент затухания колебаний позволит определить эти свойства с меньшими погрешностями и большей стабильностью по сравнению с логарифмическим декрементом затухания колебаний.

Данную гипотезу необходимо проверить на экспериментальных железобетонных конструкциях. Для этого были испытаны 5 типов железобетонных балок (рисунок 1), по 2 каждого типа всего 10 штук, со следующими геометрическими характеристиками: $l = 2590$ мм, $b = 120$ мм, $h = 140$ мм; масса балок $m = 109$ кг. Армирование данных балок одинаковое, а класс бетона различен в диапазоне от B7,5 до B30 (B7,5; B15; B20; B25; B30).



1 – контролируемое изделие, 2 – излучатель механических колебаний,
3 – приемник механических колебаний, 4 – генератор синусоидальных колебаний,
5 – усилитель мощности, 6 – частотомер, 7 – цифровой вольтамперметр,
8 – предварительный усилитель, 9 – анализатор спектра, 10 – электронный осциллограф

Рисунок 1 – Функциональная схема экспериментальной установки для определения коэффициента затухания поперечных колебаний в режиме вынужденных колебаний

Испытания проводились следующим образом. Каждую из изготовленных конструкций устанавливают на испытательном стенде, закрепляют её концы по схеме шарнирного опирания и возбуждают в ней свободные поперечные колебания с помощью механического удара или внезапного снятия некоторой статической нагрузки. Используя какой-либо частотомер, например, виброанализатор «Вибран-3», измеряют коэффициент затухания колебаний.

Если используется режим воздействия вынужденными колебаниями (см. рисунок 1), то на контролируемую балку 1 в средней части пролета закрепляют с одной стороны излучатель колебаний 2, например электродинамический вибровозбудитель поперечных колебаний, а с другой стороны – приемник механических колебаний 3 (первичный преобразователь виброперемещений). С помощью генератора синусоидальных колебаний 4 и усилителя мощности 5 возбуждают в конструкции колебания в требуемом диапазоне частот, поддерживая энергию этих колебаний строго на одном уровне. При этом частоту и амплитуду электрического сигнала, подаваемого на вход вибровозбудителя поперечных колебаний 2, контролируют частотомером 6 и цифровым вольтамперметром 7. Сигнал с приемника механических колебаний усиливается с помощью предварительного усилителя 8, а с помощью анализатора спектра 9 снимают амплитудно-частотную характеристику контролируемой конструкции, по которой определяют коэффициент затухания колебаний в режиме прекращения возбуждения колебаний. Кроме того, в схему включен электронный осциллограф 10 для визуализации колебательного процесса.

Результаты исследования и их анализ

По полученным результатам (см. таблица 1) построена аппроксимирующая функция (2) «класс бетона – коэффициент затухания колебаний» (см. рисунок 2).

$$B = 38,972 \cdot \alpha^{-1,811} \quad (2)$$

Таблица 1 – Значения коэффициентов затухания свободных поперечных колебаний железобетонных балок с разными классами бетона и погрешность определения класса бетона по предложенному способу

Класс бетона В	7,5	15	20	25	30
Коэффициент затухания колебаний, α	2,51	1,68	1,41	1,27	1,19
Класс бетона В, определенный по выражению 2	7,36	15,23	20,92	25,28	28,44
Погрешность определения класса бетона по предложенному способу, %	1,87	1,53	4,6	1,12	5,2

При диагностике изделия серийного изготовления определяют коэффициент затухания колебаний и с помощью построенной аппроксимирующей функции находят действительный класс бетона.

Как видно из рисунка 2, существует функциональная зависимость между классом бетона и коэффициентом затухания колебаний, позволяющая с высокой степенью вероятности определить класс бетона по результатам динамических испытаний. Погрешность предлагаемого способа составляет около 5%, что значительно меньше существующих ультразвуковых и механических методов определения класса бетона.

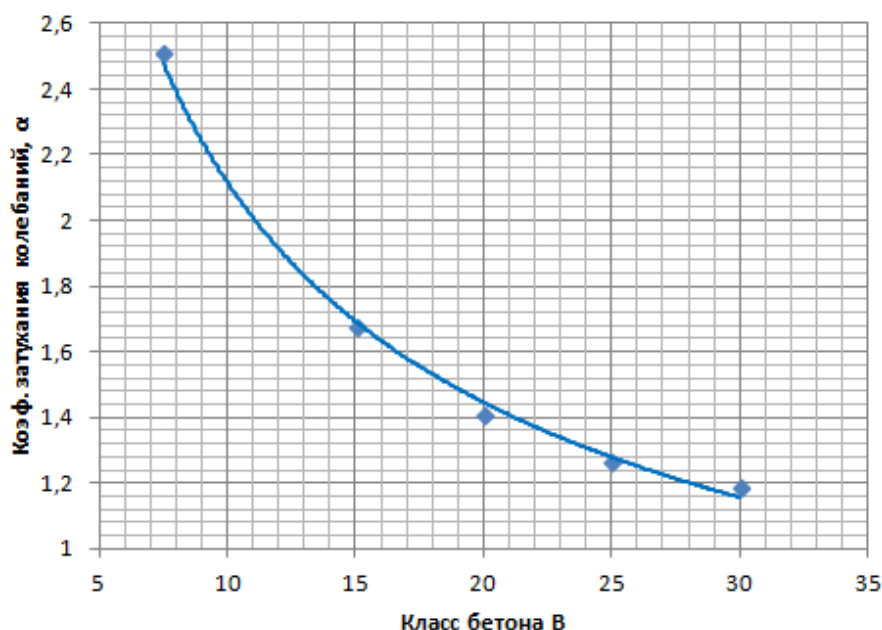


Рисунок 2 – Графическое представление экспериментальных данных и аппроксимирующей функции (класс бетона – коэффициент затухания колебаний)

На основании проведенных исследований предложен способ определения класса бетона в железобетонных балках без предварительного напряжения в упругой стадии работы, заключающийся в изготовлении 5...7 эталонных изделий для конструкций определенного типа и размера, класс бетона которых изменяется в определенном диапазоне значений, установке на стенд, закреплении концов изделия по схеме шарнирного опирания, возбуждении в каждом из эталонных изделий свободных поперечных колебаний на основной частоте (или вынужденных колебаний на первой резонансной частоте), измерении коэффициента затухания колебаний, и построении по полученным значениям аналитической зависимости «класс бетона – коэффициент затухания колебаний»; при диагностике изделия серийного изготовления определяют коэффициент затухания колебаний и по полученной аналитической зависимости подсчитывают класс бетона. Преимуществом данного способа является также отсутствие необходимости загружать конструкцию нагрузкой на время испытания.

Выводы

1. Экспериментально подтверждена функциональная зависимость коэффициента затухания колебаний от класса бетона в железобетонных балках без предварительного напряжения арматуры в упругой стадии работы.
2. Разработан способ определения класса бетона по измеренному коэффициенту затухания колебаний железобетонных балок, основанный на использовании эталонных конструкций.
3. Погрешность предлагаемого способа составляет около 5%, что значительно меньше существующих методов определения класса бетона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 53231-2008 Бетоны. Правила контроля и оценки прочности. – Взамен ГОСТ 18105.0-86 ; введ. 2009.02.21. М. : Стандартинформ, 2010. 31 с.
2. Abee K. Damage assessment in reinforced concrete using spectral and temporal nonlinear vibration techniques // Cement and concrete research. № 30. 2002. P. 1453—1464.

3. Zhang W. Application of wide band AE sensor in model test of reinforced concrete structures // 17th World conference on nondestructive testing (25–28 oct. 2008 y., Shanghai, China). Shanghai, 2008. P. 362–369.
4. Калашников М. О. Диагностика и контроль качества строительных конструкций вибрационными методами: 05.23.01 «Строит. конструкции, здания и сооружения» : автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук / Калашников Михаил Олегович; [Орловский гос. техн. ун-т]. Орел. 2011. 23 с.
5. Коробко В. И., Коробко А. В. Контроль качества строительных конструкций : Виброакустические технологии. М. : Изд-во АСВ, 2003. 288 с.
6. Юров А. П. Нетрадиционные вибрационные методы диагностики и контроля качества протяженных железобетонных конструкций : дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук : 05.23.01, 05.23.17. : защищена 25.02.05 : утв. 15.06.05 Орел, 2005 г. 135 с.
7. Kim U. A. nondestructive testing method for crack in carbon fiber reinforced concrete with infrared thermography // Journal key engineering materials. 2005. № 32. P. 2128–2133
8. Limaye B. Need for non-destructive testing (NDT) of reinforced concrete & various ND tests // National seminar of ISNT Chennai : 2002. P. 472–483.
9. Коробко В. И., Калашникова Н. Г., Калашникова О. В. Контроль жесткости упругих пластинок с помощью вибрационного метода // Строительство и реконструкция. 2017. № 6 (74). С. 26-31.
10. Коробко В. И., Калашникова Н. Г. Экспериментальное определение основной частоты колебаний пластинок в виде ромба и равнобедренного треугольника // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2018. № 3 (329). С. 57-63.
11. Гунгер Ю. Р. Ультразвуковой и вибрационный контроль состояния железобетонных стоек опор и фундаментов воздушных линий электропередачи // Электро-инфо. 2005. № 11. С. 40–43.
12. Абашин Е. Г. Оценка площади поперечного сечения рабочей арматуры в железобетонных балках по результатам вибрационных испытаний. // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2018. № 4. С. 26-32.
13. Патент 2473880 Российская Федерация, С2 МПК G01N 3/30, Способ определения модуля упругости бетона в упругих железобетонных конструкциях балочного типа / Коробко В. И., Коробко, А. В., Абашин, Е. Г.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Госуниверситет - УНПК». - №2011116856; заявл. 27.04.2011; опубл. 27.01.2013, Бюл. №3.
14. Абашин Е. Г. Определение начального модуля упругости бетона по основной частоте колебаний железобетонных балок // Научный журнал строительства и архитектуры. 2017. № 4 (48). С. 21-28.
15. Ядгаров У. Т. О затухании волн в структурно неоднородных упругих средах // Молодой ученый. 2016. №2. С. 280-282.
16. Жоголева О. А., Гиясов Б. И., Федорова О. О. Методика определения звукоизоляции ограждений квартир по условиям защиты от шума // Вестник МГСУ. 2017. №10 (109). С. 1153-1162.
17. Слюсарев Г. В. Развитие и применение неразрушающих методов и средств вибрационного контроля качества железобетонных конструкций : дис. на соиск. учен. степ. д-ра. техн. наук : 05.23.01. : защищена 4.11.03. Ставрополь; Орел, 2003 г. 370 с.

REFERENCES

1. Russian Standard GOST R 53231-2008 Betony. Pravila kontrolya i otsenki prochnosti. [Concrete. Rules of control and strength assessment.]. Moscow : Standartinform, 2010. 31 p.
2. Abeele K. Damage assessment in reinforced concrete using spectral and temporal nonlinear vibration techniques. *Cement and concrete research*. No 30. 2002. Pp. 1453—1464.
3. Zhang W. Application of wide band AE sensor in model test of reinforced concrete structures. 17th World conference on nondestructive testing (25–28 oct. 2008 y., Shanghai, China). Shanghai, 2008. Pp. 362–369.
4. Kalashnikov M. O. Diagnostika i kontrol' kachestva stroitel'nykh konstruktсий vibratsionnymi metodami [Diagnostics and quality control of building structures by vibration methods]: 05.23.01 “Stroit. konstruktсий, zdaniya i sooruzheniya” : avtoref. dis. na soisk. uchen. step. kand. tekhn. nauk / Kalashnikov Mikhail Olegovich; [Orlovskiy gos. tekhn. un-t]. Orel. 2011. 23 p.
5. Korobko V. I., Korobko A. V. Kontrol' kachestva stroitel'nykh konstruktсий : Vibroakusticheskiye tekhnologii [Quality control of building structures: Vibroacoustic technologies]. Moscow : Izd-vo ASV, 2003. 288 p.
6. Yurov A. P. Netraditsionnyye vibratsionnyye metody diagnostiki i kontrolya kachestva protyazhennykh zhelezobetonnykh konstruktсий [Non-traditional vibrational methods of diagnostics and quality control of extended reinforced concrete structures]: dis. na soisk. uchen. step. kand. tekhn. nauk : 05.23.01, 05.23.17. : zashchishchena 25.02.05 : utv. 15.06.05. Orel, 2005 g. 135 p.
7. Kim U. A. nondestructive testing method for crack in carbon fiber reinforced concrete with infrared thermography. *Journal key engineering materials*. 2005. No 32. Pp. 2128–2133
8. Limaye B. Need for non-destructive testing (NDT) of reinforced concrete & various ND tests. *National seminar of ISNT Chennai*. 2002. Pp. 472–483.

9. Korobko V. I., Kalashnikova N. G., Kalashnikova O. V. Kontrol' zhestkosti uprugikh plastinok s pomoshch'yu vibratsionnogo metoda [Stiffness control of elastic plates using the vibration method]. *Building and Reconstruction*. 2017. No 6 (74). Pp. 26-31.
10. Korobko V. I., Kalashnikova N. G. Eksperimental'noye opredeleniye osnovnoy chastoty kolebaniy plastinok v vide romba i ravnobedrennogo treugol'nika [Experimental determination of the fundamental oscillation frequency of plates in the form of a rhombus and an isosceles triangle]. *Fundamental'nyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii*. 2018. No 3 (329). Pp. 57-63.
11. Gunger YU. R. Ul'trazvukovoy i vibratsionnyy kontrol' sostoyaniya zhelezobetonnykh stoyek opor i fundamentov vozdukhnykh liniy elektroperedachi [Ultrasonic and vibration monitoring of the state of reinforced concrete struts of supports and foundations of overhead power lines]. *Elektro-info*. 2005. No 11. Pp. 40–43.
12. Abashin Ye. G. Otsenka ploshchadi poperechnogo secheniya rabochey armatury v zhelezobetonnykh balkakh po rezul'tatam vibratsionnykh ispytaniy. [Estimation of the cross-sectional area of the working reinforcement in reinforced concrete beams according to the results of vibration tests]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova*. 2018. No 4. Pp. 26-32.
13. Korobko V. I., Korobko, A. V., Abashin, Ye. G. Sposob opredeleniya modulya uprugosti betona v uprugikh zhelezobetonnykh konstruktsiyakh balochnogo tipa. [A method for determining the modulus of elasticity of concrete in elastic reinforced concrete structures of the beam type]. Patent Russia 2473880, 2013.
14. Abashin Ye. G. Opredeleniye nachal'nogo modulya uprugosti betona po osnovnoy chastote kolebaniy zhelezobetonnykh balok [Determination of the initial modulus of elasticity of concrete by the fundamental frequency of vibrations of reinforced concrete beams]. *Nauchnyy zhurnal stroitel'stva i arkhitektury*. 2017. No 4 (48). Pp. 21-28.
15. Yadgarov U. T. O zatukhanii voln v strukturno neodnorodnykh uprugikh sredakh [Attenuation of waves in structurally inhomogeneous elastic]. *Molodoy uchenyy*. 2016. No 2. Pp. 280-282.
16. Zhogoleva O. A., Giyasov B. I., Fedorova O. O. Metodika opredeleniya zvukoizolyatsii ograzhdeniy kvar-tir po usloviyam zashchity ot shuma [Methodology for determining the sound insulation of apartment fencing according to noise protection]. *Vestnik MGSU*. 2017. No 10 (109). Pp. 1153-1162.
17. Slyusarev G. V. Razvitiye i primeneniye nerazrushayushchikh metodov i sredstv vibratsionnogo kontrolya kachestva zhelezobetonnykh konstruktsiy [Development and application of non-destructive methods and means of vibrational quality control of reinforced concrete structures] : dis. na soisk. uchen. step. d-ra. tekhn. nauk : 05.23.01. : zashchishchena 4.11.03. Stavropol'; Orel, 2003. 370 p.

Информация об авторах:

Абашин Евгений Геннадьевич

ФГБОУ ВО «Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина», г. Орел, Россия,
канд. техн. наук, доц., доцент кафедры агропромышленного и гражданского строительства,
E-mail: evabashin@yandex.ru

Information about authors:

Abashin Evgeniy G.

Orel state agrarian university named after N.V. Parakhin, Orel, Russia,
cand. tech. sc., docent, associate professor of the dep. of agricultural and civil engineering,
E-mail: evabashin@yandex.ru

ТРЕТЬЯ СТАДИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ КРУЧЕНИИ С ИЗГИБОМ (СЛУЧАЙ 2)

ДЕМЬЯНОВ А. И., НАУМОВ Н. В., КОЛЧУНОВ ВЛ. И.

Юго-Западный Государственный Университет, г.Курск, Россия

Аннотация. Предложена расчетная модель сложного сопротивления железобетонных конструкций в зданиях и сооружениях при кручении с изгибом, состоящая из приопорного блока (образованного пространственной трещиной и замыкаемой на нее сжатой зоной бетона, – пространственное сечение k) и второго блока, образуемого вертикальным сечением $I-I$, проходящим перпендикулярно к продольной оси железобетонного элемента по краю сжатой зоны, замыкающей пространственную спиралеобразную трещину. Рассмотрен случай, когда наибольшее влияние на напряженно-деформированное состояние конструкций оказывает действие крутящего момента (случай 2). При этом в качестве расчетных усилий в пространственном сечении учитываются: нормальные и касательные усилия в бетоне сжатой зоны; составляющие осевых и нагельных усилий в рабочей арматуре, пересекаемой спиралеобразной пространственной трещиной.

Составлены разрешающие уравнения, образующие замкнутую систему и записана функция Лагранжа их объединяющая. Используя частные производные построенной функции по всем входящим в нее переменным и приравняв их нулю, составлена дополнительная система уравнений, из которой после соответствующих алгебраических преобразований, получена зависимость, позволяющая отыскивать проекцию опасной пространственной трещины.

Ключевые слова: методика расчета, кручение, напряженно-деформированное состояние, железобетонные конструкции, пространственная трещина, функция Лагранжа.

THIRD STAGE OF STRESSED-DEFORMED CONDITION OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES UNDER TORSION WITH BENDING (CASE 2)

DEMYANOV A. I., NAUMOV N. V., KOLCHUNOV VI. I.

South-Western State University, Kursk, Russia

Abstract. It is proposed a complex resistance computational model of reinforced concrete constructions in buildings and structures under the action torsion with bending. It consists of from the block near the support (formed by a spatial crack and a compressed concrete zone closed by it – a spatial section k) and a second block, which is formed by a vertical cross section $I-I$ passing perpendicularly to the longitudinal axis of the reinforced concrete element along the edge of the compressed zone, which closes the spatial spiral-shaped crack. The case when the greatest influence on the stress-strain state of structures has the effect of torque is considered (case 2). In this case, as the calculated forces are taken into account in the spatial section: normal and tangential forces in the concrete of the compressed zone; components of axial and “dowel” efforts in the working reinforcement, intersected by a spiral spatial crack.

The resolving equations are constructed that form a closed system and the Lagrange function is unified. Using the partial derivatives of the constructed function with respect to all the variables entering into it and equating them to zero, an additional system of equations is constructed. The dependence is obtained after the corresponding algebraic transformations, that allows us to search for the projection of a dangerous spatial crack.

Keywords: calculation methodics, torsion, stress-strain state, reinforced concrete constructions, spatial crack, Lagrange function

Введение

Построение расчетных моделей сложного сопротивления – кручения с изгибом становится все более актуальным [1, 2], во-первых, потому, что таких исследований проведено сравнительно мало [3–9], во-вторых, оно вызвано назревшей необходимостью учета пространственной работы подавляющего большинства железобетонных конструкций все более оригинальных зданий и сооружений, существенно изменяющих архитектурный облик современных городов [10–12]; в-третьих, становится уже общепризнанным постулатом, что нет ничего практичнее хорошей теории их расчета [13–16].

Поэтому целью настоящих исследований является разработка расчетной модели сопротивления железобетонных конструкций при кручении с изгибом любых поперечных сечений, наиболее полно отражающей особенности их действительной работы [2, 12, 17, 18].

Для расчетных усилий составлены разрешающие уравнения равновесия и деформаций. При этом проекция опасной пространственной трещины определяется как функция многих переменных с использованием множителей Лагранжа [13, 15].

Метод

При решении прямой инженерной задачи между внешними воздействиями всегда задано их соотношение ($Q:M:T$). Таким образом, определив одно из них, например, опорную реакцию R_{sup} , легко отыскиваются остальные воздействия, например, M и T . Не следует упускать из виду то, что если какое-то из внешних воздействий явно превосходит остальные, то именно оно должно приниматься в качестве неизвестного.

Из условий равновесия в сечении $I-I$ и в пространственном сечении отыскиваются следующие расчетные параметры (рис. 1): предельная опорная реакция R_{sup} ; высота сжатой зоны x в сечении $I-I$; напряжения в продольной арматуре σ_s в месте пересечения её пространственной трещиной; высота сжатой зоны бетона x_β в вертикальной плоскости, проходящей через конец фронта пространственной трещины; погонное усилие в поперечной арматуре, расположенной у боковых граней пространственного сечения $q_{sw,Q}$, вызываемое поперечной силой; погонное усилие в поперечной арматуре, расположенной у боковых граней пространственного сечения $q_{sw,T}$, вызываемое крутящим моментом; погонное усилие в поперечной арматуре, расположенной у нижней грани пространственного сечения $q_{sw,\sigma}$, вызываемое крутящим моментом.

На рисунке 1 изображены: а) – приопорный блок (образованный пространственным сечением k) и блок, образуемый вертикальным сечением $I-I$, проходящим перпендикулярно к продольной оси железобетонного элемента по краю сжатой зоны, замыкающей пространственную спиралеобразную трещину; б), в), г), д) – вертикальное сечение $I-I$ (III–III), проходящее перпендикулярно к продольной оси железобетонного элемента, эпюры напряжений в сжатом бетоне и растянутой арматуре, а также распределение крутящих моментов в этом сечении; е) – составляющие напряжений бетона сжатой зоны, приложенных в точке б; ж), з), и) – сжатая зона сечения k и эпюры напряжений и деформаций сжатого бетона; к), л), м) – пространственное сечение k с проекциями всех усилий, возникающих в месте проведения сечения.

Касательное напряжение τ_Q и касательное напряжение кручения в сжатом бетоне τ_T , определяются путем проецирования диаграммы $\sigma_i - \varepsilon_i$ на плоскость $\tau - \gamma$ (с учетом распределения пропорционально отношению $Q:T$) и на плоскость $I-I$ и проецированием составляющих напряжений плоскости k на плоскость перпендикулярную продольной оси железобетонного элемента.

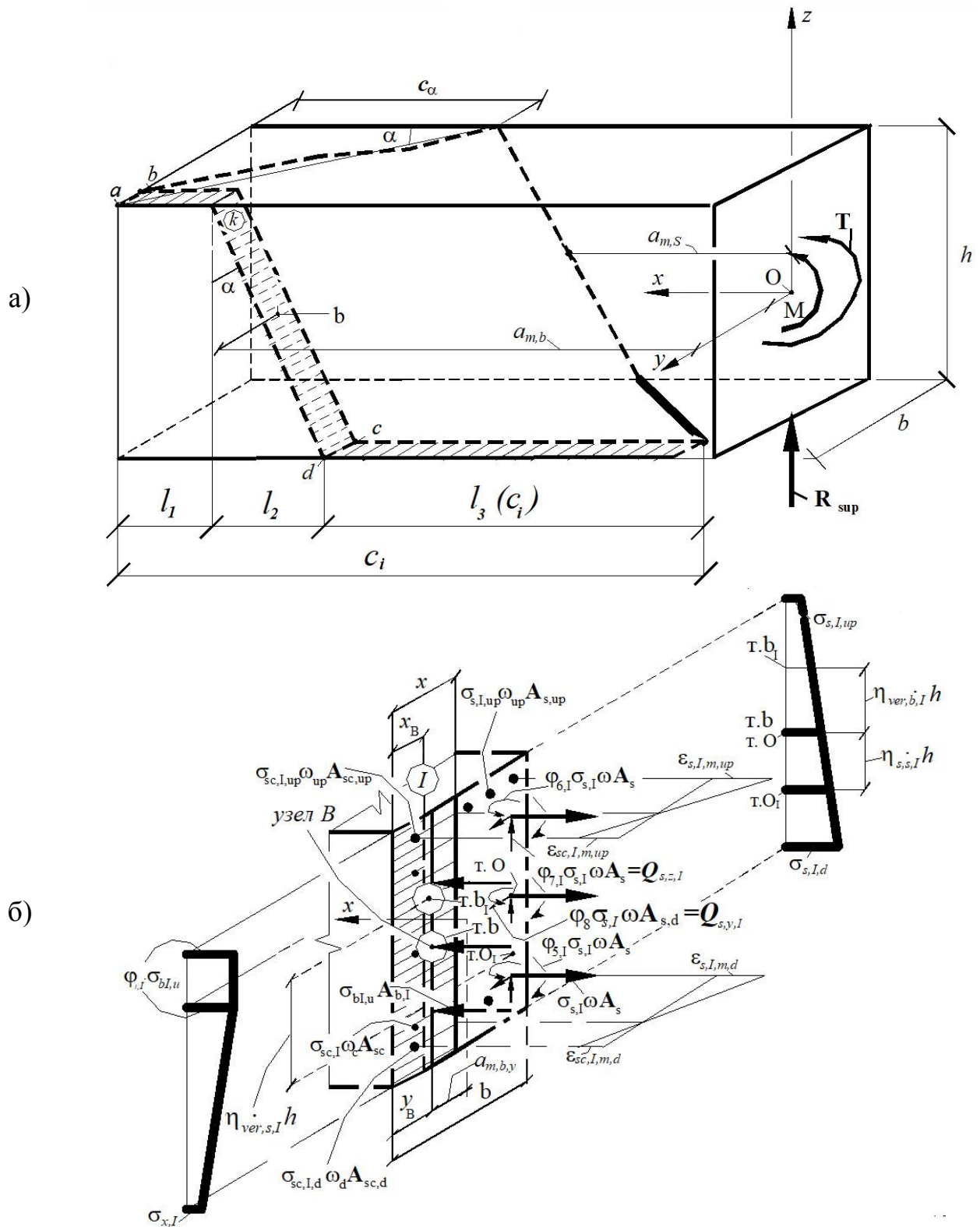


Рисунок 1 - Расчетная схема сопротивления железобетонной конструкции при совместном действии изгибающего момента, крутящего момента и поперечной силы (случай 2), блок с пространственным сечением k (a), блок с сечением I-I (б):

\textcircled{k} – сжатая зона пространственного сечения; \textcircled{I} – сжатая зона сечения I-I;

Вторая схема (первый блок – сечение $I-I$) реализуется при сопротивлении железобетонных элементов, подверженных совместному воздействию крутящих моментов и поперечных сил.

Для построения расчётных уравнений отделим от железобетонного элемента с помощью метода сечений два блока (рис. 1). Первый блок отделяем поперечным сечением $I-I$, проходящим в конце пространственной трещины. Этот блок находится в равновесии под действием внешних усилий, приложенных к блоку со стороны опоры, и внутренних усилий, возникающих в месте проведения сечения.

В основу предлагаемой модели расчета, положены следующие **предпосылки**:

- образование пространственной трещины на нижней грани железобетонного элемента происходит перпендикулярно к направлению главных деформаций удлинения бетона, а расположение конца фронта пространственной трещины у сжатой грани железобетонного элемента совпадает с направлением главных деформаций укорочения бетона – таким образом, пространственная трещина имеет спиралеобразную форму с тремя возможными схемами расположения сжатой зоны – рис. 2;

- в качестве расчетной принимается схема, состоящая из приопорного блока (образуемого пространственной трещиной и вертикальным сечением, проходящим через конец фронта этой трещины в сжатом бетоне) и второго блока, образуемого вертикальным сечением, проходящим перпендикулярно продольной оси железобетонного элемента по краю пространственной трещины – рис. 1, рис. 2;

- в качестве расчетных усилий в пространственном сечении учитываются: нормальные и касательные усилия в бетоне сжатой зоны; составляющие осевых усилий в арматуре, расположенной у грани, противоположной той, у которой находится сжатая зона; составляющие осевых усилий в поперечной арматуре, расположенной у боковых граней железобетонного элемента;

- для средних фибровых деформаций сжатого бетона и растянутой арматуры в сечении $I-I$ считается справедливой гипотеза их пропорциональности высотам сжатой и растянутой зон сечения;

- связь между интенсивностью деформаций ε_i и интенсивностью напряжений σ_i бетона принимается в виде диаграммы, приведенной на рис. 3 а, б (для практических расчетов криволинейная эпюра сжимающих напряжений заменяется на прямоугольную над пространственной трещиной в сечении k (см. рис. 3 в, г), а в сечении $I-I$ на участке x_b – прямоугольной, на участке $x-x_b$ – треугольной).

Образование трещин в бетоне и его разрушение описывается различными теориями прочности, так как причиной образования трещин всегда являются главные деформации отрыва, а причиной разрушения могут быть также и сдвиговые деформации на октаэдрических площадках. Для принятого варианта деформационной теории пластичности бетона [2] предпочтение будем отдавать деформационным критериям прочности, так как для бетона, находящегося в элементах конструкций, возможна экспериментальная проверка только деформаций. Предъявляются также требования возможности непосредственного перехода зависимостей напряжения - деформации к условию прочности.

При составлении уравнений равновесия необходимо также учитывать угол α , связанный с проекцией опасной пространственной трещины с и угол β , определяющий направление главных деформаций укорочения бетона в вертикальном сечении k .

Для построения расчётных уравнений отделим от железобетонного элемента с помощью метода сечений два блока (рис.1). Первый блок отделяем поперечным сечением $I-I$, проходящим в конце пространственной трещины. Этот блок находится в равновесии под действием внешних усилий, приложенных к блоку со стороны опоры, и внутренних усилий, возникающих в месте проведения сечения.

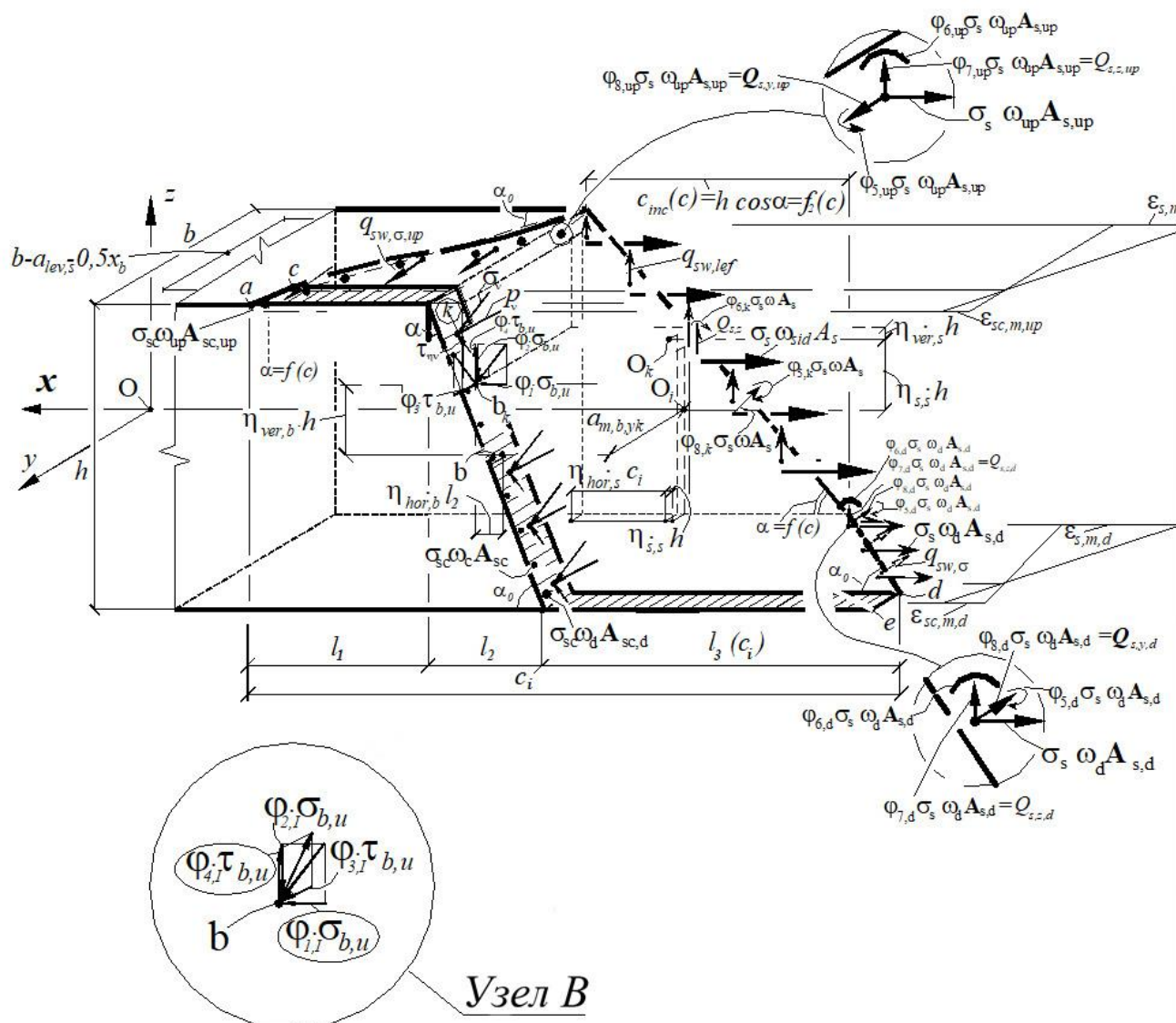
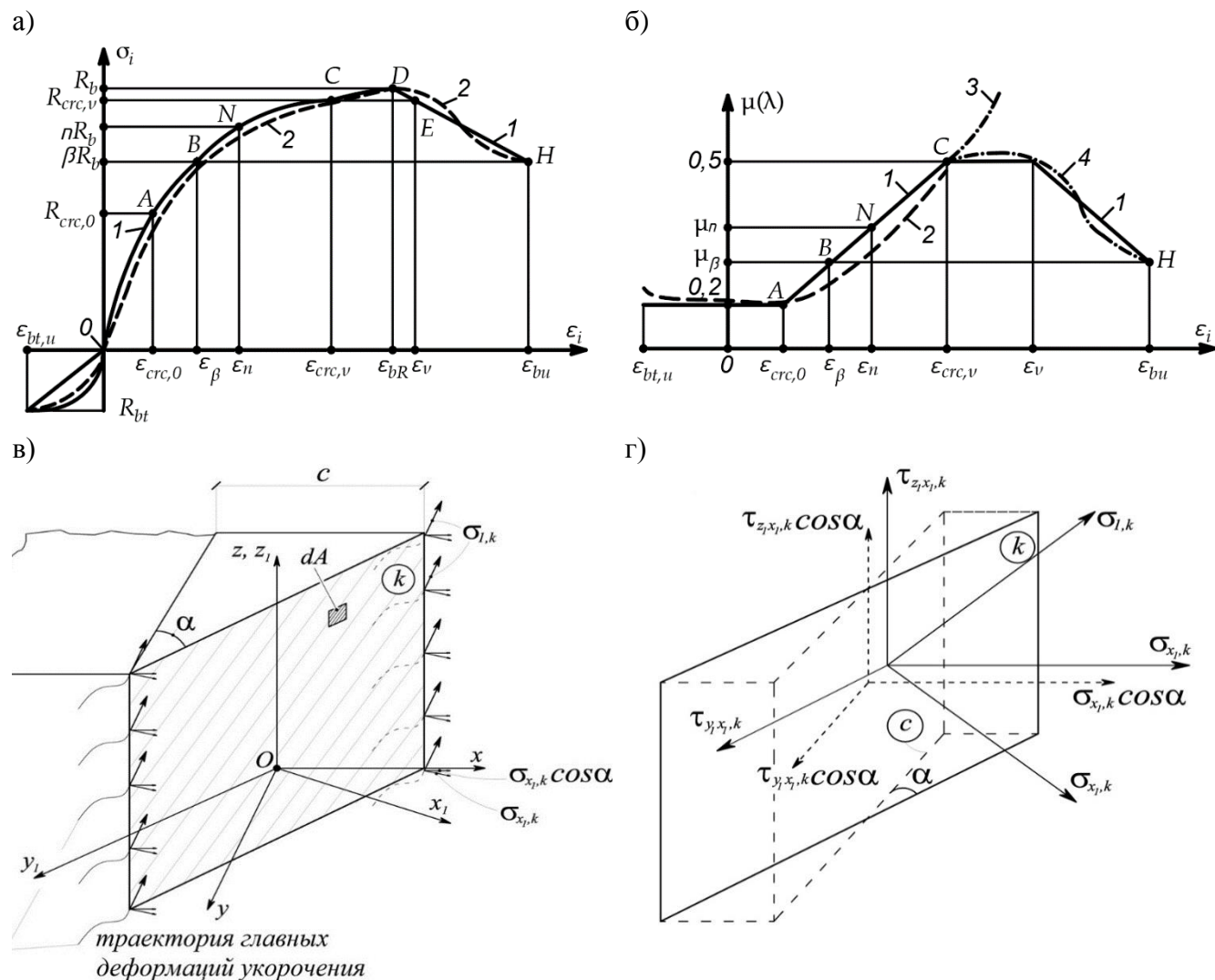


Рисунок 2 - Расчетная схема пространственного сечения к:

(k) – сжатая зона пространственного сечения

Из уравнения равновесия моментов внутренних и внешних сил в сечении *I-I* относительно оси *y*, относительно точки O_1 , проходящей через точку приложения равнодействующей усилий в растянутой арматуре ($\sum M_{O,I}=0$), получим:

$$\begin{aligned} & \sigma_{bu,x,I} \cdot \omega_{b,I} A_{b,I} [b - \varphi_y \cdot x] \cdot \eta_{ver,s,I} \cdot h + \eta_{ver,s,I} \cdot h \cdot R_{sc,I,rig} \sum \cdot \omega_{rig} \cdot A_{sc,rig} + \\ & - (0,5h - a'_s + \eta_{s,s,I} \cdot h) \cdot R_{s,I,up} \cdot \sum \omega_{up} \cdot A_{s,up} + \\ & + (0,5h - a'_s + \eta_{s,s,I} \cdot h) \cdot R_{sc,I,up} \sum \cdot \omega_{up} \cdot A_{sc,up} + \\ & + (0,5h - a_s - \eta_{s,s,I} \cdot h) \cdot R_{s,I,d} \cdot \sum \omega_d \cdot A_{s,d} \\ & - (0,5h - a_s - \eta_{s,s,I} \cdot h) \cdot R_{sc,I,d} \sum \cdot \omega_d \cdot A_{sc,d} - \\ & - K_M K_{pr,M} \cdot R_{sup} - R_{sup} a_{m,S} = 0. \end{aligned} \quad (1)$$



Из уравнения равновесия проекций внутренних и внешних сил, действующих в сечении I-I на ось OZ ($\sum Z = 0$) (нагельные усилия в рабочей арматуре в среднем сечении равны нулю), получим:

$$-\tau_{pl,x} \cdot x \cdot h_0 - \gamma_{Q,t} \tau_{pl,x} \cdot \psi_{R,Q} \cdot h_0 \cdot (b-x) + K_M \cdot R_{sup} = 0 \quad (3)$$

Здесь $\tau_{pl,x}$ – касательное напряжение, определяемое на второй стадии НДС (рис. 4).

Из него определяется

$$\gamma_{Q,t} = \frac{K_M \cdot R_{sup} - \tau_{pl,x} \cdot x \cdot (b-x)}{\tau_{pl,x} \cdot \psi_{R,Q} \cdot h_0 \cdot (b-x)}. \quad (4)$$

При этом, поперечная сила, воспринимаемая бетоном сжатой зоны будет равна:

$$Q_{I,b} = \tau_{pl,x} \cdot x \cdot h_0. \quad (5)$$

В свою очередь, поперечная сила, воспринимаемая бетоном растянутой зоны будет равна:

$$Q_{I,t} = \gamma_{Q,t} \tau_{pl,x} \cdot \psi_{R,Q} \cdot h_0 \cdot (b-x). \quad (6)$$

В качестве неизвестного в систему дифференциальных уравнений зашивается $\gamma_{Q,t}$.

С другой стороны,

$$Q_{I,t} = Q - Q_{I,b}. \quad (7)$$

Последнее равенство может быть использовано для определения параметра $\psi_{R,Q}$, учитывающего наличие смежных пространственных трещин на напряженно-деформированное состояние растянутой зоны среднего сечения I-I:

$$\psi_{R,Q} = \frac{Q - Q_{I,b}}{\gamma_{Q,t} \tau_{pl,x} \cdot h_0 \cdot (b-x)}. \quad (8)$$

Составление последующих уравнений требует некоторых пояснений. Верхняя, нижняя и боковая продольная арматура (при наличии многоярусной), на рис. 1 условно не показаны, чтобы исключить громоздкость изображения. В условиях же равновесия напряжения, возникающие в отмеченной арматуре, учитываются. Исключение составляет лишь уравнение равновесия моментов внутренних и внешних сил, действующих в сечении I-I относительно оси x , перпендикулярной к этому сечению и проходящей через точку приложения равнодействующей усилий в сжатой зоне ($T_{b,f}=0$) (нагельные усилия во всей арматуре в среднем сечении I-I принимаются равными нулю).

В пространственном сечении k для блока 2, отсеченного сложным сечением проходящим, по спиралеобразной пространственной трещине и по ломаному сечению сжатой зоны учитывается вся арматура [12, 19], попадающая в это сечение (рис. 1). При этом в сжатой верхней продольной арматуре, отсекаемой в сечении I-I и III-III нагельный эффект не учитывается, а во всей остальной продольной и поперечной арматуре, составляющие нагельные эффекты, учитываются, – они определяются с привлечением специальной модели второго уровня [1, 2, 13, 15].

Необходимость использования сложного ломанного сечения сжатой зоны бетона обусловлено тем, что ее разрушение происходит (как показали экспериментальные исследования

ния) в некотором объеме, расположенном не по всей длине между точками A и B (рис. 1), а лишь в некотором объеме, расположенном в средней части. При этом разрушение происходит в средней части не вдоль линии AB , а под углом близким к 45° к верхней грани железобетонной конструкции, что и предопределило направление средней части ломанного сечения, где достигается предельное напряженно-деформированное состояние.

На участках сжатой зоны расположенных по краям ломанного сечения напряженно-деформированного состояния изменяется от сечений I-I и III-III до средней зоны по линейным зависимостям, соответственно. При этом высота сжатой зоны уменьшается с увеличением изгибающего момента (рис. 1). Такая расчетная схема в наибольшей степени соответствует действительному сопротивлению, параметры которого находят экспериментальное подтверждение.

Боковые поверхности ломанного сечения в сжатом бетоне совпадают с плоскостями расположения оси (или «размазанной» плоскости) рабочей продольной арматуры. При этом угловая арматура при пересечении ломаным сечением считается расположенной слева для сечения I-I и справа для сечения III-III. Таким образом, она пересекается плоскостями I-I, III-III, соответственно на концевых участках сложного ломаного сечения (рис. 5).

Распределение крутящих моментов в сжатой и растянутой зоне в среднем сечении I-I приведено на рис. 6. При оценке сопротивления железобетонных конструкций прямоугольного и сложных поперечных сечений (состоящих из набора прямоугольников) используется предложенная авторами методика, которая строится на том, что прямоугольное сечение разбивается на ряд квадратов, которые впоследствии заменяются вписанными в них кругами (рис. 6).

Уравнение для определения касательных напряжений кручения $\tau_{\text{sum},A}$ в соответствующей точ-

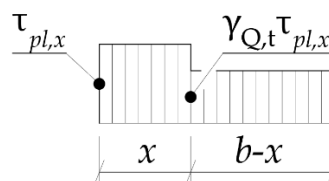


Рисунок 4 - Эпюра касательных напряжений τ_Q в среднем сечении I-I (III-III)

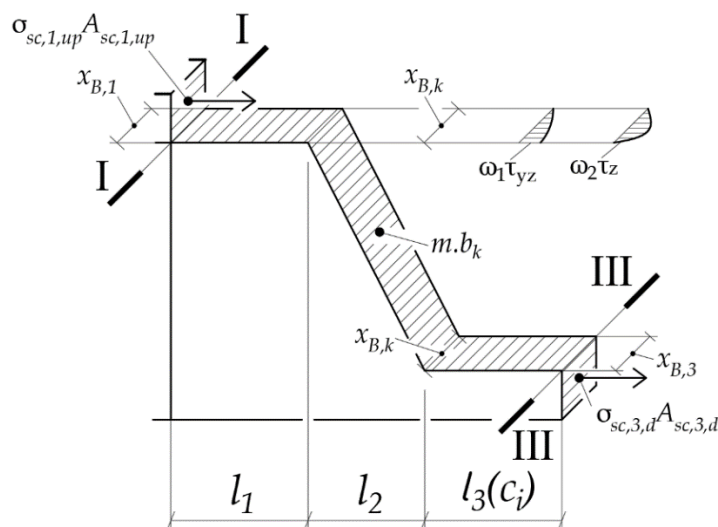


Рисунок 5 - Аппроксимация ломаным сечением сжатой зоны, образованной спиралеобразной пространственной трещиной, а также сечениями I-I и III-III

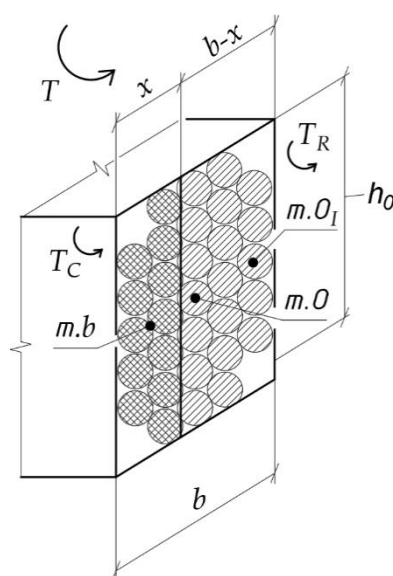


Рисунок 6 - Аппроксимация прямоугольного сечения I-I (III-III) с помощью квадратов и вписанных в них кругов и распределение крутящих моментов в сжатой и растянутой зоне в среднем сечении I-I (III-III)

ке поперечного сечения, расположенной на расстоянии a от опоры, записывается в цилиндрической и декартовой системе координат в соответствии с рис. 6:

$$\begin{aligned} \tau_{\text{sum},A} &= \tau_{t,j,A,\text{cond}} + \tau_{t,i,A,\text{cond}} + \tau_{\text{loc}} + \tau_{\text{conc}} \pm \tau_{\text{conc},\text{loc}} = \frac{M_t}{I_t \cdot \alpha} \cdot r_{j,A} + \frac{M_{t,i}}{I_{t,i} \cdot \alpha} \cdot r_{i,A} + \tau_{\text{loc}} + \tau_{\text{conc}} \pm \tau_{\text{conc},\text{loc}} = \\ &= \frac{M_t}{I_t \cdot \alpha} \cdot \sqrt{y_{j,A}^2 + z_{j,A}^2} + \frac{M_{t,i}}{I_{t,i} \cdot \alpha} \cdot \sqrt{y_{i,A}^2 + z_{i,A}^2} + \tau_{\text{loc}} + \tau_{\text{conc}} \pm \tau_{\text{conc},\text{loc}} \leq \tau_{t,u}, \end{aligned} \quad (9)$$

Здесь $\tau_{t,j,A,\text{cond}}$ и $\tau_{t,i,A,\text{cond}}$ - касательные напряжения в произвольной точке А большого круга, описанного вокруг произвольного поперечного сечения после **“конденсации”** статико-геометрических характеристик сечения **“растворенного”** по этому кругу и касательные напряжения в произвольной точке А малого квадрата-круга после **“конденсации”** соответственно; $r_{j,A}$, $y_{j,A}$, $z_{j,A}$ - расстояния от центра большого круга, описанного вокруг поперечного сечения стержня до произвольной точки А, находящейся в малом j-том круге, в которой определяются значения касательных напряжений кручения τ_t и её координаты в общей системе координат YOZ, соответственно; M_t - крутящий момент, действующий в поперечном сечении стержня; I_t - площадь и полярный момент инерции поперечного сечения стержня, аппроксимированного малыми квадратами - кругами, соответственно; τ_{conc} , $\tau_{\text{conc},\text{loc}}$ - касательные напряжения, обусловленные силовой, геометрической и межсредовой концентрацией деформаций, а также составляющие, вызванные местной концентрацией; $r_{i,A}$, $y_{i,A}$, $z_{i,A}$ - расстояния от центра малого i-того круга до произвольной точки А, находящейся в малом i-том круге, в которой определяются значения касательных напряжений кручения τ_t и её координаты в местной системе координат $Y_iO_iZ_i$, соответственно; $M_{t,i}$ - крутящий момент, приходящийся на i-тый малый круг, на которые разбито поперечное сечение стержня; $I_{t,i}$ - полярный момент инерции i-того малого круга, на которые разбито поперечное сечение стержня (складывается из собственного полярного момента инерции и добавочного, равного $r_j^2 \cdot A_i$); $\tau_{t,u}$ - предельные значения касательных напряжений кручения.

Момент инерции при кручении в общем случае сложного поперечного сечения, равен сумме моментов инерции квадратов, на которые разбивается сечение с их последующей аппроксимацией кругами, вписанными в эти квадраты (при этом одна из накладываемых частей пересекающихся участков при суммировании входит со знаком «минус», а угловые участки, в виду их незначительного влияния на значения касательных напряжений, не учитываются):

$$I_t = I_{t,1} + I_{t,2} + \dots + I_{t,j} = \sum I_{t,j}, \quad (10)$$

Моменты кручения, приходящихся на вписанные круги, соответственно определяются:

$$M_{t,1} = M_t \cdot \frac{A_{t,1}}{A_t}; \quad M_{t,2} = M_t \cdot \frac{A_{t,2}}{A_t}; \quad \dots M_{t,j} = M_t \cdot \frac{A_{t,j}}{A_t}. \quad (11)$$

Здесь $A_{t,i}$ - площадь вписанного в соответствующий квадрат малого круга; A_t - площадь прямоугольного поперечного сечения.

Важно отметить, что все геометрические характеристики рассматриваются относительно геометрического центра сложного сечения.

Применительно к среднему сечению I-I, находящемуся в условиях сложного сопро-

тивления – кручения с изгибом (рис. 6), целесообразно учитывать тот факт, что значительная часть этого сечения подвержена растяжению. Известно [1, 2, 15, 20], что в растянутом бетоне имеют место целый ряд пространственных смежных трещин, оказывающих влияние на напряженно-деформированное состояние среднего сечения I–I. Будем учитывать такое влияние смежных трещин с помощью параметра $\psi_{R,T}$.

Если вдоль продольной оси железобетонной конструкции крутящий момент изменяется, то вводится дополнительная зависимость, – пропорциональное соотношение между крутящими моментами в сечении k и в сечении I–I.

$$\frac{K_T \cdot K_{pr,T} \cdot M_{t,I}}{M_{t,k}} = \frac{a}{c_i - 0,5b \cdot \sin \alpha_0}, \quad M_{t,I} = \frac{a \cdot M_{t,k}}{K_T \cdot K_{pr,T} \cdot (c_i - 0,5b \cdot \sin \alpha_0)}. \quad (12)$$

Здесь K_T – числовой коэффициент, учитывающий статическую схему нагружения с позиций дополнительных крутящих моментов по длине стержня; $K_{pr,T}$ – коэффициент, соотношения (оно известно, – задается) между R_{sup} и T . Здесь a – расстояние по горизонтали от центра опоры до сечения I–I.

Зная, что $\tau_{sum,A}$ из уравнения (9) на третьей стадии равен $\tau_{t,u}$, можно найти крутящий момент, приходящийся на j -ый круг сжатой зоны в сечении I–I по формуле:

$$T_c = M_{t,c} = \frac{\tau_{t,u} \cdot I_{t,j}}{\sqrt{y^2 + z^2}}. \quad (13)$$

Выполняя суммирование всех $M_{t,j}$ для всех j -ых кругов m расположенных в сжатой зоне сечения I–I будем иметь суммарный крутящий момент, воспринимаемый сжатой зоной бетона:

$$M_{t,c} = \sum_{j=1}^m M_{t,j}. \quad (14)$$

В свою очередь, крутящий момент, воспринимаемый бетоном растянутой зоны будет равен:

$$T_R = M_{t,R} = \frac{\tau_{t,u} \cdot \psi_{R,T} \cdot I_{t,j}}{\sqrt{y^2 + z^2}}, \quad (15)$$

где $\psi_{R,T}$ – параметр, учитывающий наличие смежных пространственных трещин на напряженно-деформированное состояние обусловленное кручением растянутой зоны среднего сечения I–I.

С другой стороны, вновь возвращаясь к построению общих разрешающих уравнений (рис. 1), здесь может быть использовано уравнение равновесия моментов внутренних и внешних сил, действующих в сечении I–I относительно оси x , перпендикулярной к этому сечению и проходящей через точку приложения равнодействующей усилий в сжатой зоне ($T_{b,I}=0$):

$$M_{t,R} = M_t - M_{t,c}. \quad (16)$$

Из этого уравнения определяется параметр $\psi_{R,T}$, учитывающий влияние смежных пространственных трещин на напряженно-деформированное состояние обусловленное кручением растянутой зоны среднего сечения I–I:

$$\psi_{R,T} = \frac{(M_t - M_{t,c}) \sqrt{y^2 + z^2}}{\tau_{t,u} \cdot I_{t,j}}. \quad (17)$$

Из гипотезы пропорциональности продольных деформаций, находим:

$$\sigma_{s,I} = \frac{\sigma_{bu,x,I} \cdot E_s(\lambda)}{E_b(\lambda)} \cdot \frac{(b - a_s - x)}{x} + \sigma_0 \leq R_{s,I}. \quad (18)$$

Здесь σ_0 – предварительные напряжения в напрягаемой арматуре в момент снижения величины предварительного напряжения в бетоне до нуля при загрузении конструкции внешними силами с учетом потерь предварительного напряжения в напрягаемой арматуре, соответствующих рассматриваемой стадии работы конструкции. Если условие (18) не выполняется, то $\sigma_{s,I}$ полагаем равным $R_{s,I}$.

Второй приопорный блок отделяем от железобетонного элемента пространственным сечением, образуемым спиралеобразной трещиной и вертикальным сечением, проходящим по сжатой зоне бетона через конец фронта пространственной трещины.

Равновесие этого блока обеспечивается выполнением следующих условий.

Сумма моментов всех внутренних и внешних сил, действующих в вертикальной продольной плоскости, по отношению к оси y относительно точки приложения равнодействующей усилий в сжатой зоне равна нулю ($\sum M_{b,k}=0$, блок II).

$$\begin{aligned} & (0,5h - a_{s,d} + \eta_{ver,b}h) \cdot \sum R_{s,d} \cdot \omega_{s,i,d} \cdot A_{s,i,d} - (0,5h - a_{s,up} - \eta_{ver,b}h) \cdot \sum R_{s,up} \cdot \omega_{s,i,up} \cdot A_{s,i,up} + \\ & + \varphi_{6,up} \cdot \sum R_{s,up} \cdot \omega_{s,i,up} \cdot A_{s,i,up} + \varphi_{6,k} \cdot \sum R_s \cdot \omega_{s,i} \cdot A_{s,i} + \varphi_{6,d} \cdot \sum R_{s,d} \cdot \omega_{s,i,d} \cdot A_{s,i,d} + \\ & + \varphi_{7,up} \cdot \left[\frac{1}{3} \left(b - a_{lev,S} - \frac{0,5x_b}{\sin \alpha} \right) \cos \alpha + 0,5l_2 - \eta_{hor,b} \cdot l_2 \right] \cdot \sum R_{s,up} \cdot \omega_{s,i,up} \cdot A_{s,i,up} + \\ & + \varphi_{7,k} \cdot (\eta_{hor,b} \cdot l_2 - \eta_{s,s} \cdot h) \cdot \sum R_s \cdot \omega_{s,i} \cdot A_{s,i} + \\ & + \varphi_{7,d} \cdot \left[\frac{1}{3} \left(b - a_{lev,S} - \frac{0,5x_b}{\sin \alpha} \right) \cos \alpha + 0,5l_2 + \eta_{hor,b} \cdot l_2 \right] \cdot \sum R_{s,d} \cdot \omega_{s,i,d} \cdot A_{s,i,d} + \\ & + (0,5h - a_{s,d} + \eta_{ver,b}h) \cdot \sum R_{sc,up} \omega_{sc,i,up} A_{sc,i,up} - (0,5h - a_{s,up} - \eta_{ver,b}h) \cdot \sum R_{sc,d} \omega_{sc,i,d} A_{sc,i,d} + \\ & + \sigma_{s,sid,k} \cdot z_{i,up} \cdot \sum \omega_{s,i,sid} A_{s,i,sid} - \sigma_{s,sid,k} \cdot z_{i,d} \cdot \sum \omega_{s,i,sid} A_{s,i,sid} + \\ & + q_{sw,lef} \omega_{sw,i,lef} \cdot f_2(c) \cdot z_{i,up,sw} - q_{sw,lef} \omega_{sw,i,lef} \cdot f_2(c) \cdot z_{i,d,sw} + \\ & - K_M \cdot K_{pr,M} \cdot R_{sup} - R_{sup} \cdot (a_{m,b} + \eta_{hor,b} \cdot l_2) = 0, \end{aligned} \quad (19)$$

где $a_{m,b}$ – расстояние по горизонтали от опоры до центра тяжести сжатой зоны бетона в сечении k ; φ_5 , $\varphi_{6,up}$, $\varphi_{6,d}$, $\varphi_{6,k}$, $\varphi_{7,up}$, $\varphi_{7,d}$, – параметры, учитывающие составляющие «нагельного» эффекта в арматуре (на каждом шаге итерации учитываются как константы, а не как функции и определяются на основании модели второго уровня); другие геометрические параметры, приведенные в формуле (19), показаны на рис. 1; $z_{i,up}$ – расстояние от боковой арматуры, которая расположена выше т. b_k ; $z_{i,d}$ – расстояние от боковой арматуры, которая расположена ниже т. b_k ; $z_{i,up,sw}$ – расстояние от центра тяжести (отыскивается через $\omega_{sw,i,lef}$) погонного усилия в хомутах, расположенных на боковой грани, выше т. b_k ; $z_{i,d,sw}$

– расстояние от центра тяжести (отыскивается через $\omega_{sw,i,lef}$) погонного усилия в хомутах, расположенных на боковой грани, ниже т. b_k .

Боковая сжатая арматура в этом уравнении не учитывается в виду малости ее плеч относительно точки b_k (из-за малости параметра x_B);

Из уравнения (19) определяется неизвестное $\sigma_{s,sid,k}$ на боковой левой грани.

Сумма проекций всех сил, действующих в пространственном сечении на ось x равна нулю ($\sum X=0$, блок II).

$$\begin{aligned} & \sum R_{s,up} \cdot \omega_{s,i,up} \cdot A_{s,i,up} + \sigma_{s,sid,k} \cdot \sum \omega_{s,i,sid} A_{s,i,sid} + \sum R_{s,d} \cdot \omega_{s,i,d} \cdot A_{s,i,d} - \\ & - \sum R_{sc,up} \omega_{sc,i,up} A_{sc,i,up} - \sum R_{sc,d} \omega_{sc,i,d} A_{sc,i,d} - \\ & - \sum R_{sc,rig} \cdot \omega_{sc,rig} \cdot A_{sc,rig} - (\varphi_{10} \cdot \sigma_{bu,x,I} \cdot \varphi_1) \cdot \omega_b \cdot x_B \cdot \sqrt{l_2^2 + h^2}, \end{aligned} \quad (20)$$

где ω_b , φ_{10} принимаются на каждой итерации в виде констант.

Из этого уравнения отыскивается неизвестное x_B .

Первый случай на ось блок II ($\sum Y=0$), а для второго случая это будет уравнение ($\sum Y=0$).

$$\begin{aligned} & -q_{sw,\sigma,up} \cdot \frac{(b-a_{up,s}-x_b)}{\sin \alpha_0} \cdot \omega_{up} + q_{sw,\sigma} \cdot \frac{(b-a_{d,s}-x_b)}{\sin \alpha_0} \cdot \omega - \varphi_{8,up} R_s \sum \omega_{up} A_{s,up} + \\ & + \varphi_{8,k,sid} R_{s,sid} \sum \omega_{k,sid} A_{s,sid} + \varphi_{8,d} R_s \sum \omega_d A_{s,d} = 0 \end{aligned} \quad (21)$$

Из уравнения (21) отыскивается неизвестное $q_{sw,\sigma,up}$.

Сумма моментов внутренних и внешних сил в вертикальной поперечной плоскости относительно оси x , проходящей через точку приложения равнодействующей усилий в сжатой зоне равна нулю ($\sum T_{b,k}=0$, блок II):

$$\begin{aligned} & -\frac{\tau_{t,u} \cdot I_{t,j}}{\sqrt{y^2 + z^2}} \cdot \sin \alpha_0 - \frac{\tau_{t,u} \cdot \psi_{R,T} \cdot I_{t,j}}{\sqrt{y^2 + z^2}} \cdot \sin \alpha_0 + \\ & + \varphi_{7,up} R_s \sum \omega_{up} A_{s,up} \cdot (b-a_{s,up}-0,5 \cdot x) + \varphi_{7,d} R_s \sum \omega_d A_{s,d} \cdot (b-a_{s,d}-0,5 \cdot x) + \\ & + \varphi_{7,k} R_s \sum \omega \cdot A_s \cdot (b-a_{s,lef}-0,5 \cdot x) + \\ & + \varphi_{8,up} R_s \sum \omega_{up} A_s \cdot (0,5h-a_{s,up}-\eta_{ver,b}h) + \varphi_{8,k} R_s \sum \omega \cdot A_s \cdot \eta_{ver,b}h + \\ & + \varphi_{8,d} R_s \sum \omega_d A_s \cdot (0,5h-a_{s,up}+\eta_{ver,b}h) + \\ & + q_{sw,\sigma,up} (0,5h_0-a_{s,up}-\eta_{ver,b}h) + q_{sw,\sigma} (0,5h_0-a_{up,s}+\eta_{ver,b}h) + \\ & + q_{sw,lef} \cdot h \cdot \cos \alpha \cdot (b-a_{lev,s}-0,5x_B) - K_T \cdot K_{pr,T} \cdot R_{sup} - R_{sup} (0,5b-0,5x_B) = 0 \end{aligned} \quad (22)$$

где K_T – числовой коэффициент, учитывающий статическую схему нагружения с позиций дополнительных крутящих моментов по длине стержня; $K_{pr,T}$ – коэффициент, соотношения (оно известно, – задается) между R_{sup} и T .

Из уравнения (22) отыскивается неизвестное $q_{sw,\sigma,up}$.

Выводы

1. В работе предложена расчетная модель сложного сопротивления железобетонных конструкций в зданиях и сооружениях при кручении с изгибом. В состав модели входят опорный блок (образуемый пространственной трещиной и замыкаемой на нее сжатой зоной бетона, – пространственное сечение k) и второй блок, образуемый вертикальным сечением I–I, проходящим перпендикулярно к продольной оси железобетонного элемента по краю сжатой зоны, замыкающей пространственную спиралеобразную трещину.

2. В рассмотрение взят случай, когда из трех внешних воздействий при кручении с изгибом (Q, M, T) наибольшее влияние на напряженно-деформированное состояние конструкций оказывает действие крутящего момента T (случай 2). В предложенной модели при рассмотрении нормального сечения I–I (III–III) и пространственного сечения k учитываются: предельная опорная реакция R_{sup} , высота сжатой зоны бетона в нормальном сечении $x_{B,I}$, коэффициент для определения поперечной силы $\gamma_{Q,t}$, напряжение продольной арматуры в нормальном сечении $\sigma_{s,I}$, напряжение боковой арматуры в пространственном сечении $\sigma_{s,sid,k}$, высота сжатой зоны пространственного сечения $x_{B,k}$, погонное усилие в поперечной арматуре, расположенной у боковых, верхней и нижней граней $q_{sw,\sigma,up}, q_{sw,\sigma}, q_{sw,\sigma,lef}$ нормальные напряжения в бетоне $\sigma_{bu,x,I}$, составляющие осевых напряжений в рабочей арматуре, пересекемой пространственной трещиной $\sigma_{s,up}, \sigma_{sc,up}, \sigma_{s,d}, \sigma_{sc,d}$, касательные усилия в бетоне $\omega_1 \tau_{yz}, \omega_2 \tau_z$; составляющие нагельных усилий в рабочей арматуре, пересекемой пространственной трещиной k , а также длины проекций частей пространственной трещины на горизонтальную ось $l_1, l_2, l_3(c_i)$.

3. При оценке сопротивления железобетонных конструкций прямоугольного и сложных поперечных сечений (состоящих из набора прямоугольников) используется предложенная авторами методика, которая строится на том, что прямоугольное сечение разбивается на ряд квадратов, которые впоследствии заменяются вписанными в них кругами.

4. Составлены разрешающие уравнения для предложенной модели, образующие замкнутую систему и записана функция Лагранжа их объединяющая. Используя частные производные построенной функции по всем входящим в нее переменным и приравнивая их нулю, составлена дополнительная система уравнений, из которой после соответствующих алгебраических преобразований, получена зависимость, позволяющая отыскивать проекцию опасной пространственной трещины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голышев А. Б., Колчунов В. И., Сопротивление железобетона. Киев: Основа, 2009. 432 с.
2. Бондаренко В. М., Колчунов В. И. Расчетные модели силового сопротивления железобетона. М.: ACB, 2004. 472 с.
3. Jariwalaa V. H., Patel P. V., Purohit S. P. Strengthening of RC Beams subjected to Combined Torsion and Bending with GFRP Composites // Procedia Engineering. 2013. Vol. 51. Pp. 282–289.
4. Thomas A., Hameed A. S. An Experimental Study On Combined Flexural And Torsional Behaviour Of RC Beams // International Research Journal of Engineering and Technology. 2017. Vol. 04. Issue 05. Pp. 1367–1370.
5. Rahal K. Combined Torsion and Bending in Reinforced and Prestressed Concrete beams Using Simplified Method for Combined Stress-Resultants // ACI Structural Journal. 2007. Vol. 104. №4. Pp. 402–411.
6. Колчунов В. И., Сальников А. С. Экспериментальные исследования трещинообразования железобетонных конструкций при кручении с изгибом // Строительство и реконструкция. 2016. №3 (65). С. 24–32.
7. Демьянов А. И., Сальников А. С., Колчунов В. И. Экспериментальные исследования железобетонных конструкций при кручении с изгибом и анализ их результатов // Строительство и реконструкция. 2017. №4 (72). С. 17–26.
8. Демьянов А.И., Покусаев А.А., Колчунов В. И. Экспериментальные исследования железобетонных конструкций при кручении с изгибом // Строительство и реконструкция. 2017. №5 (73). С. 5–14.

9. Демьянов А. И., Колчунов В. И., Покусаев А. А. Экспериментальные исследования деформирования железобетонных конструкций при кручении с изгибом // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2017. №6. С. 37–44.
10. Santhakumar R., Dhanaraj R., Chandrasekaran E. Behaviour of retrofitted reinforced concrete beams under combined bending and torsion: A numerical study // *Electronic Journal of Structural Engineering*. 2007. № 7. Pp. 1–7.
11. Kalkan I., Kartal S. Torsional Rigidities of Reinforced Concrete Beams Subjected to Elastic Lateral Torsional Buckling // *International Journal of Civil and Environmental Engineering*. 2017. Vol. 11. №7. Pp. 969–972.
12. Salnikov A., Kolchunov V.I., Yakovenko I. The computational model of spatial formation of cracks in reinforced concrete constructions in torsion with bending // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vols. 725-726 (2015). Pp. 784–789.
13. Iakovenko I., Kolchunov V.I. 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. 15(2017)3. Article 455. Pp. 366–375. doi:10.5937/jaes15-14662
14. Демьянов А. И., Колчунов В. И., Яковенко А. Разработка универсального короткого двухконсольного элемента к сопротивлению железобетонных конструкций при кручении с изгибом // *Известия ВУЗов. Технология текстильной промышленности*. 2017. №4 (367). С. 258–263.
15. Iakovenko I., Kolchunov V., Lyman I. Rigidity of reinforced concrete structures in the presence of different cracks // *MATEC Web of Conferences*. 6th International Scientific Conference «Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings». Transbud-2017. Kharkiv, Ukraine, April 19–21. 2017. Vol. 0216. 12 p.
16. Pettersen J. S. Non-Linear Finite Element Analyses of Reinforced Concrete with Large Scale Elements: Including a Case Study of a Structural Wall // *Norwegian University of Science and Technology*. 2014. 85 p.
17. Nahvi H., Jabbari M. Crack detection in beams using experimental modal data and finite element model // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2005. Vol. 47. Pp.1477–1497.
18. Demyanov A., Kolchunov V.I. The dynamic loading in longitudinal and transverse reinforcement at instant emergence of the spatial crack in reinforced concrete element under the action of a torsion with bending // *Journal of Applied Engineering Science*. Vol. 15(2017)3. Article 456. Pp. 375–380. doi:10.5937/jaes15-14663
19. Демьянов А. И., Колчунов В. И., Сальников А. С., Михайлов М. М. Расчетные модели статико-динамического деформирования железобетонной конструкции при кручении с изгибом в момент образования пространственной трещины // *Строительство и реконструкция*. 2017. №3 (71). С. 13–22.
20. Колчунов В. И., Демьянов А. И., Яковенко И. А., Гарба М. О. Проблема приведения в соответствие опытных данных трещиностойкости железобетонных конструкций их теоретическим значениям // *Наука та будівництво*. 2018. №1 (15). С. 42-49.

REFERENCES

1. Golyshev A. B., Kolchunov V. I. *Soprotivleniye zhelezobetona* [The resistance of reinforced concrete], Kiev: Basis, 2009. 432 p. (rus)
2. Bondarenko V. M., Kolchunov V. I. *Raschetnye modeli silovogo soprotivleniya zhelezobetona* [The computational model of a power resistance of reinforced concrete]. Moscow: ASV, 2004. 472 p. (rus)
3. Jariwalaa V. H., Patel P. V., Purohit S. P. Strengthening of RC Beams subjected to Combined Torsion and Bending with GFRP Composites. *Procedia Engineering*. 2013. Vol. 51. Pp. 282–289.
4. Thomas A., Hameed A. S. An Experimental Study On Combined Flexural And Torsional Behaviour Of RC Beams. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2017. Vol. 04. Issue 05. Pp. 1367–1370.
5. Rahal K. 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. Kolchunov V.I., Salnikov A.S., *Eksperimentalnyye issledovaniya treshchinoobrazovaniya zhelezobetonnykh konstruktсий pri kruchenii s izgibom* [Experimental studies of crack formation of reinforced concrete structures under action torsion with bending]. *Building and Reconstruction*. 2016. No. 65 (3). Pp. 24–32. (rus)
7. Demyanov A. I., Salnikov A. S., Kolchunov V. I. *Eksperimentalnyye issledovaniya zhelezobetonnykh konstruktсий pri kruchenii s izgibom i analiz ikh rezultatov* [The experimental investigations of reinforced concrete constructions under the action torsion with bending and analysis of their results]. *Building and Reconstruction*. 2017. No. 72 (4). Pp. 17–26. (rus)
8. Demyanov A. I., Pokusaev A. A., Kolchunov V. I. *Eksperimentalnyye issledovaniya deformirovaniya zhelezobetonnykh konstruktсий pri kruchenii s izgibom* [The experimental investigations of deformation reinforced concrete structures under the action torsion with bending]. *Building and Reconstruction*. 2017. No. 73 (5). Pp. 5–14. (rus)
9. Demyanov A. I., Kolchunov V. I., Pokusaev A. A. *Eksperimentalnyye issledovaniya deformirovaniya zhelezobetonnykh konstruktсий pri kruchenii s izgibom* [The experimental investigations of deformation reinforced concrete structures under the action torsion with bending]. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2017. No. 6. Pp. 37–44. (rus)
10. Santhakumar R., Dhanaraj R., Chandrasekaran E. Behaviour of retrofitted reinforced concrete beams under combined bending and torsion: A numerical study. *Electronic Journal of Structural Engineering*. 2007. No. 7. Pp. 1–7.
11. Kalkan I., Kartal S. Torsional Rigidities of Reinforced Concrete Beams Subjected to Elastic Lateral Torsional Buckling. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*. 2017. Vol. 11. No. 7. Pp. 969–972.

12. Salnikov A., Kolchunov V.I., Yakovenko I. The computational model of spatial formation of cracks in reinforced concrete constructions in torsion with bending, *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vols. 725-726 (2015) Pp. 784–789.
13. Iakovenko I., Kolchunov V.I. 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. 15(2017)3. Article 455. Pp. 366–375. doi:10.5937/jaes15-14662
14. Demyanov A. I., Kolchunov V.I., Yakovenko I.A. Razrabotka universalnogo korotkogo dvukhkonsolnogo elementa k soprotivleniyu zhelezobetonnykh konstruktсий pri kruchenii s izgibom [The development of universal short double-cantilever element, for resistance of reinforced concrete structures under the action torsion with bending]. *The News of Higher Educational Institutions Technology of Textile Industry*. 2017. No. 367(4). Pp. 258–263. (rus)
15. Iakovenko I., Kolchunov V., Lyamar I. Rigidity of reinforced concrete structures in the presence of different cracks. *MATEC Web of Conferences*. 6th International Scientific Conference «Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings». Transbud-2017. Kharkiv, Ukraine, April 19–21. 2017. Vol. 0216. 12 p.
16. Pettersen J. S. Non-Linear Finite Element Analyses of Reinforced Concrete with Large Scale Elements: Including a Case Study of a Structural Wall. *Norwegian University of Science and Technology*. 2014. 85 p.
17. Nahvi H., Jabbari M. Crack detection in beams using experimental modal data and finite element model. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2005. Vol. 47. Pp.1477–1497.
18. Demyanov A., Kolchunov V.I. The dynamic loading in longitudinal and transverse reinforcement at instant emergence of the spatial crack in reinforced concrete element under the action of a torsion with bending. *Journal of Applied Engineering Science*. 2017. Vol. 15(2017)3. Article 456. Pp. 375–380. doi:10.5937/jaes15-14663
19. Demyanov A. I., Kolchunov V.I., Salnikov A.I., Mikhaylov M.M. Raschetnyye modeli statiko-dinamicheskogo deformirovaniya zhelezobetonnoy konstruktсий pri kruchenii s izgibom v moment obrazovaniya prostanstvennoy treshchiny [Calculation models of static-dynamic deformation of reinforced concrete structure under torsion with a bend at the moment of formation of a spatial crack]. *Building and Reconstruction*. 2017. No. 72(4). Pp. 17–26.
20. Kolchunov V.I., Demyanov A.I., Yakovenko I.A., Garba M.O. Problema privedeniya v sootvetstvie opыtnykh dannykh treshchinostoykosti zhelezobetonnykh konstruktсий ikh teoreticheskim znacheniyam [Bringing the experimental data of reinforced concrete structures crack resistance in correspondence with their theoretical values]. *Science and construction*. 2018. No. 15(1). Pp. 42-49. (rus)

Информация об авторах:

Демьянов Алексей Иванович

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск
канд. техн. наук, доц.
E-mail: speccompany@gmail.com

Наумов Николай Валерьевич

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск
Аспирант
E-mail: kolua199200@yandex.ru

Колчунов Владимир Иванович

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск
Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры уникальные здания и сооружения
E-mail: vlik52@mail.ru

Information about authors:

Demyanov Aleksey I.

South-West State University, Kursk, Russia,
Candidate in Tech. Sc., Docent, Ass. Professor
E-mail: speccompany@gmail.com

Naumov Nikolay V.

South-Western State University, Kursk
Postgraduate student
E-mail: kolua199200@yandex.ru

Kolchunov Vladimir I.

South-Western State University, Kursk
Doctor of technical Sciences, Professor, Professor, Department of unique building and structures
E-mail: vlik52@mail.ru

СТЕНОВЫЕ ПАНЕЛИ НА ОСНОВЕ КАССЕТНЫХ ПРОФИЛЕЙ. ЧАСТЬ 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

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

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

Аннотация. На современном этапе развития ограждающих конструктивных систем широкое применение в качестве стенового ограждения получают конструктивные системы на основе тонкостенных оцинкованных профилей и эффективных утеплителей. Наибольшее распространение получило стеновое ограждение поэлементной сборки. Вместе с тем, появляются новые решения в виде панелей, компонуемых из элементов заводской готовности. Последние помимо технологических преимуществ по сравнению со стенами поэлементной сборки обладают повышенной несущей способностью и жесткостью. В настоящей статье представлено конструктивное решение стеновой 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 стеновое 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 стеновой панели, исследованию деформированного состояния кассетного профиля и оценке сопротивления и жесткости стеновой 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 1. THEORETICAL RESEARCHES

MARTYNOV Y.S., NADOLSKI V.V., 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 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

В настоящее время широкое распространение для стенового ограждения получили конструктивные системы на основе тонкостенных оцинкованных профилей и эффективных утеплителей [1-8]. Особое место занимают конструктивные решения фасадов на основе кассетного профиля, позволяющие достичь всесезонность монтажа и высокую скорость строительства, при этом данные фасады обладают архитектурной выразительностью благодаря возможности выбора практически любой облицовки. Масштабное возведение производственных и общественных зданий (гипермаркеты, логистические комплексы, складские помещения, офисные здания) значительно повлияло на расширение области применения кассетных профилей. Следует также отметить перспективную область применения данного конструктивного решения при реконструкции объектов промышленного назначения, в которых в качестве стенового ограждения использованы трехслойные керамзитобетонные панели. После 30-40 лет эксплуатации, особенно при эксплуатации в условиях негативного воздействия среды, состояние таких панелей не отвечает современным техническим требованиям безопасности, экономическим и эстетическим показателям. Таким образом, использование конструктивных решений для стеновых ограждений, в основе которых лежит применение тонкостенных кассетных профилей, имеет ряд значительных преимуществ: высокие эксплуатационные характеристики; возможность использования различных типов профилированных тонкостенных профилей, различных вариантов теплоизолирующих материалов; резкое снижение трудоёмкости монтажа особенно при реконструкции стенового ограждения зданий и сооружений; эстетическая привлекательность.

Наибольшее распространение получило стеновое ограждение поэлементной сборки, но и появляются новые решения в виде элементов заводской готовности (далее по тексту панелей). В настоящей работе представлено конструктивное решение стеновой самонесущей панели на основе кассетных профилей и профилированного настила [3], объединенных в единую пространственную конструктивную систему [9-11], которой присущи такие важные свойства, как перераспределение внутренних усилий между её компонентами, живучесть и надежность конструкции.

Авторами исследования был выполнен комплекс теоретических и экспериментальных работ. Разработана конструкция стеновой панели на основе кассетных профилей и профилированного настила из нержавеющей стали, исследовано деформированное состояние кассетного профиля и выполнена оценка сопротивления и жесткости стеновой панели с применением расчетного метода [1]. В данной части статьи представлены результаты теоретических исследований.

Вторая часть статьи посвящена экспериментальным исследованиям панели, реализации процедуры проектирования на основе испытаний.

1 Конструктивное решение стеновых панелей на основе кассетных профилей

Разработанное конструктивное решение самонесущих стеновых панелей состоит из кассетных профилей, соединённых между собой стенками и узкими полками; стального профилированного настила, прикрепленного перпендикулярно к узким полкам кассетного профиля и опорных элементов, расположенных по торцам панели. Совместная работа указанных компонентов панели обеспечивается постановкой при их сборке электрозаклепок или вытяжных заклепок «сталь-сталь» из нержавеющей стали.

Существенное влияние на выбор материала любой конструкции оказывает среда эксплуатации. Важнейшим условием обеспечения долговечности тонкостенного стенового ограждения является сведение к минимуму коррозионного воздействия. При эксплуатации в агрессивных средах целесообразно применение нержавеющей стали для всех компонентов стенового ограждения, включая крепежные элементы, а также необходимо исключение

непосредственного контакта указанных компонентов с поверхностью элементов несущего каркаса здания и фахверка, выполненных из углеродистых сталей. При выборе нержавеющей сталей следует руководствоваться таблицей А.1 ТКП EN 1993-1-4 [0]. В представленном исследовании кассетные профили и опорные элементы выполнены из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т.

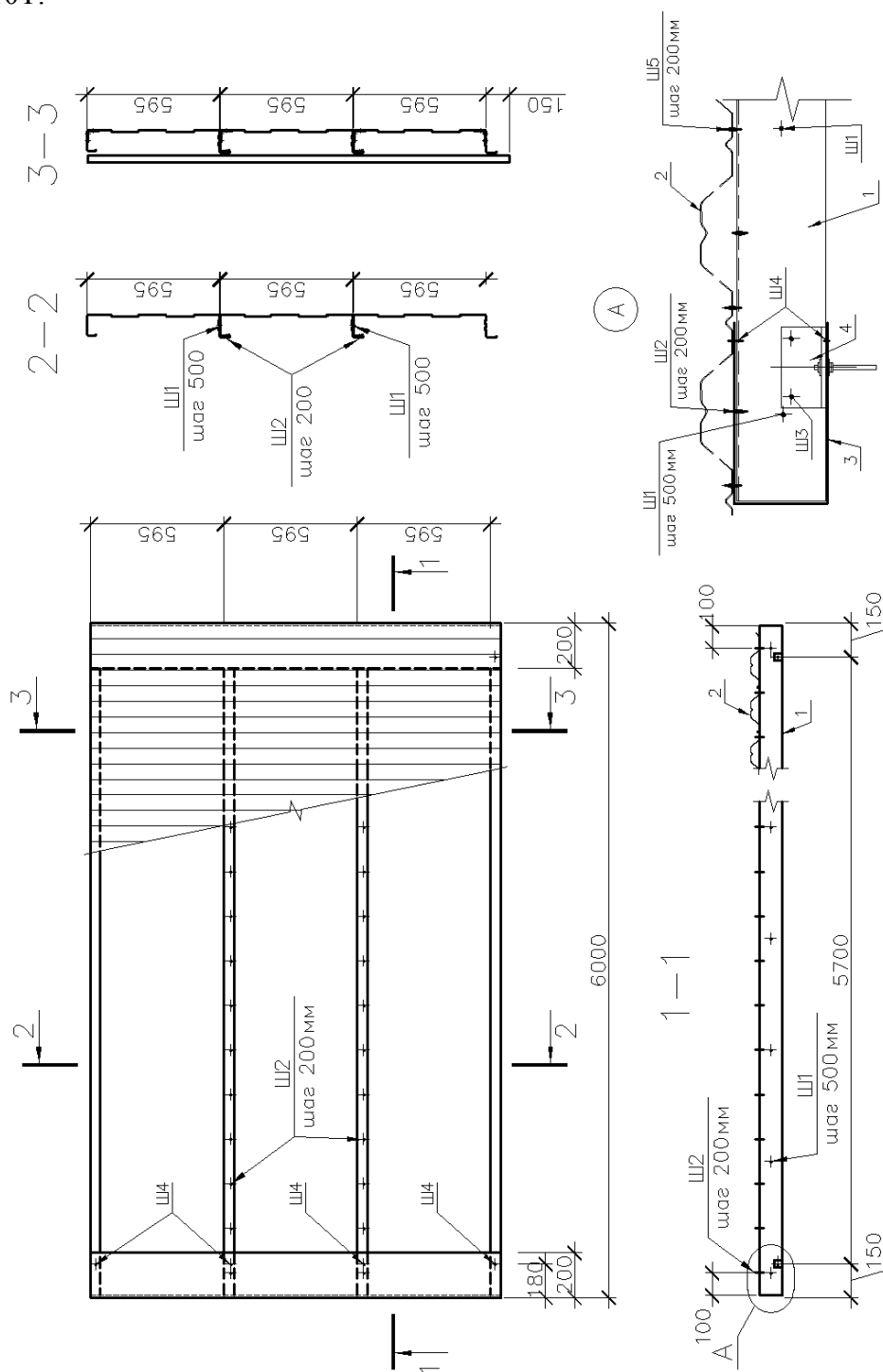


Рисунок 1 – Принципиальное решение стеновой панели: 1 – кассетный профиль; 2 – профилированный настил; 3 – опорный элемент; 4 – деталь крепления; Ш1 – соединение стенок кассетного профиля; Ш2 – соединение узких полок кассетного профиля; Ш3 – соединение крепежной детали с кассетным профилем; Ш4 – соединение опорного элемента с кассетным профилем и профнастилом

Кассетные профили представляют собой большие швеллерообразные профили с двумя узкими полками, двумя стенками и одной широкой полкой. Кассетные профили могут существенно отличаться по геометрии (форме и размерам) из-за разных технологических линий их производства. Для фасадной поверхности панели применен стеновой профилированный настил НС 35-1000-0.8 согласно ГОСТ 24045 [0]. Номинальный пролет настила 600 мм. Расчетная схема – техпролётная неразрезная балка. Опорные элементы установлены по торцам панели. Опорный элемент является одним из компонентов, обеспечивающих пространственную работу панели и надежность крепления панелей к стойкам фахверка. Сечение опорных элементов – неравнополочный гнутый швеллер.

Объединение компонентов в единую пространственную систему предлагается осуществлять электрозаклепками, выполненными контактной точечной сваркой сопротивлением, или вытяжными заклепками. Основной упор сделан на применение двухсторонней точечной сварки (клещами) в максимально возможном объеме. Разработан соответствующий порядок сборки панели, обеспечивающий доступ для выполнения двухсторонней сварки. Таким способом между собой соединяются кассетные профили, опорные элементы, вспомогательные крепежные детали. Для крепления стального профилированного листа к кассетным профилям применены вытяжные заклепки с сердечником и корпусом из нержавеющей стали.

2 Теоретические исследования деформированного состояния кассетного профиля при действии фронтальной нагрузки

Для анализа деформированного состояния кассетного профиля использован метод конечных полос [0, 0], который позволяет оценить уровень критических сил потери устойчивости при соответствующей форме. Исходными данными для моделирования кассетного профиля являются характеристики стали, геометрия сечения, условия закрепления и раскрепления частей сечения, вид напряженного состояния профиля.

Критические силы и формы потери устойчивости кассетного профиля представлены при сжатии узких полок кассетного профиля (наиболее неблагоприятные напряженно-деформированные состояния панели). Эпюра напряжения в профиле принята в предположении действия изгибающего момента M_{Ed} , полученного из условия прочности полного сечения кассетного профиля в упругой стадии, т.е. $M_{Ed} = f_y \cdot W_{el}$.

Для анализа возможных форм потери устойчивости кассетного профиля рассмотрены следующие расчетные модели его работы под нагрузкой:

- отдельный (изолированный) профиль с закреплением только опорных сечений от смещения;
- отдельный (изолированный) профиль с учетом раскреплений верхних полок в горизонтальном направлении по длине профиля;
- профиль в составе стеновой панели.

Ниже приведены результаты для рассмотренных моделей. Для каждой модели получены зависимости коэффициента запаса (множитель, характеризующий уровень напряжений, при котором происходит потеря устойчивости по соответствующей форме) от длины волны потери устойчивости.

2.1 Устойчивость отдельного кассетного профиля

Из анализа зависимости коэффициента запаса от длины волны потери устойчивости (Рисунок 2) видно, что минимальные значения коэффициента запаса составляют 0.75 и 0.7 и соответствует длинам волны 0.2 м и 3.1 м. При длине волны 0.2 м сжатая полка профиля теряет местную устойчивость (рисунок 3а). При длине волны 3.1 м первая форма потери устойчивости отражает потерю общей устойчивости и потерю устойчивости формы сечения (рисунок 3б).

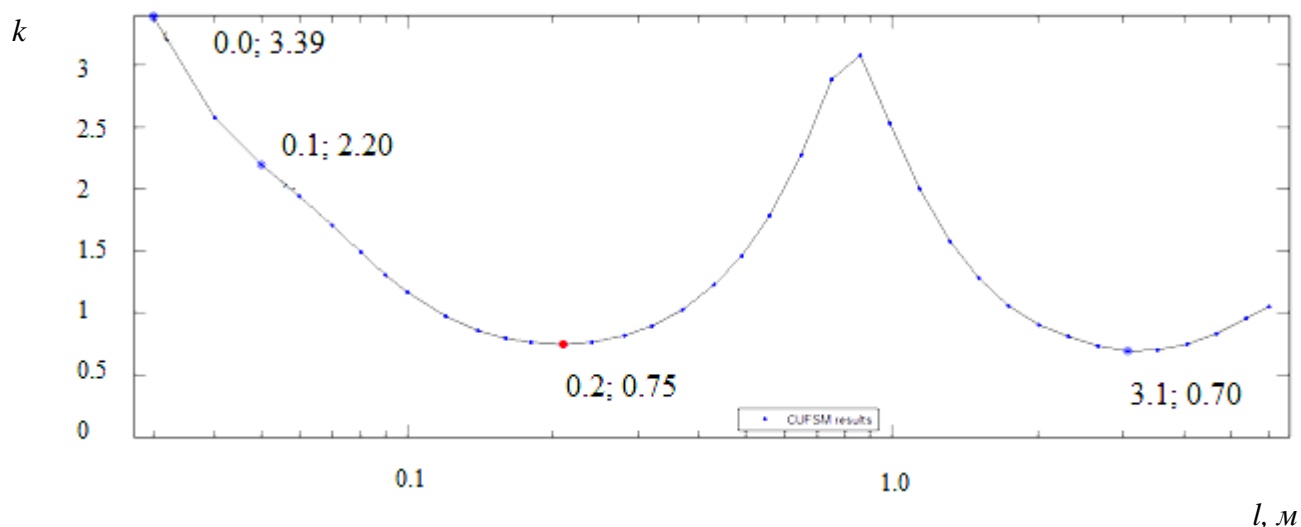


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента запаса k от длины волны l при потере устойчивости

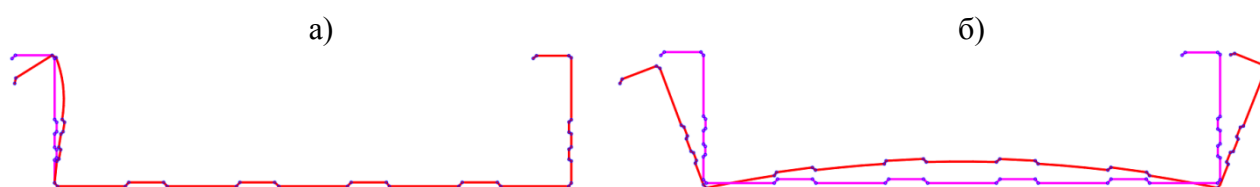


Рисунок 3 – Первая форма потери устойчивости отдельного (изолированного) кассетного профиля:
а) – при длине волны 0.2 м; б) – при длине волны 3.1 м

2.2 Устойчивость отдельного кассетного профиля при раскреплении сжатых узких полок из плоскости

Из анализа зависимости коэффициента запаса по устойчивости от длины волны (рисунок 4) видно, что минимальное значение коэффициента запаса 0.75 соответствует длине волны 0.2 м, т.е. раскрепление сжатых полок из плоскости не повлияло на значение коэффициента запаса по местной устойчивости (сжатой узкой полки кассетного профиля). При этом значительно повысился коэффициент запаса по общей устойчивости и устойчивости формы сечения. Общий характер форм потери устойчивости аналогичен приведенным на рисунках 3а, 3б.

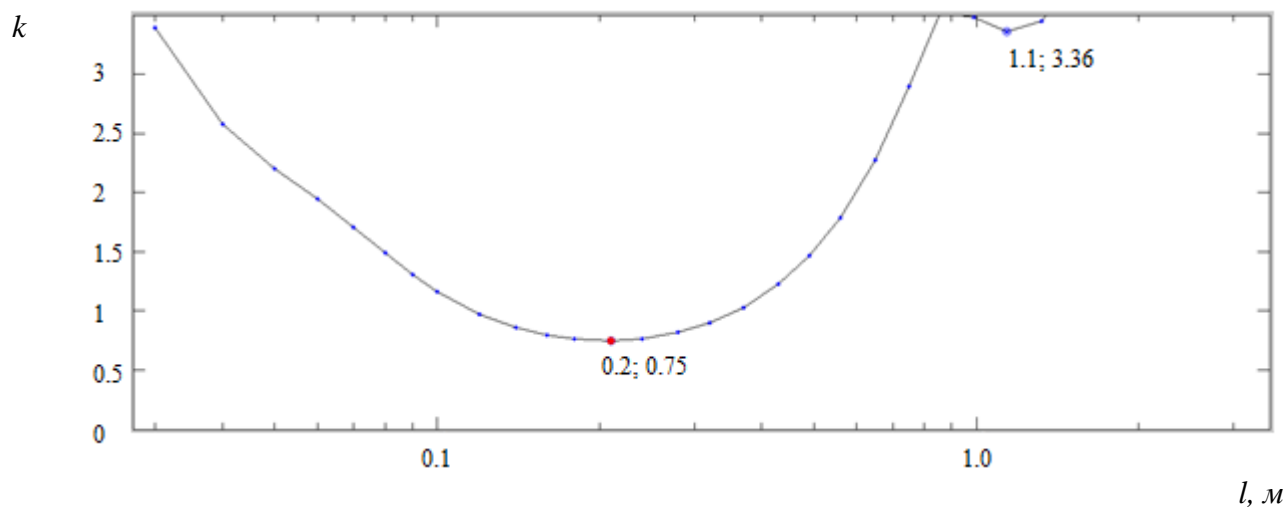


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента запаса k от длины волны l при потере устойчивости при раскреплении сжатых полок из плоскости

2.3 Устойчивость кассетного профиля в составе стеновой панели

Анализ зависимости коэффициента запаса от длины волны потери устойчивости соединённых профилей (в составе панели) увеличились по сравнению с их значениями, полученными для одиночного профиля. Минимальные значения коэффициента запаса 1.18 и 1.17 соответственно для длин волн 0.2 м и 2.3 м. При длине волны 0.2 м профиль теряет местную устойчивость (рисунок 6). При длине волны 2.3 м проявляется потеря устойчивости формы сечения (рисунок 7).

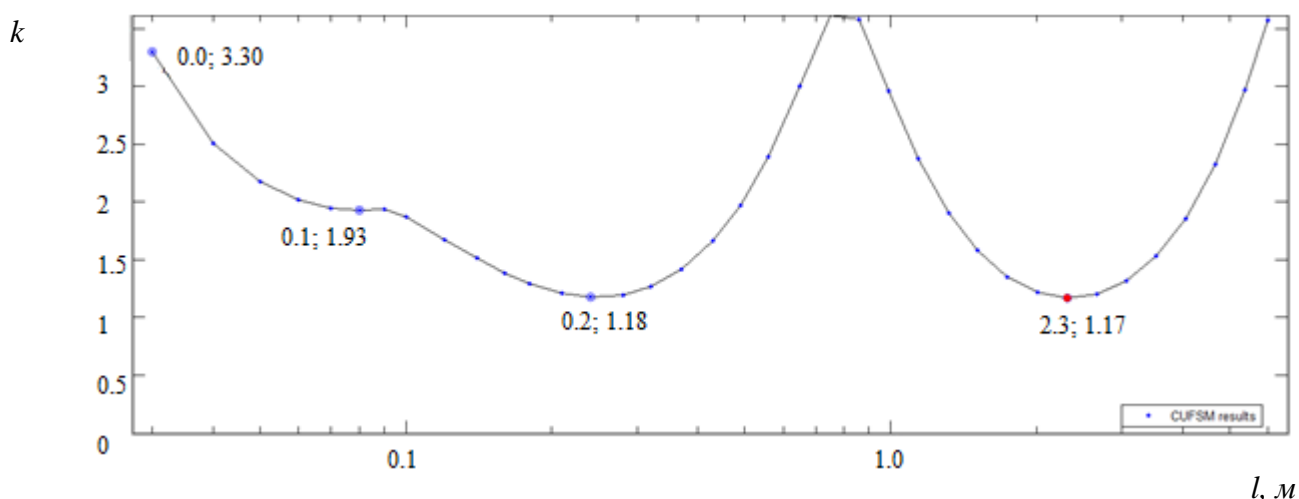


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента запаса k от длины волны l потери устойчивости для кассетного профиля в составе панели

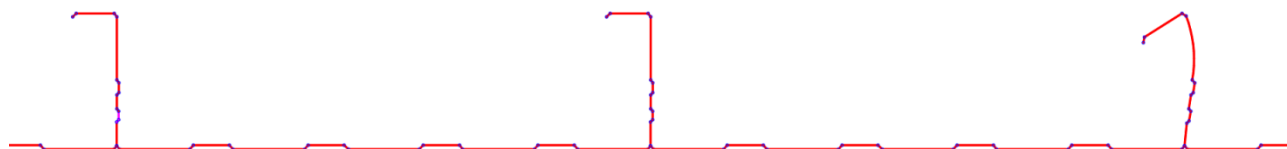


Рисунок 6 – Первая форма потери устойчивости кассетного профиля в составе панели при длине волны 0.2 м

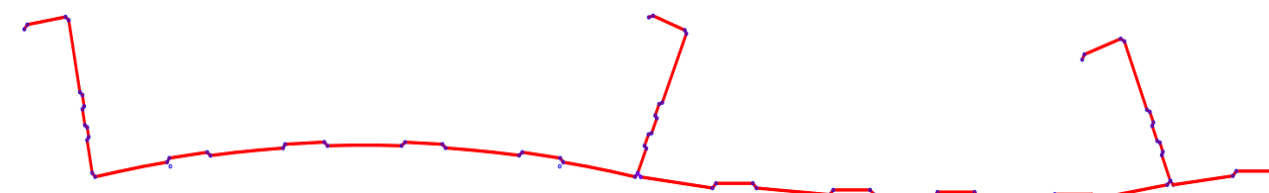


Рисунок 7 – Первая форма потери устойчивости кассетного профиля в составе панели при длине волны 2.3 м

Из анализа напряженно-деформированного состояния видно, что наиболее вероятная форма отказа стеновой панели будет сопровождаться потерей местной устойчивости сжатой полки кассетного профиля.

3. Оценка несущей способности компонентов стеновой панели

Для оценки несущей способности панелей принята расчетная методика, изложенная в ТКП EN 1993-1-3 [0], в котором определены все требования к проектированию профилированных листов и холодноформованных элементов, а также холодноформованных стальных изделий, изготовленных путем холодного формования или прессования из холодно- или го-

рячекатаных полос или листов, как с покрытием, так и без него. В данном техническом кодексе приводятся как расчетные методы проектирования, так и методы использующие результаты испытаний для кассетных профилей, однако следует отметить, что данная методика не в полной мере отражает поведение кассетного профиля в составе панели. Далее представлены результаты оценки несущей способности компонентов панели.

При определении расчетных характеристик профиля учитывалось возможное снижение площади сечения, момента инерции, моментов сопротивления вследствие потери местной устойчивости сжатых частей сечения. В этом случае в качестве расчетного принимается эффективное (редуцированное) сечение, из состава которого исключаются неустойчивые части сечения.

3.1 Сопротивление изгибу кассетного профиля при растяжении широкой полки

Сопротивления изгибу $M_{b,Rd}$ кассетного профиля определяется по следующему выражению (формула 10.21 [0]):

$$M_{b,Rd} = 0,8 \cdot \beta_b \cdot W_{eff,com} \cdot f_{yb} / \gamma_{M0}, \text{ но } M_{b,Rd} \leq 0,8 \cdot W_{eff,t} \cdot f_{yb} / \gamma_{M0},$$

где $W_{eff,com} = I_{y,eff} / z_c$ — момент сопротивления эффективного сечения для сжатого волокна;

$W_{eff,t} = I_{y,eff} / z_t$ — момент сопротивления эффективного сечения для растянутого волокна;

β_b — поправочный коэффициент, учитывающий раскрепление узких полок из плоскости;
 f_{yb} — основной предел текучести.

При этом эффективное сечение кассетного профиля при растяжении широкой полкой рассчитано с использованием поэтапной процедуры (Рисунок 8) ТКП EN 1993-1-3 [0] в следующей последовательности:

- Определение характеристик полного поперечного сечения;
- Определение эффективной ширины широкой (растянутой) полки $b_{u,eff}$, с учетом ее возможного искривления(коробления), по формуле:

$$b_{u,eff} = \frac{53,3 \cdot 10^{10} \cdot e_o^2 \cdot t^3 \cdot t_{eq}}{h \cdot L \cdot b_u^3},$$

где b_u — полная ширина широкой полки;

e_o — расстояние от центральной оси полного поперечного сечения до центральной оси узких полок;

h — общая высота кассетного профиля;

L — пролет кассетного профиля;

t_{eq} — эквивалентная толщина широкой полки, $t_{eq} = (12 I_a / b_u)^{1/3}$;

I_a — собственный момент инерции сечения широкой полки;

Для рассматриваемого профиля:

$$e_o = 113 \text{ мм}; t_{eq} = (12 I_a / b_u)^{1/3} = (12 \cdot 0,24 \text{ см}^4 / 59,5 \text{ см})^{1/3} = 0,36 \text{ см} = 3,6 \text{ мм};$$

$$b_{u,eff} = 53,3 \cdot 10^{10} \cdot e_o^2 \cdot t^3 \cdot t_{eq} / (h \cdot L \cdot b_u^3) = 53,3 \cdot 10^{10} \cdot 113^2 \cdot 1,2^3 \cdot 3,6 / (150 \cdot 6000 \cdot 59,5^3) = 223 \text{ мм};$$

- Определение эффективной ширины сжатых полок и элементов жесткости, но при полной площади стенок;
- Определение эффективной площади сжатых стенок, основываясь на отношении напряжений $\psi = \sigma_2 / \sigma_1$, полученных с использованием эффективной ширины полок, но при полной площади стенок;
- Определение характеристик эффективного (редуцированного) поперечного сечения.

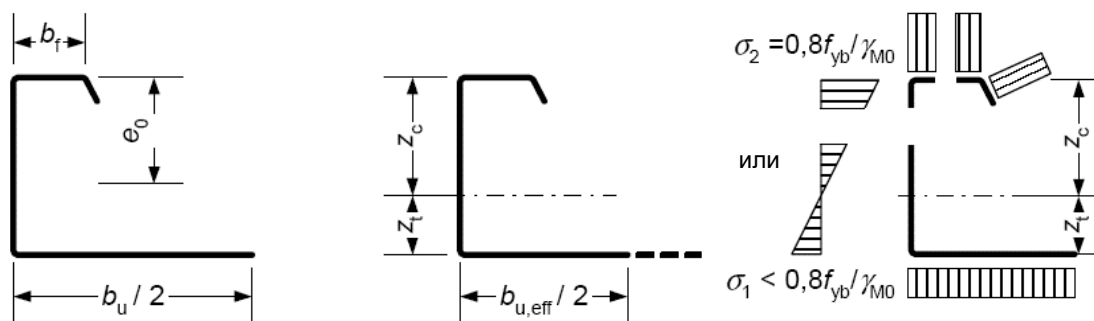


Рисунок 8 – Определение эффективного сечения касетного профиля при растяжении широкой полки

Графическое изображение эффективного поперечного сечения касетного профиля для определения предельного момента при растяжении широкой полки представлено на рисунке 9. Основные геометрические характеристики эффективного поперечного сечения касетного профиля приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики эффективного сечения

Характеристика	Обозначение	Численное значение	Ед. измер.
Площадь	A	6.64	см ²
Моменты инерции	I _y	189.22	см ⁴
Моменты сопротивления	W _{y,max}	40.25	см ³
	W _{y,min}	-17.8	см ³

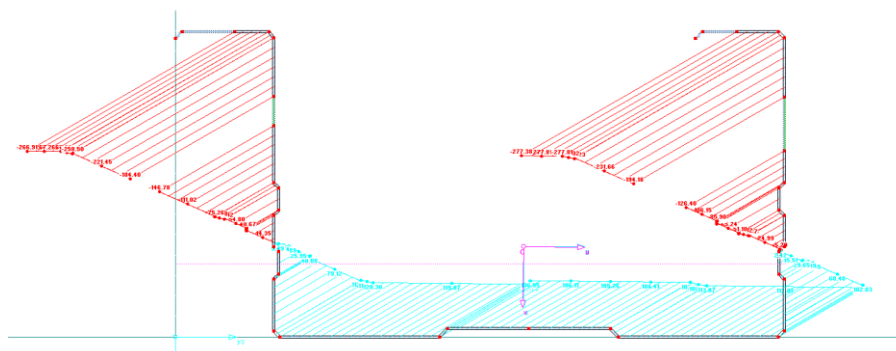


Рисунок 9 – Эффективное поперечное сечение касетного профиля для определения предельного момента при растяжении широкой полки

Подставив значения всех величин, получим расчетное сопротивление изгибу одного касетного профиля:

$$M_{b,Rd} = 0.8 \cdot \beta_b \cdot W_{eff,com} \cdot f_{yb} / \gamma_{M0} = 0.8 \cdot 1 \cdot 17.8 \text{ см}^3 \cdot 220 \text{ МПа} / 1.0 = 3.13 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

3.2 Сопротивление изгибу стеновой панели при сжатии широкой полки

Расчетное сопротивление изгибу одного касетного профиля $M_{b,Rd}$ из условия потери устойчивости определено по следующему выражению:

$$M_{b,Rd} = 0.8 \cdot W_{eff,min} \cdot f_{yb} / \gamma_{M0} = 0.8 \cdot 1 \cdot 22.35 \text{ см}^3 \cdot 220 \text{ МПа} / 1.0 = 3.93 \text{ кН} \cdot \text{м},$$

где $W_{eff,min}$ – минимальный момент сопротивления эффективного сечения;

β_b – поправочный коэффициент, учитывающий раскрепление узких полок из плоскости;
 f_{yb} – основной предел текучести.

Эффективное сечение кассетного профиля при сжатии широкой полкой рассчитано с использованием поэтапной процедуры (Рисунок 10) ТКП EN 1993-1-3 [0] в следующей последовательности:

- Определение эффективной ширины сжатой полки и элементов жесткости, но при полной площади стенок;
- Определение эффективной площади стенки сечения, основываясь на отношении напряжений $\psi = \sigma_2 / \sigma_1$, полученных с использованием эффективной ширины сжатых полок, но при полной площади стенок;
- Определение характеристик эффективного (редуцированного) поперечного сечения.

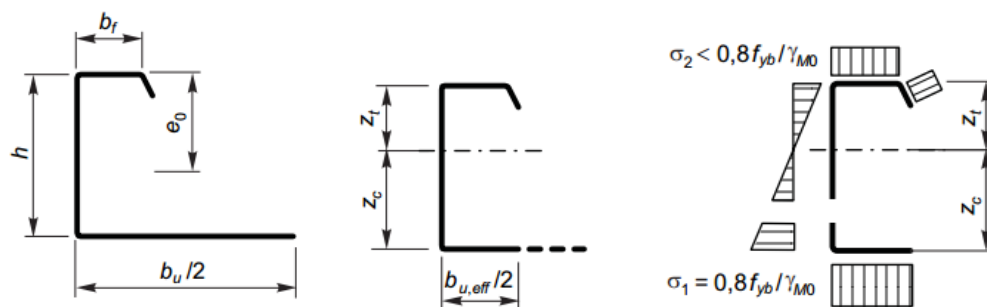


Рисунок 10 – Определение эффективного сечения кассетного профиля при сжатии широкой полки

Графическое изображение эффективного поперечного сечения кассетного профиля для определения предельного момента при сжатии широкой полки представлено на рисунке 11. Основные геометрические характеристики эффективного поперечного сечения кассетного профиля приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристики эффективного сечения

Характеристика	Обозначение	Численное значение	Ед. измер.
Площадь	A	5.6	см ²
Моменты инерции	I _y	175.5	см ⁴
	I _z	4872.2	см ⁴
Моменты сопротивления	W _{y,max}	22.35	см ³
	W _{y,min}	-24.16	см ³

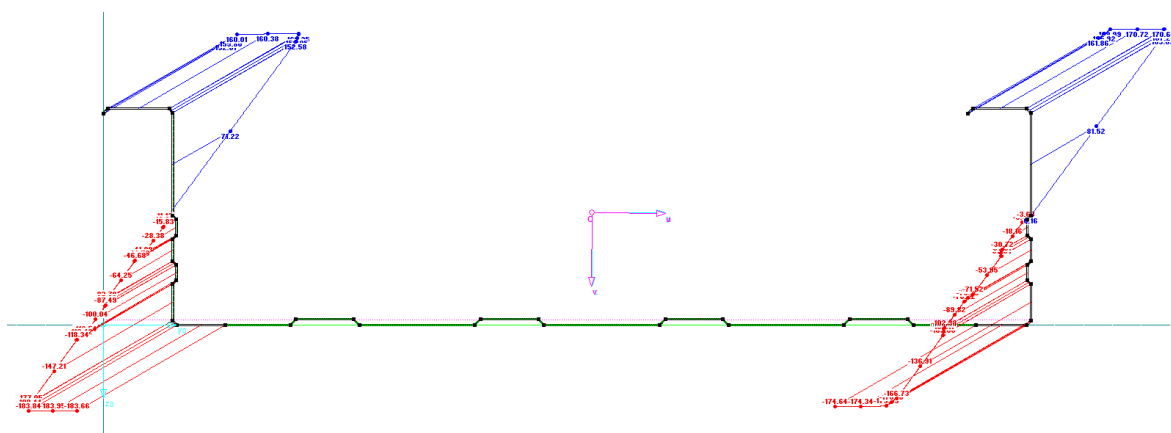


Рисунок 11 – Эффективное поперечное сечение кассетного профиля для определения предельного момента при сжатии широкой полки

3.3 Несущая способность электрозаклепок, формируемых точечной сваркой сопротивлением

Согласно 8.4(1)Р ТКП EN 1993-1-3 [0] допускается применять электрозаклепки, полученные точечной сваркой, в соединениях с основным материалом из прокатного или оцинкованного металла толщиной менее 4,0 мм, при этом наиболее тонкий из соединяемых элементов должен иметь толщину не более 3,0 мм.

В соединениях, работающих на сдвиг сопротивление срезу:

$$F_{v,Rd} = \frac{\pi}{4} \cdot d_s^2 f_u / \gamma_{M2} = \frac{3,14}{4} \cdot 4,5^2 \cdot 510 / 1,25 = 6485 \text{ Н}.$$

Сопротивление смятию и разрыву:

$$F_{tb,Rd} = 2,7 \sqrt{t} d_s f_u / \gamma_{M2} = 2,7 \sqrt{0,8} \cdot 4,5 \cdot 510 / 1,25 = 4434 \text{ Н},$$

где d_s – внутренний диаметр электрозаклепки, при сварке сопротивлением:

$$d_s = 5 \cdot \sqrt{t} = 5 \cdot \sqrt{0,8} = 4,5 \text{ мм}.$$

t – толщина наиболее тонкого присоединенного листа, мм;

f_u – временное сопротивление соединяемых листов;

$\gamma_{M2} = 1,25$ – частный коэффициент.

Согласно 8.4(7)Р ТКП EN 1993-1-3 [0] значение d_s должно быть проверено в реальных условиях посредством испытаний на сдвиг с использованием образцов с одиночным нахлестом в соответствии с положениями раздела 9 ТКП EN 1993-1-3 [0], а также толщина образца t должна быть равной реализованной в конкретном случае.

За расчетную несущую способность принимается меньшее из приведенных значений. При этом должно выполняться условие: $F_{v,Rd}$ не более $1,25 F_{tb,Rd}$ и не более значения, полученного на основании результатов испытаний согласно А.6 ТКП EN 1993-1-3 [0].

В соединениях, работающих на растяжение сопротивление разрыву рекомендуется определять посредством испытания образцов соединений на растяжение согласно ГОСТ 6996-66 [9], т.к. в ТКП EN 1993-1-3 [0] такие испытания не предусмотрены.

3.4 Несущая способность вытяжных заклепок из нержавеющей сталей в соединениях

Сопротивление смятию определено согласно выражению:

$$F_{v,Rd} = \alpha \cdot f_u \cdot d \cdot t / \gamma_{M2} = 1,6 \cdot 510 \cdot 4 \cdot 0,8 = 2611 \text{ Н},$$

где $\alpha = 3,6 \sqrt{t/d} = 1,6$.

Сопротивление срезу необходимо определять посредством испытания образцов соединений по ISO 14589:2000 «Заклепки глухие. Механические испытания» [10].

Заключение

В целом стеновую панель с применением кассетных профилей можно охарактеризовать как многокомпонентную пространственную конструкцию, для которой в качестве наиболее вероятной причины отказа можно назвать потерю местной устойчивости *сжатой полки* кассетного профиля. Также возможно коробление (выгиб) растянутых широких полок кассетного профиля, что в целом, вероятно, не станет причиной потери несущей способности панели, но может повлиять на выдергивание вытяжных заклепок из кассетного профиля. Также теоретически возможен срез или разрыв электрозаклепок, полученных точечной сваркой, однако уточнение фактической работы данных компонентов панели под расчетной

нагрузкой и их влиянии на несущую способность всей панели возможно лишь на основании проведения испытаний.

Стоит отметить, что методы проектирования на основе расчета 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. Это обусловлено тем, что все расчеты базируются на вычислении критических напряжений, соответствующих потере местной устойчивости элементов сечения, формы сечения и общей устойчивости конструкции в целом. Поэтому для практических расчетов нормами ТКП EN 1993-1-3[0] предусмотрены приближенные процедуры редуцирования сечения и порядок определения сопротивления изгибу для отдельного кассетного профиля, а не панели. Как отмечено, работа изолированного профиля не идентична работе в составе панели. При этом несущая способность кассетного профиля (основного компонента панели) занижена, в результате чего сопротивление панели существенно отличается от фактического.

Учитывая вышеизложенное основным наиболее объективным и экономичным методом проектирования панелей следует считать метод, основанный на результатах испытаний. Испытания необходимы при отсутствии адекватных расчетных моделей; при использовании большого количества однотипных элементов конструкций; для подтверждения допущений, принятых в расчетах (п.5.2. ТКП EN 1990[11]). Испытания могут быть использованы для определения предельного изгибающего момента и эффективной изгибной жесткости панели по графику зависимости прогиба от нагрузки (А.2.2 ТКП EN 1993-1-3[0]) и на основании этих данных становится возможным объективное определение расчетной несущей способности конструкции или её части (А.4.2 ТКП EN 1993-1-3[0]). Результаты экспериментальных исследований представлены во второй части статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-4. Общие правила. Дополнительные правила для нержавеющей стали: ТКП EN 1993-1-4-2009. Минск : МАиС, 2010.
3. ГОСТ 24045 -2016. Профили стальные листовые гнутые с трапециевидными гофрами для строительства. Технические условия.
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. ГОСТ 6996-66. Сварные соединения. Методы определения механических свойств.
10. ISO 14589:2000. Закlepки глухие. Механические испытания
11. Еврокод. Основы проектирования строительных конструкций: ТКП EN 1990-2011. Введ. 01.07.12. Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2012. 70 с.

REFERENCES

1. 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.
2. 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.

3. Standard of Russian Federation GOST 24045 -2016. Profili stal'nyye listovyye gnutyye s trapetsiyevidnymi goframi dlya stroitel'stva. Tekhnicheskiye usloviya [Bent steel sheet profiles with trapezoidal corrugations for construction. Technical conditions].
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. Standard of Russian Federation GOST 6996-66. Svarnyye soyedineniya. Metody opredeleniya mekhanicheskikh svoystv [Welded joints. Methods for determining mechanical properties].
10. ISO 14589: 2000. Rivets are deaf. Mechanical tests
11. Eurocode. Fundamentals of the design of building structures: ТКР EN 1990-2011. Entered 07/01/12. Minsk: Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 2012. 70 p.

Информация об авторах:

Мартынов Юрий Семенович

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

Надольский Виталий Валерьевич

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Строительные конструкции»,
E-mail: Nadolskivv@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:

Martynov Yuriy S.

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

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

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

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ НОРМАЛЬНЫХ СЕЧЕНИЙ КАУТОНОВЫХ БАЛОК СО СМЕШАННЫМ АРМИРОВАНИЕМ

ПОТАПОВ Ю.Б., ПОЛИКУТИН А.Э., ЛЕВЧЕНКО А.В.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж, Россия

Аннотация. Каутон-полимербетон на основе жидкого каучука. Ввиду высокой прочности каутон на растяжение конструкции из него рекомендуются, как конструкции с повышенными требованиями к трещинообразованию, также хотелось бы отметить, что значение отношения прочности на сжатие к прочности на растяжение лежит в диапазоне от 7-8, при этом в случае добавления дисперсного армирования данное соотношение прочностных показателей равняется ~6. Для сравнения хотелось бы отметить, что отношение прочности на сжатие к прочности на растяжения для бетона класса В25 равняется практически 15. Что говорит об актуальности применения каучукового полимербетона в качестве материала изготовления изгибаемых элементов. Объектом исследования являются балки прямоугольного сечения из каучукового полимербетона (каутон) размером 60х120х1400мм. Экспериментально установлено, что добавление фибры из волокон металлокорда повышает трещиностойкость нормальных сечений до 1,5 раз. В результате обзора литературных источников установлено, что существующие методы расчета нормальных сечений изгибаемых элементов нуждаются в адаптации и получении собственных эмпирических зависимостей для расчета балок из каучукового бетона. В результате расчета трещиностойкости по предложенной методике максимальная разница значений в каутоновых балках составляет 5,9%, а в фиброкаутоновых 4,1%.

Ключевые слова: трещиностойкость, балка, полимербетон, каутон, фибра, нормальные сечения

CALCULATION METHOD OF THE NORMAL SECTIONS CRACK RESISTANCE OF THE RUBCON BEAMS WITH MIXED REINFORCEMENT

POTAPOV Yu.B., POLIKUTIN A.E., LEVCHENKO A.V.

Voronezh State Technical University (VSTU), Voronezh, Russia

Abstract. Rubcon-polymer concrete based on liquid rubber. Due to the high tensile strength of the rubcon, structures made of it are recommended as structures with increased requirements for crack resistance, also should be noted that the value of the ratio of compressive strength to tensile strength lies in the range of 7-8, while in the case of the addition of dispersed reinforcement, this ratio of strength indicators is ~6. For comparison, it should be noted that the ratio of compressive strength to tensile strength for concrete class B25 is almost 15. This indicates the relevance of the use of rubber polymer-concrete as a material for the manufacture of bending elements. The objects of the study are beams of rectangular cross section from the rubber polymer (Rubcon) size 60x120x1400mm. It that the addition of fibers from the steel cord improves the crack resistance of normal section of up to 1.5 times experimentally was established. As a result of the review of literature sources, it was found that the existing methods of calculating the normal sections of bending elements need to be adapted and obtain their own empirical dependences for the calculation of beams from rubber concrete. As a result of the calculation of crack resistance according to the proposed method, the maximum difference of values in the rubcon beams is 5.9%, and in fibrocauton beams, 4.1%.

Keywords: crack resistance, beam, polymer concrete, rubcon, fibre, normal sections.

Введение

Применение конструкций на основе полимербетонов наиболее эффективно в зданиях и сооружениях эксплуатирующихся в условиях действия агрессивных сред различной природы. Важным фактором для обеспечения нормальной эксплуатации таких конструкций является предотвращение проникновения агрессивной среды вглубь сечения и воздействия на стальную арматуру. Одним из путей решения такой проблемы является применение материала с повышенными прочностными характеристиками, в частности высокой прочностью на растяжение.

Получаемый на основе каучуков строительный материал – каутон обладает высокими прочностными показателями и высокой химической стойкостью, свойствами, необходимыми для зданий, сооружений или их частей, эксплуатируемых в агрессивных средах. В случае добавления дисперсного армирования в состав полимербетона, полученные конструкции могут эксплуатироваться в качестве конструкций с повышенными требованиями к трещинообразованию.

Исследование свойств фиброкаутонa было проведено в работах [1-5], среди которых было определено, что каучуковый бетон обладает практически универсальной химической стойкостью, а также высокой стойкостью к воздействию радиации. В связи, с чем исследование конструкций из данного полимербетона и адаптация методик расчета для их проектирования представляет научный интерес. Изучением поведения конструкций, изготовленных из него занимались исследователи [6-9]. В развитие темы исследования изгибаемых элементов были проведены испытания двухслойных балок, содержащие в сжатой зоне – бетон, в растянутой – каутон [6,7]. Предпосылки для оптимизации методик расчета нормальных сечений изгибаемых конструкций представлены в работе [9]. Также ряд исследователей занимался изучением изгибаемых элементов с применением полимерцементной защиты [10]. Одной из положительных характеристик каутонa является высокая адгезия к поверхностям различного вида, наиболее высокая величина адгезии со сталью (12...13 МПа). Это подтверждает целесообразность выбора стальной фибры. Известны также способы повышения прочности растянутой зоны изгибаемых элементов путем применения углепластиковых лент в качестве внешнего армирования [11, 12], также в этих исследованиях предложен способ повышения прочности растянутой зоны путем совместного применения фибрового армирования и внешнего - углепластиковыми лентами. Добавлением в качестве дисперсного армирования стальную фибру в бетонные конструкции занимались исследователи [13]. Влияние мелкодисперсного наполнителя, а, именно золы-уноса, из отходов ТЭЦ, которая также присутствует в составе каутонa, занимались исследователи полиэфирного бетона [14], в результате чего было отмечено благоприятное влияние на прочностные характеристики уменьшение себестоимости композита. Некоторые прочностные свойства каучукового полимербетона приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Физико-механические свойства каучукового полимербетона

Свойства	Показатели для кау-тона	Показатели для фиб-рокаутонa
Прочность при сжатии, МПа	75...80	85...90
Прочность при растяжении, МПа	9...11	13..15
Модуль упругости, МПа	25000...26000	30000...31000
Термостойкость, °С	100...110	100...110
Морозостойкость, число циклов замораживания – оттаивания, не менее	500	500
Водопоглощение, мас. %	0,05	0,05
Усадка, мм/м	–	–

На сегодняшний день основной объем исследований направлен на совершенствования

методик расчета для традиционных железобетонных элементов с применением диаграмм деформирования [15-18] в том числе для балок, армированных углепластиковыми холстами, хотелось бы отметить, что в данных методиках расчета форма эпюры имеет не прямоугольную форму, как это принято в действующих строительных нормах. Что касается полимербетонных конструкций то исследованию и разработке методик расчета были в основном подвергнуты изгибаемые элементы на основе эпоксидных и полиэфирных смол [19-21]. Однако данные методики не могут быть распространены на полимербетонные балки на основе жидкого каучука без получения собственных эмпирических зависимостей.

Модели и методы

С целью исследования трещиностойкости нормальных сечений, армированных каутоновых балок прямоугольного поперечного сечения, были изготовлены и испытаны на чистый изгиб экспериментальные образцы с продольным стержневым армированием.

Схема загрузки и сечение балок изображены на рисунке 1.

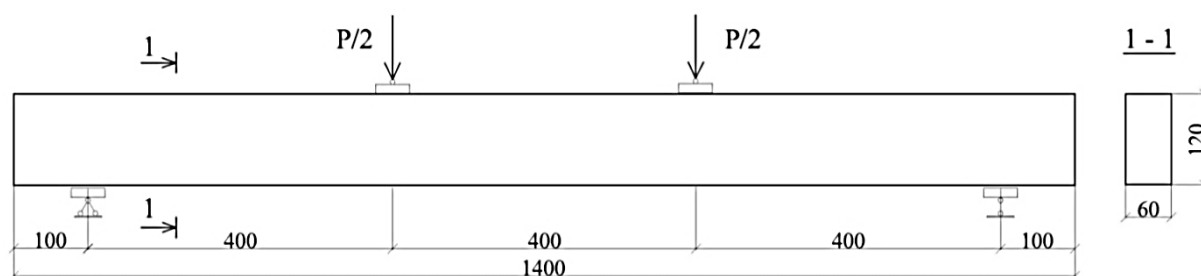


Рисунок 1 - Схема загрузки и сечение изгибаемых элементов

Для определения изгибающего момента, при котором образовалась трещина на нижнюю грань балки и на арматурный стержень клеились тензодатчики, схема расположения которых приведена на рисунке 2.

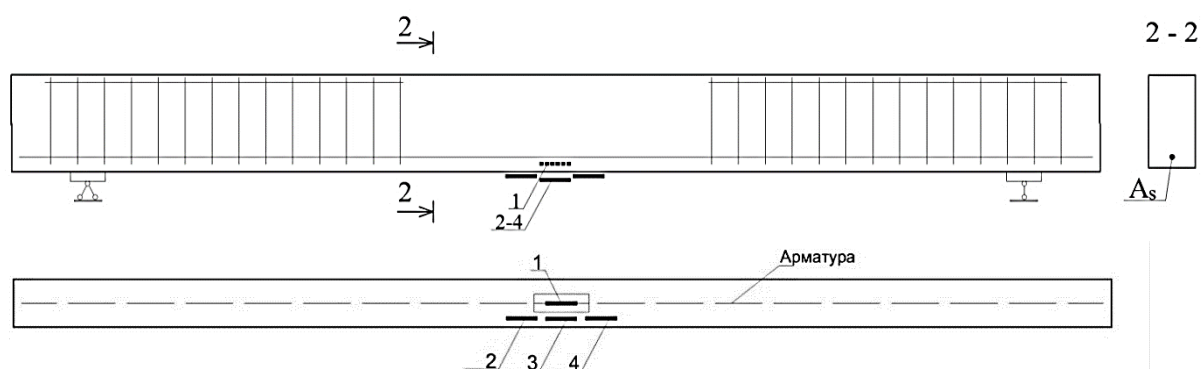


Рисунок 2 - Схема расположения арматурного каркаса и схема расположения датчиков

Для измерения относительных деформаций арматуры клеился тензодатчик 1, для измерения относительных деформаций растянутой зоны балки, а также, для определения нагрузки, при которой появилась трещина, клеились тензодатчики №2-4.

Как отмечалось в работе [22] процесс трещинообразования изгибаемых элементов начинается при достижении крайним растянутым волокном каутона или фиброкаутона предельной растяжимости. Следовательно, расчет трещиностойкости нормального сечения сводится к определению момента внешних сил, при котором происходит достижение предела прочности каутона на растяжение.

Расчет трещиностойкости нормальных сечений каутоновых и фиброкаутоновых балок.

В результате проведенных экспериментов и анализа полученных результатов было решено принять следующие предпосылки расчета трещиностойкости нормальных сечений:

1. до образования трещин изменение деформаций по высоте сечения происходит по линейному закону;
2. в материале растянутой зоны возникают неупругие деформации. Эпюра нормальных напряжений растянутой зоны имеет треугольную форму;
3. в материале сжатой зоны возникают только упругие деформации, эпюра нормальных напряжений сжатой зоны имеет треугольную форму.
4. напряжения в полимербетоне растянутой зоны равны пределу прочности на растяжение.

Ввиду того что конструкции из фиброкаутона и каутона рекомендуются, как конструкции с повышенными требованиями к трещинообразованию, на основании проведенных экспериментов было установлено, что наиболее эффективное использование прочности материала растянутой зоны ограничено процентом продольного армирования равным 4,95.

Распределение внутренних усилий и деформаций (перед образованием трещины), принимаемых при расчете нормального сечения балок из каучукового бетона приведено на рисунке 3.

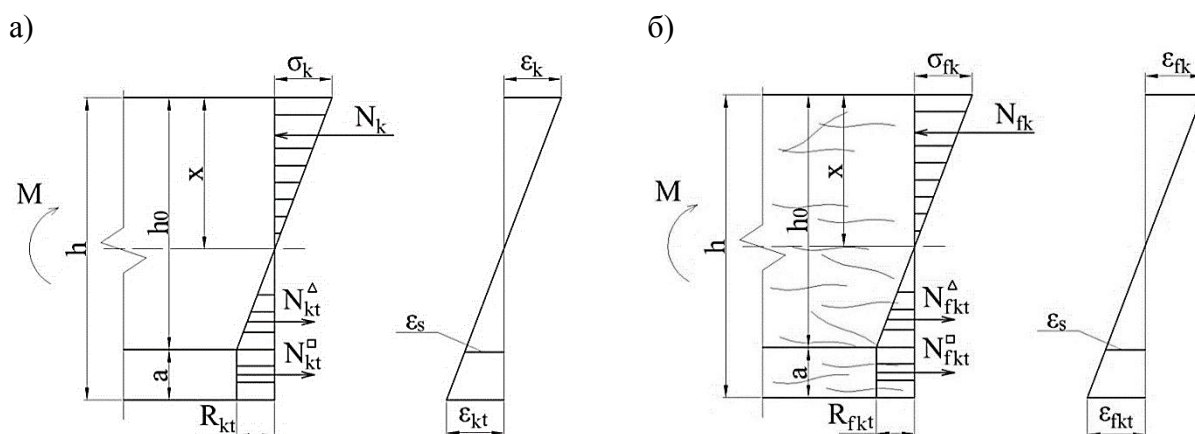


Рисунок 3 – Расчетные картины распределения внутренних усилий и деформаций в нормальном сечении изгибаемых элементов из каутона (а) и фиброкаутона (б) при расчете на трещинообразование

Сжимающие усилия в каутоне:

$$N_k = \frac{1}{2} \sigma_k \cdot x \cdot b, \quad (1)$$

где согласно гипотезе плоских сечений: $\sigma_k = \varepsilon_{kt} \cdot E$.

Растягивающие усилия, воспринимаемые каутоном и арматурой, определяем совместно, применяя формулу площади приведенного сечения:

$$N_{kt} = N_k^{\square} + N_k^{\Delta} = \frac{1}{2} \cdot R_{kt} \cdot [b(h-x) + \alpha A_s \cdot \theta - a \cdot b] + \nu \cdot R_{kt} \cdot b \cdot a, \quad (2)$$

где $\theta = (h_0 - x)/x$ – коэффициент, учитывающий меньшее значение деформации арматурного стержня по сравнению с крайним растянутым волокном каутона;

$\nu = 0,5$ – коэффициент упругопластических свойств каутона.

Величину сжатой зоны определяем из суммы проекций внутренних усилий на продольную ось элемента:

$$x^2 \left(\frac{1}{2} \cdot \varepsilon_{kt} \cdot E_k \cdot b + \frac{1}{2} \cdot R_{kt} \cdot b \right) - x \left(R_{kt} \cdot b \left(\frac{1}{2} h - \frac{1}{2} a + v \cdot a \right) - \frac{1}{2} R_{kt} \cdot \alpha \cdot A_s \right) - \frac{1}{2} R_{kt} \cdot \alpha \cdot A_s \cdot h_0 = 0, \quad (3)$$

где $\varepsilon_{kt} = 0,00053$ – предельная растяжимость каутона.

Момент трещинообразования определяем из условия равновесия моментов внутренних усилий относительно точки действия равнодействующей усилий, возникающих в растянутой зоне элемента:

$$M_{crc} = N_k \cdot \left(h - \frac{x}{3} - y_t \right), \quad (4)$$

где $y_t = S_{red}/A_{red}$ – расстояние от нижней грани до центра тяжести приведенного сечения растянутой зоны изгибаемого элемента;

$A_{red} = (h-x) \cdot b + \alpha \cdot A_s$ – площадь приведенного сечения растянутой зоны изгибаемого элемента;

S_{red} – статический момент инерции приведенного сечения растянутой зоны изгибаемого элемента.

Расчетные значения момента трещинообразования каутоновых изгибаемых элементов по приведенной выше методики приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты расчета моментов трещинообразования каутоновых изгибаемых элементов

Код балок	μ , %	M_{crc}^{exp} , кНм	M_{crc}^t , кНм	Откл. M_{crc}^t от M_{crc}^{exp} , %
БПК-8	0,8	1,45	1,52	4,8
БПК-10	1,25	1,48	1,56	5,4
БПК-12	1,8	1,52	1,61	5,9
БПК-2х10	2,5	1,76	1,68	-4,5
БПК-2х12	3,55	1,84	1,75	-4,9
БПК-2х14	4,95	1,86	1,81	-2,7
Шифр БПК означает, что балка выполнена из каутона без фибрового армирования				

Из таблицы 2 можно увидеть, что разница между расчетными и экспериментальными значениями лежит в пределах от -4,9% до 5,9 %. Экспериментальный и расчетный графики момента трещинообразования приведены на рисунке 4.

Для балок с процентом продольного армирования выше 1,8 можно наблюдать скачок значений момента трещинообразования, который обусловлен переходом от армирования растянутой зоны одним продольным стержнем к армированию в виде двух продольных стержней, что говорит об увеличении сцепления материала балки с арматурным каркасом вследствие увеличения площади контакта каутона с арматурной сталью.

Сжимающие усилия в фиброкаутоне:

$$N_{fk} = \frac{1}{2} \sigma_{fk} \cdot x \cdot b, \quad (5)$$

где согласно гипотезе плоских сечений: $\sigma_{fk} = \varepsilon_{kt} \cdot E$.

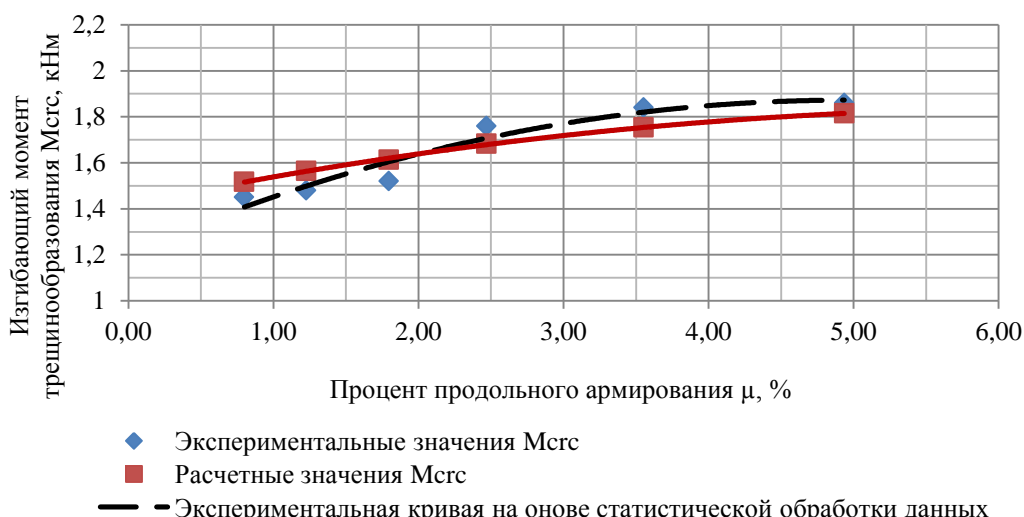


Рисунок 4 – Экспериментальный и расчетный графики момента трещинообразования

Растягивающие усилия, воспринимаемые каутоном и арматурой, определяем совместно, применяя формулу площади приведенного сечения:

$$N_{fkt} = N_{fk}^{\square} + N_{fk}^{\Delta} = \frac{1}{2} \cdot R_{fkt} \cdot [b(h-x) + \alpha A_s \cdot \theta - a \cdot b] + v \cdot R_{fkt} \cdot b \cdot a, \quad (6)$$

где $\theta = (h_0 - x)/x$ – коэффициент, учитывающий меньшее значение деформации арматурного стержня по сравнению с крайним растянутым волокном каутона;

$v=0,7$ – коэффициент упругопластических свойств фиброкаутона.

Величину сжатой зоны определяем из суммы проекций внутренних усилий на продольную ось элемента:

$$x^2 \left(\frac{1}{2} \cdot \varepsilon_{fkt} \cdot E_{fk} \cdot b + \frac{1}{2} \cdot R_{fkt} \cdot b \right) - x \left(R_{fkt} \cdot b \left(\frac{1}{2} h - \frac{1}{2} a + v \cdot a \right) - \frac{1}{2} R_{fkt} \cdot \alpha \cdot A_s \right) - \frac{1}{2} R_{fkt} \cdot \alpha \cdot A_s \cdot h_0 = 0, \quad (7)$$

где $\varepsilon_{fkt} = 0,00061$ – предельная растяжимость фиброкаутона.

Момент трещинообразования в фиброкаутоновой балке определяем подобно каутоновой по формуле (4). Расчетные значения момента трещинообразования фиброкаутоновых изгибаемых элементов по приведенной выше методики приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты расчета моментов трещинообразования фиброкаутоновых изгибаемых элементов

Шифр балок	μ , %	$M_{сгс}^{exp}$, кНм	$M_{сгс}^t$, кНм	Откл. $M_{сгс}^t$ от $M_{сгс}^{exp}$, %
БПФ-8	0,8	2,11	2,12	0,5
БПФ -10	1,25	2,4	2,33	-2,9
БПФ -12	1,8	2,45	2,38	-2,9
БПФ -2x10	2,5	2,5	2,45	-2,0
БПФ -2x12	3,55	2,51	2,52	0,4
БПФ -2x14	4,95	2,7	2,59	-4,1
Шифр БПФ означает, что балка выполнена из каутона с фибровым армированием				

Из таблицы 3 можно увидеть, что разница между расчетными и экспериментальными значениями лежит в пределах от -2,9% до 0,5 %. Экспериментальный и расчетный графики момента трещинообразования приведены на рисунке 5.

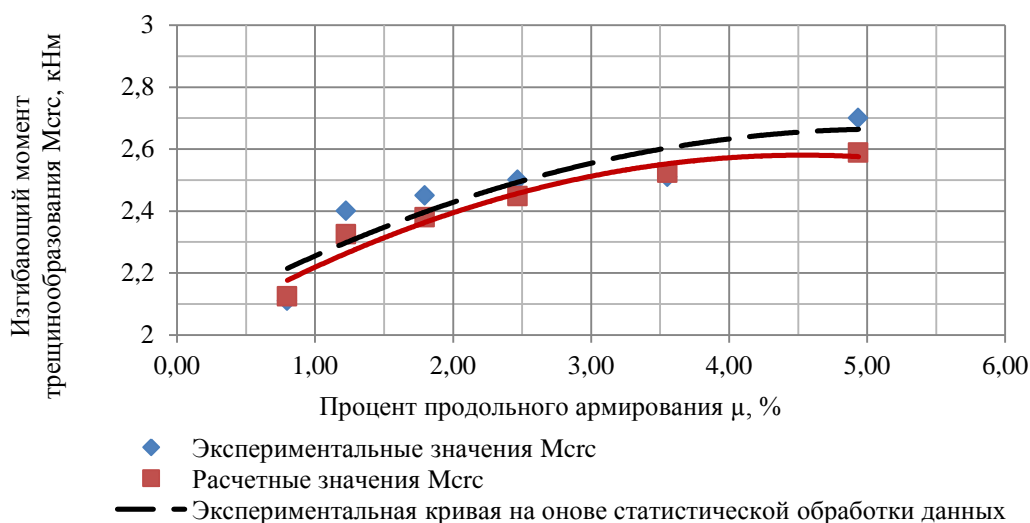


Рисунок 5 – Экспериментальный и расчетный графики момента трещинообразования

Хотелось бы отметить, что графики экспериментальных значений момента трещинообразования и расчетных, изображенные на рисунках 4,5, практически совпадают.

Результаты исследования и их анализ

Из анализа результатов исследований трещиностойкости нормальных сечений каутоновых и фиброкаутоновых изгибаемых элементов можно сделать вывод, что в балках с дисперсным армированием, как и в балках без него, процент продольного армирования влияет на значение момента трещинообразования. Данная зависимость подобна линейной, однако из-за ряда специфических свойств материала изготовления балок графики зависимостей « M_{cr} - μ » приобретают криволинейные очертания. Введение фибрового армирования в состав каутона повышает величину изгибающего момента трещинообразования (M_{cr}). При этом увеличение M_{cr} происходит практически на одну и ту же величину во всем диапазоне значений процента продольного армирования.

Выводы

Конструкции из каучукового бетона рекомендуются, как конструкции с повышенными требованиями к трещинообразованию.

Экспериментально определено, что добавление фибры по всей высоте сечения элемента при одинаковом проценте продольного армирования повышает момент трещинообразования фиброкаутоновых изгибаемых элементов по сравнению с изгибаемыми элементами из каутона (без дисперсного армирования) до 1,5 раз

Для расчета трещиностойкости нормальных сечений каутоновых, фиброкаутоновых изгибаемых элементов рекомендуется использовать уравнения равновесия с применением коэффициента, учитывающего меньшее значение деформации арматурного стержня по сравнению с крайним растянутым волокном полимербетона, а также с учетом неупругих деформаций, возникающих в полимербетоне растянутой зоны, $\nu=0,7$ – для фиброкаутона и $\nu=0,5$ – для каутона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисов Ю.М., Панфилов Д.В., Каштанов С.В., Юдин Е.М. Дисперсно армированные строительные композиты // *Строительная механика и конструкции*. 2010. № 2 (5). С. 32-37.
2. Панфилов Д.В. Дисперсно армированные строительные композиты на основе полибутadiенового олигомера: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 // Панфилов Дмитрий Вячеславович. Воронеж, 2004. 188 с.
3. Фиговский О.Л., Потапов Ю.Б., Панфилов Д. В., Каштанов С. В., Юдин Е.М. Исследование распределения дефектов в структуре фиброкаутонa методом Монте-Карло // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2014. №11 (72). С. 21-25.
4. Чмыхов В. А. Сопротивление каучукового бетона действию агрессивных сред: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 // Чмыхов Виталий Александрович. Воронеж, 2002. – 224 с.
5. Перекальский О.Е. Строительные композиты на основе полибутadiеновых олигомеров для защиты от радиации: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05. // Перекальский Олег Евгеньевич. Воронеж, 2006. - 174 с.
6. Нгуен Фан Зуй. Двухслойные каутоно-бетонные изгибаемые элементы строительных конструкций: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 // Нгуен Фан Зуй. Воронеж, 2010. - 185 с.
7. Поликутин А.Э., Чьюнг З.Х., Пинаев С.А. Результаты экспериментальных исследований прочности наклонных сечений каутоно-бетонных изгибаемых элементов при изменении поперечного армирования и пролета среза // *Актуальные вопросы науки и техники*. Самара, 2015. С. 127-131.
8. Polikutin A. E., Comparative analysis of the durability of normal sections reinforced rubber concrete with fiber and reinforced concrete bending element // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. №463. doi:10.1088/1757-899X/463/2/022040.
9. Potapov Yu., Polikutin A., Perekal'skiy O., Levchenko A. The stress-strain state of normal sections rubcon bending elements with mixed reinforcement // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2019. №983. doi: 10.1007/978-3-030-19868-8.
10. Potapov Y. B., Pinaev S. A., Arakelyan A.A., Barabash A. D. Polymer-cement material for corrosion protection of reinforced concrete elements // *Solid state phenomena*. 2016. № 871. Pp. 104-109.
11. Grace, N. F.; Soliman, A. K.; Sayed, G. A.; and Saleh, K. R., Behavior and Ductility of Simple and Continuous Beams Reinforced with FRP Bars and Stirrups. // *ASCE Journal of Composites for Construction*. 1998. November.
12. Grace, N. F., Sayed, G. A., Soliman, A. K., Saleh, K. R. Strengthening Reinforced Concrete Beams Using Fiber Reinforced Polymer (FRP) Laminates // *ACI Structural journal*. 1999. Pp. 865-875.
13. Swamy, R. N., Sa'ad A. Al-Ta'an. Deformation and Ultimate Strength in Flexure of Reinforced Concrete Beams Made with Steel Fiber Concrete // *Journal Proceedings*. 1981. №78. Pp. 395-405.
14. Gorninski J.P., Dal Molin, D.C., Kazmierczak, C.S. Comparative assessment of isophthalic and orthophthalic polyester polymer concrete: Different costs, similar mechanical properties and durability // *Construction and Building Materials*. 2007. №21 (3). Pp. 546-555.
15. Yu-Gui Cao, Cheng Jiang and Yu-Fei Wu. Cross-Sectional Unification on the Stress-Strain Model of Concrete Subjected to High Passive Confinement by Fiber-Reinforced Polymer // *Polymers*. 2016. №8(5). doi:10.3390/polym8050186
16. Dinh Tho Vu, Elena Korol, Yuliya Kustikova1, Huy Hoang Nguyen. Finite element analysis of three-layer concrete beam with composite reinforcement // *E3S Web of Conferences*. 2019. №97. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199702023>
17. Antonio R. Mari, Eva Oller, Jesús M. Bairán, Noemí Duarte. Simplified method for the calculation of long-term deflections in FRP-strengthened reinforced concrete beams // *Composites Part B: Engineering*. 2013. №45(1). Pp:1368-1376.
18. Akbarzadeh H., Maghsoudi A.A. Experimental and analytical investigation of reinforced high strength concrete continuous beams strengthened with fiber reinforced polymer // *Materials and Design*. 2010. №31(3), Pp: 1130-1147.
19. Abdel-Fattah H, El-Hawary MM. Flexural behavior of polymer concrete // *Construction and Building Materials*. 1999. №13(5). Pp: 253-262.
20. Расчеты и применение конструкций из армополимербетонов в строительстве (Руководство) НИИЖБ ГИПРОЦВЕТМЕТ, 1975. – 238с.
21. Давыдов С.С., Иванов А.М. Сталеполимербетонные строительные конструкции. М.: Стройиздат, 1972. 280 с.
22. Поликутин А.Э., Барабаш Д.Е., Левченко А.В., Коротких Д.Н. Экспериментальные исследования трещиностойкости нормальных сечений изгибаемых элементов из каутонa и фиброкаутонa // *Научный журнал строительства и архитектуры*. 2019. № 1 (53). С. 11-21. doi: 10.25987/VSTU.2019.53.1.001.

REFERENCES

1. Borisov Yu. M., Panfilov D. V., Kashtanov S. V., Yudin Ye. M., Dispersno armirovannye stroitel'nye kompozity [Construction dispersed reinforced composites]. *Stroitel'naya mekhanika i konstrukcii*, 2010. Vol. 2. No 5. Pp. 32-37. (rus)
2. Panfilov D. V. Dispersno armirovannye stroitel'nye kompozity na osnove polibutadienovogo oligomera [Dispersed reinforced building composites based on polybutadieneoligomer]. Dis. candidate in tech. sciences: 05.23.05. Voronezh, 2004. 188 p. (rus)
3. Figovskiy O.L., Potapov Yu. B., Panfilov D. V., Kashtanov S. V., Yudin E. M. Issledovanie raspredeleniya defektov v strukture fibrokautona metodom Monte-Karlo [Research on the spreading of defects in fiber concrete structure by the Monte Carlo method]. *Eastern European Journal of Advanced Technology*, 2014. Vol. 11 No 72. Pp. 21-25. (rus)
4. Chmykhov V. A. Soprotivlenie kauchukovogo betona deystviyu agressivnykh sred [Rubber concrete resistance to aggressive environment]. Dis. candidate in tech. sciences: 05.23.05, Voronezh, 2002. 224p. (rus)
5. Perekalsky O. E. Stroitel'nye kompozity na osnove polibutadienovykh oligomerov dlya zashchity ot radiatsii [Building composites based on polybutadiene oligomers for radiation protection]. Dis. candidate in tech. sciences: 05.23.05, Voronezh, 2006. 174p. (rus)
6. Nguyen Phan Dhuy. Dvuhslonnye kautono-betonnye izgibaemye elementy stroitel'nykh konstruktsiy [Double-layered, rubcon-concrete bending elements of building structures]. Dis. candidate in tech. sciences: 05.23.01, Voronezh, 2010. 185 p.(rus)
7. Polikutin A E, Cheung Z H and Pinaev S A. Rezul'taty eksperimental'nykh issledovaniy prochnosti naklonnykh secheniy kautono-betonnykh izgibaemykh elementov pri izmenenii poperechnogo armirovaniya i proleta sreza [The results of experimental researches on the strength of inclined sections of rubcon- concrete flexural members with a change in transverse reinforcement and shear span]. *Aktual'nye voprosy nauki i tekhniki*. Samara (2015) 127-131. (rus)
8. Polikutin A. E., Comparative analysis of the durability of normal sections reinforced rubber concrete with fiber and reinforced concrete bending element. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. No 463. doi:10.1088/1757-899X/463/2/022040.
9. Potapov Yu., Polikutin A., Perekal'skiy O., Levchenko A. The stress-strain state of normal sections rubcon bending elements with mixed reinforcement. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2019. No 983. doi: 10.1007/978-3-030-19868-8.
10. Potapov Y. B., Pinaev S. A., Arakelyan A.A., Barabash A. D. Polymer-cement material for corrosion protection of reinforced concrete elements. *Solid state phenomena*. 2016. No 871. Pp. 104-109.
11. Grace, N. F.; Soliman, A. K.; Sayed, G. A.; and Saleh, K. R., Behavior and Ductility of Simple and Continuous Beams Reinforced with FRP Bars and Stirrups. *ASCE Journal of Composites for Construction*. 1998. November.
12. Grace, N. F., Sayed, G. A., Soliman, A. K., Saleh, K. R. Strengthening Reinforced Concrete Beams Using Fiber Reinforced Polymer (FRP) Laminates. *ACI Structural journal*. 1999. Pp. 865-875.
13. Swamy, R. N., Sa'ad A. Al-Ta'an. Deformation and Ultimate Strength in Flexure of Reinforced Concrete Beams Made with Steel Fiber Concrete. *Journal Proceedings*. 1981. No 78. Pp. 395-405.
14. Gorninski J.P., Dal Molin, D.C., Kazmierczak, C.S. Comparative assessment of isophthalic and orthophthalic polyester polymer concrete: Different costs, similar mechanical properties and durability. *Construction and Building Materials*. 2007. Vol. 21. No. 3. Pp. 546-555.
15. Yu-Gui Cao, Cheng Jiang and Yu-Fei Wu. Cross-Sectional Unification on the Stress-Strain Model of Concrete Subjected to High Passive Confinement by Fiber-Reinforced Polymer. *Polymers*. 2016. Vol. 8. No. 5. doi:10.3390/polym8050186
16. Dinh Tho Vu, Elena Korol, Yuliya Kustikova1, Huy Hoang Nguyen. Finite element analysis of three-layer concrete beam with composite reinforcement. *E3S Web of Conferences*. 2019. No 97. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199702023>
17. Antonio R. Marí, Eva Oller, Jesús M. Bairán, Noemí Duarte. Simplified method for the calculation of long-term deflections in FRP-strengthened reinforced concrete beams. *Composites Part B: Engineering*. 2013. Vol. 45 No. 1. Pp:1368-1376.
18. Akbarzadeh H., Maghsoudi A.A. Experimental and analytical investigation of reinforced high strength concrete continuous beams strengthened with fiber reinforced polymer. *Materials and Design*. 2010. Vol. 31. No. 3, Pp: 1130-1147.
19. Abdel-Fattah H, El-Hawary MM. Flexural behavior of polymer concrete. *Construction and Building Materials*. 1999. Vol. 13. No. 5. Pp: 253-262.
20. Raschety i primeneniye konstruktsiy iz armopolimerbetonov v stroitel'stve [Calculations and application of armopolymer concrete structures in construction (Management)]. NIIZHB GIPROTSVETMET, 1975. – 238p. (rus)
21. Davydov S. S., Ivanov A. M. Stalepolimerbetonnye stroitel'nye konstruktsii [Reinforced polymer concrete building structures]. M.: Stroizdat, 1972. 280p. (rus)

22. Polikutin A. E., Barabash D. E., Levchenko A.V. Korotkih D.N. Eksperimental'nye issledo-vaniya tresh-chinostojkosti normal'nyh sechenij izgibaemyh elementov iz kautona i fibrokautona. [Experimental research of crack resistance of normal section of bending elements from rubcon and fibrorubcon]. *Scientific journal of civil engineering and architecture*. 2019. Vol. 1. No 53. pp: 11-21. doi: 10.25987/VSTU.2019.53.1.001. (rus)

Информация об авторах:

Потапов Юрий Борисович

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж, Россия, доктор техн. наук, профессор кафедры Строительных конструкций оснований и фундаментов им. проф. Ю.М. Борисова»; E-mail: apl-sc@mail.ru

Поликутин Алексей Эдуардович

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж, Россия, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры Строительных конструкций оснований и фундаментов им. проф. Ю.М. Борисова»; E-mail: a.pl@mail.ru

Левченко Артем Владимирович

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж, Россия, аспирант кафедры Строительных конструкций оснований и фундаментов им. проф. Ю.М. Борисова»; E-mail: Alevchenko@vgasu.vrn.ru

Information about authors:

Potapov Yuri B.

Voronezh State Technical University (VSTU), Voronezh, Russia, doctor in tech. sc., prof. of the dep. of building constructions, bases and foundations named after professor Yu.M. Borisov; E-mail: apl-sc@mail.ru

Polikutin Aleksei E.

Voronezh State Technical University (VSTU), Voronezh, Russia, candidate in tech. sc., docent, associated prof. of the dep. of building constructions, bases and foundations named after professor Yu.M. Borisov; E-mail: a.pl@mail.ru

Levchenko Artem V.

Voronezh State Technical University (VSTU), Voronezh, Russia, postgraduate student of the dep. of building constructions, bases and foundations named after professor Yu.M. Borisov; E-mail: Alevchenko@vgasu.vrn.ru

ИЗГИБ КОЛЬЦЕВЫХ ПЛАСТИН ИЗ ОРТОТРОПНОГО НЕЛИНЕЙНО РАЗНОСОПРОТИВЛЯЮЩЕГОСЯ МАТЕРИАЛА

ТРЕЩЕВ А.А., ЖУРИН Е.А.

Тульский Государственный Университет, Тула, Россия

Аннотация. В представленной статье предлагается математическая модель осесимметричного поперечного изгиба кольцевой пластины средней толщины, нагружение которой предполагается по верхней поверхности поперечной равномерной распределённой нагрузкой. Рассматривается ортотропная пластина, выполненная из материала, механические характеристики которого нелинейно зависят от вида напряженного состояния. В качестве определяющих соотношений приняты наиболее универсальные, построенные в нормированном тензорном пространстве напряжений, связанном с главными осями анизотропии материала. Величины нагрузок принимались с таким расчетом, чтобы прогибы срединной поверхности пластины могли считаться малыми по сравнению с ее толщиной. Закрепления пластин представлены в двух вариантах: 1) жёсткое закрепление по внешнему и внутреннему контурам; 2) шарнирное опирание по внешнему и внутреннему контурам. Ввиду того, что многие ортотропные разносопротивляющиеся материалы проявляют нелинейную зависимость деформаций от напряжений, материальные параметры приняты в виде функций от интенсивности напряжений. В результате постановки краевой задачи была разработана математическая модель для рассматриваемого класса задач, реализованная в виде численного алгоритма интегрированного в пакет прикладных программ среды MatLAB. Для решения системы разрешающих дифференциальных уравнений изгиба пластин использовался метод переменных параметров упругости с конечно-разностной аппроксимацией второго порядка точности.

Ключевые слова. Поперечный изгиб, осесимметричное деформирование, кольцевая пластина, ортотропный материал, нелинейная разносопротивляемость, малые прогибы.

BENDING OF RING PLATES FROM ORTHOTROPIC NONLINEAR MISCELLANEOUS MATERIAL

TRESCHÉV A.A., ZHURIN E.A.

Tula State University, Tula, Russia

Abstract. This article proposes a mathematical model of axisymmetric transverse bending of an annular plate of average thickness, the loading of which is assumed to be on the upper surface of a uniformly distributed transverse load. An orthotropic plate made of a material whose mechanical characteristics nonlinearly depend on the type of stress state is considered. The most universal, constructed in the normalized tensor space of stresses associated with the main axes of anisotropy of the material are taken as the defining relations. The loads were taken in such a way that the deflections of the middle surface of the plate could be considered small compared to its thickness. Plate fasteners are available in two versions: 1) rigid fastening along the outer and inner contours; 2) hinge bearing on the outer and inner contours. Due to the fact that many orthotropic dissimilar materials exhibit a nonlinear stress-strain relationship, the material parameters are taken as functions of the stress intensity. As a result of the formulation of the boundary value problem, a mathematical model was developed for the class of problems in question, implemented as a numerical algorithm integrated into the application package of the MatLAB environment. To solve the system of resolving differential equations of plate bending, we used the method of variable elasticity parameters with a finite-difference approximation of the second order of accuracy.

Keywords: Transverse bending, axisymmetric deformation, ring plate, orthotropic material, nonlinear dissociation, small deflections.

Введение

В настоящее время всё чаще проектируются и возводятся здания, изготавливаются детали машин и аппаратов, аналогов которым до недавнего времени не было. Данные объекты требуют деформационно-прочностного расчёта повышенной точности, так как малейшая погрешность на начальном этапе проектирования может привести к серьёзным авариям.

С течением времени создаются всё более технологичные материалы, для которых теории расчёта традиционных (классических) материалов не приемлемы. Именно поэтому разработка новых и модернизация старых моделей является актуальной задачей современного строительства и машиностроения.

Очевидно, что исследователям необходимо не только разработать математическую модель, но и экспериментально её проверить, а также сравнить с другими моделями для аналогичных конструкций. При более глубоком изучении материалов можно будет рассчитывать узлы и элементы конструкций с минимальными погрешностями. Это позволит разрабатывать конструкции без перерасхода материала.

В представленной работе рассматривается осесимметричное деформирование кольцевой пластинки средней толщины. Материал пластины принят ортотропным. Нелинейные свойства материала проявляются уже на ранних стадиях деформирования и сильно влияют на последующее распределение напряжений. Надежно описать деформирование такой пластины обычными линейными функциями не представляется возможным.

Разработкой теории расчёта пластин из анизотропных разнсопротивляющихся материалов занимались многие учёные, такие как С.А. Амбарцумян, R.M. Jones, C.W. Bert, A.B. Березин, А.А. Золочевский, Н.М. Матченко, А.А. Трещёв и другие [1-34].

С.А. Амбарцумян в своих работах [1 - 3] предлагал простейшие варианты определяющих соотношений в виде уравнений состояния. При этом в рамках теории малых упругих деформаций устанавливались кусочно-линейные зависимости между главными напряжениями и деформациями, а вопрос о соотношениях между касательными напряжениями и сдвигами не обсуждался. В модели С.А. Амбарцумяна [1 - 3] поле главных напряжений разделено на области первого и второго родов [3- 5]. Данная модель по форме аналогична классическому обобщённому закону Гука ортотропного материала, но модули упругости и коэффициенты поперечной деформации в направлениях главных осей определяются отдельно из опытов по осевому растяжению (E_k^+ , ν_{km}^+) и сжатию (E_k^- , ν_{km}^-). Прямое применение предложенных соотношений возможно только в тех случаях, когда заранее известно распределение главных напряжений по их знакам в разных точках тела, а также при соблюдении модельных ограничений на константы, вытекающие из условия симметрии тензора податливостей.

Модель Р.М. Джонса (R.M. Jones) [6 - 9] основана на построении матрицы взвешенных податливостей, симметрия которой в областях с различными знаками главных напряжений достигается благодаря введению во внедиагональные компоненты весовых коэффициентов. Весовые коэффициенты представляют собой попарные соотношения модулей главных напряжений ($k_1 = |\sigma_1|/(|\sigma_1| + |\sigma_2|)$, $k_2 = |\sigma_2|/(|\sigma_1| + |\sigma_2|)$).

Простейшая модель уравнений состояния для анизотропных разномодульных тел предложена К.В. Бертом (C.W. Bert) [10 - 13]. Эта модель применима к волокнистым материалам, когда считается, что компоненты матрицы податливостей зависят от знака нормальных напряжений, возникающих по направлению волокон, то есть при растяжении вдоль волокон используется одна симметричная матрица податливостей, при сжатии – другая. Строгость данной модели нарушается при равенстве нулю нормальных напряжений вдоль волокон.

Более сложная, но не менее противоречивая модель предложена А.А. Золочевским [14 - 21], который ввел эквивалентное напряжение, второй степенью которого определяется потенциал деформаций. Константы потенциала "спрятаны" в выражениях, составляющих эквивалентного напряжения. Эквивалентное напряжение определено суммой линейного и квадратичного совместных инвариантов напряжений. Из-за наличия иррациональности в уравнениях связи напряжений и деформаций не удастся выделить матрицу податливостей в общем виде. Полученные нелинейные соотношения достаточно сложны и содержат большое количество констант, подлежащих экспериментальному определению. В частности, для ортотропного материала в квазилинейном приближении необходимо определить тридцать две константы, а из простейших эталонных экспериментов (одноосные растяжения и сжатия в направлении главных осей ортотропии и под углом 45° к ним) можно установить только 18.

Методы

Очевидно, что даже детальный анализ наиболее известных моделей определяющих соотношений анизотропных разносопротивляющихся материалов свидетельствует о том, что эти модели несвободны от серьезных недостатков и базируются на отдельных гипотезах, зачастую необоснованных экспериментальными фактами. В частности Е.В. Ломакин в работах [22, 23] формулирует потенциал деформаций для анизотропных материалов в виде энергетической функции от отношения среднего напряжения к интенсивности напряжений $\xi = \sigma / \sigma_i$ (где $\sigma = \sigma_{ij} \cdot \delta_{ij} / 3$ – средние напряжения, $\sigma_i = \sqrt{1,5 S_{ij} S_{ij}}$ – интенсивность напряжений; $S_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma$ – компоненты девиатора напряжений; δ_{ij} – символ Кронеккера), умноженной на свертку тензора податливостей четвертого ранга с тензорами напряжений второго ранга в главных осях анизотропии материала. Серьезный недостаток введенных соотношений заключается в разрывности функционального параметра ξ , приводящего к неопределенностям бесконечного характера, на что неоднократно указывалось в работах [24 - 26].

В работах Матченко Н.М. и Трещева А.А. [25 - 27] строятся потенциалы деформаций для анизотропных разносопротивляющихся материалов, допускающих квазилинейную аппроксимацию, в девятимерном векторном нормированном пространстве напряжений. В этих работах получены уравнения состояния двух уровней точности. Несмотря на рациональность данного подхода, полученные соотношения также не свободны от существенных недостатков, каковыми для уравнений первого уровня точности являются сложные функциональные зависимости между некоррелируемыми константами материалов, а для уравнений второго уровня – чрезмерно большое количество подлежащих экспериментальному определению констант, для чего требуется привлечение опытов по сложным напряженным состояниям.

В последующих работах [28 - 30] Трещевым А.А. проведена корректирующая формулировка уравнений состояния для разного класса анизотропных материалов, как в квазилинейной, так и в нелинейной постановках. В нелинейной модели [31] используются уравнения состояния, представленные по типу обобщенного закона Гука для анизотропных материалов по типу:

$$e_{kn} = H_{knpq}(\sigma_i, \alpha_{st}) \cdot \sigma_{pq}; \quad H_{knpq} = H_{pqkn}; \quad k, m, q, p, s, t, = 1, 2, 3, \dots$$

В частности, для ортотропного материала эти зависимости представлены следующим образом:

$$\begin{aligned} e_{11} &= (A_{1111} + B_{1111} \cdot \alpha_{11}) \cdot \sigma_{11} + [A_{1122} + B_{1122} \cdot (\alpha_{11} + \alpha_{22})] \cdot \sigma_{22} + [A_{1133} + B_{1133} \cdot (\alpha_{11} + \alpha_{33})] \cdot \sigma_{33}; \\ e_{22} &= [A_{1122} + B_{1122} \cdot (\alpha_{11} + \alpha_{22})] \cdot \sigma_{11} + (A_{2222} + B_{2222} \cdot \alpha_{22}) \cdot \sigma_{22} + [A_{2233} + B_{2233} \cdot (\alpha_{22} + \alpha_{33})] \cdot \sigma_{33}; \\ e_{33} &= [A_{1133} + B_{1133} \cdot (\alpha_{11} + \alpha_{33})] \cdot \sigma_{11} + [A_{2233} + B_{2233} \cdot (\alpha_{22} + \alpha_{33})] \cdot \sigma_{22} + (A_{3333} + B_{3333} \cdot \alpha_{33}) \cdot \sigma_{33}; \\ 2e_{12} &= C_{1212}(\sigma_i) \cdot \tau_{12}; \quad 2e_{23} = C_{2323}(\sigma_i) \cdot \tau_{23}; \quad 2e_{13} = C_{1313}(\sigma_i) \cdot \tau_{13}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $a_{ij} = \sigma_{ij} / S$; – нормированные напряжения в главных осях анизотропии материала; $S = (\sigma_{ij} \cdot \sigma_{ij})^{0.5} = \sqrt{\sigma_{11}^2 + \sigma_{22}^2 + \sigma_{33}^2 + 2(\tau_{12}^2 + \tau_{23}^2 + \tau_{31}^2)}$ – модуль полного напряжения (норма пространства напряжений); $A_{ijkl}, B_{ijkl}, C_{ijkl}$ – нелинейные функции, определяющие механические свойства материала.

Для ортотропных тел число независимых материальных функций достигает пятнадцати [31, 32]. Представление указанных функций, определяющих свойства материала, осуществляется путем аппроксимации экспериментальных диаграмм деформирования при одноосном растяжении и сжатии вдоль главных осей анизотропии и диаграмм, полученных на сдвиг в трех главных плоскостях ортотропии путём их обработки в программе Microcal Origin Pro 8.0 (Microcal Software Inc.). В таком случае для конструкционного ортотропного нелинейно разнсопротивляющегося композитного материала AVCO Mod 3a [34] представляются следующим образом:

$$\begin{aligned} A_{kkkk}(\sigma_i) &= 0.5 \cdot [1/E_k^+(\sigma_i) + 1/E_k^-(\sigma_i)]; \quad B_{kkkk}(\sigma_i) = 0.5 \cdot [1/E_k^+(\sigma_i) - 1/E_k^-(\sigma_i)]; \\ A_{kkmm}(\sigma_i) &= -0.5 \cdot \left[\frac{\nu_{km}^+(\sigma_i)}{E_m^+(\sigma_i)} + \frac{\nu_{km}^-(\sigma_i)}{E_m^-(\sigma_i)} \right]; \quad B_{kkmm}(\sigma_i) = -0.5 \cdot \left[\frac{\nu_{km}^+(\sigma_i)}{E_m^+(\sigma_i)} - \frac{\nu_{km}^-(\sigma_i)}{E_m^-(\sigma_i)} \right]; \\ C_{knkn}(\sigma_i) &= 1/G_{kn}(\sigma_i); \quad E_k^\pm(\sigma_i) = a_k^\pm + m_k^\pm \cdot \sigma_i + n_k^\pm \cdot \sigma_i^2; \\ \nu_{kn}^\pm(\sigma_i) &= \lambda_{kn}^\pm + \beta_{kn}^\pm \cdot \sigma_i + \mu_{kn}^\pm \cdot \sigma_i^2; \quad G_{kn}(\sigma_i) = g_{kn} + p_{kn} \cdot \sigma_i + q_{kn} \cdot \sigma_i^2. \end{aligned} \quad (2)$$

где $a_k^\pm, m_k^\pm, n_k^\pm, \lambda_{kn}^\pm, \beta_{kn}^\pm, \mu_{kn}^\pm, g_{kn}, p_{kn}, q_{kn}$ – константы нелинейных материальных функций, определяемые путем обработки экспериментальных диаграмм деформирования методом наименьших квадратов и представленные в таблице 1.

Данная модель нелинейного ортотропного разнсопротивляющегося материала [31, 34] в настоящее время наименее противоречива, даёт результаты максимально близкие к экспериментальным данным и поэтому здесь положена в основу построения методики расчета пластин.

Рассмотрим НДС кольцевой пластины при нагружении поперечной равномерно распределённой нагрузкой интенсивности "q" (МПа). Материал пластины принимаем с нелинейными характеристиками, обладающей цилиндрической ортотропией и свойствами разнсопротивляемости. При этом остановимся на двух вариантах опирания объекта исследования:

- а) пластина с жёстко закреплёнными контурами в соответствии с рисунком 1а;
- б) пластина шарнирно опёрта по контурам в соответствии с рисунком 1б.

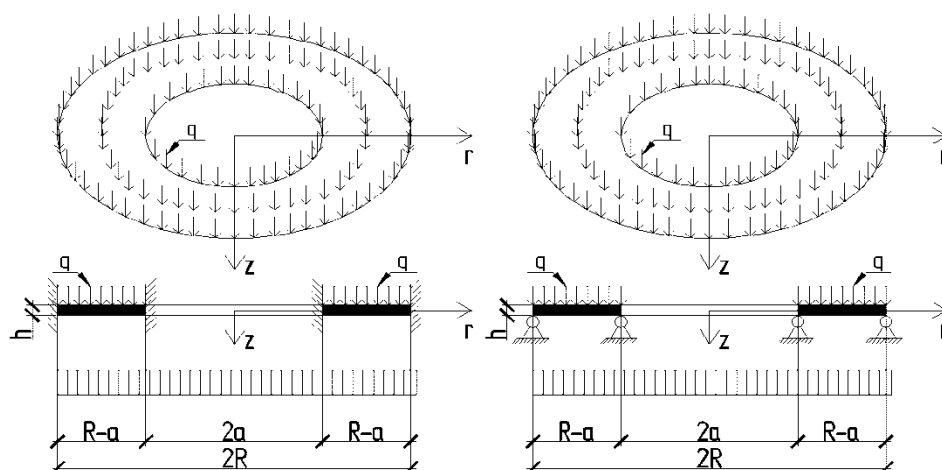


Рисунок 1 – Расчётная схема кольцевой пластины с двумя видами опирания: а) с жёстко закреплёнными контурами; б) с шарнирно опёртыми контурами

Таблица 1 - Константы композитного материала AVCO Mod 3a [34]

Вид испытания опытного образца	Технический параметр	Первый элемент не- линейной функции	Второй элемент не- линейной функции	Третий элемент не- линейной функции
1	2	3	4	5
Одноосное растяжение вдоль главных осей ортотропии	$E_k^+(\sigma_i)$, Па	α_1^+	m_1^+	n_1^+
		$1.058 \cdot 10^{-10}$	62.829	$1.535 \cdot 10^{-6}$
		α_2^+	m_2^+	n_2^+
		$2.864 \cdot 10^{-10}$	-105.476	$5.893 \cdot 10^{-7}$
		α_3^+	m_3^+	n_3^+
		$2.301 \cdot 10^{-10}$	88.349	$3.711 \cdot 10^{-6}$
	$\nu_{km}^+(\sigma_i)$	λ_{12}^+	β_{12}^+	μ_{12}^+
		0.158	$-3.106 \cdot 10^{-9}$	$2.192 \cdot 10^{-17}$
		λ_{21}^+	β_{21}^+	μ_{21}^+
		0.103	$-1.79 \cdot 10^{-9}$	$9.106 \cdot 10^{-18}$
		λ_{13}^+	β_{13}^+	μ_{13}^+
		0.203	$2.15 \cdot 10^{-9}$	$6.148 \cdot 10^{-17}$
		λ_{23}^+	β_{23}^+	μ_{23}^+
		0.104	$0.87 \cdot 10^{-10}$	$6.741 \cdot 10^{-17}$
		λ_{31}^+	β_{31}^+	μ_{31}^+
		0.146	$-0.146 \cdot 10^{-10}$	$6.971 \cdot 10^{-17}$

Продолжение таблицы 1

Вид испытания опытного образца	Технический параметр	Первый элемент нелинейной функции	Второй элемент нелинейной функции	Третий элемент нелинейной функции
1	2	3	4	5
Одноосное сжатие вдоль главных осей ортотропии	$E_k^-(\sigma_i)$, Па	α_1^-	m_1^-	n_1^-
		$9.988 \cdot 10^9$	-12.943	$6.71 \cdot 10^{-7}$
		α_2^-	m_2^-	n_2^-
		$2.326 \cdot 10^{10}$	-436.81	$-6.077 \cdot 10^{-7}$
		α_3^-	m_3^-	n_3^-
		$5.14 \cdot 10^9$	-129.15	$-78.31 \cdot 10^{-6}$
	$\nu_{km}^-(\sigma_i)$	λ_{12}^-	β_{12}^-	μ_{12}^-
		0.118	$-1.457 \cdot 10^{-9}$	$2.136 \cdot 10^{-17}$
		λ_{21}^-	β_{21}^-	μ_{21}^-
		0.06	$1.77 \cdot 10^{-9}$	$2.947 \cdot 10^{-17}$
		λ_{13}^-	β_{13}^-	μ_{13}^-
		0.264	$-1.118 \cdot 10^{-9}$	$3.01 \cdot 10^{-17}$
		λ_{23}^-	β_{23}^-	μ_{23}^-
		0.189	$2.156 \cdot 10^{-9}$	$2.104 \cdot 10^{-17}$
		λ_{31}^-	β_{31}^-	μ_{31}^-
		0.134	$-0.457 \cdot 10^{-10}$	$5.819 \cdot 10^{-17}$
Сдвиг в главных плоскостях ортотропии	$G_{km}(\sigma_i)$, Па	g_{12}	p_{12}	q_{12}
		$4.07 \cdot 10^9$	-1,6	$-8.38 \cdot 10^{-6}$
		g_{23}	p_{23}	q_{23}
		$1.723 \cdot 10^9$	16.899	$-1.1 \cdot 10^{-5}$
		g_{31}	p_{31}	q_{31}
		$2.43 \cdot 10^9$	-54.455	$-1.97 \cdot 10^{-5}$

Ввиду осевой симметрии рассматриваются задачи с учетом цилиндрической системы координат (r, θ, z) . При этом считаются справедливыми традиционные для данного случая модельные допущения [34] в следующей форме: 1) нормаль к срединной плоскости после деформации поворачивается на угол ψ_θ относительно окружной координатной оси θ ; 2) при определении параметров напряженного состояния влиянием нормальных напряжений σ_z ввиду их малости пренебрегаем.

Опираясь на вышеописанные допущения, для деформаций в точках пластины имеем:

$$e_r = u_{,r} + z \cdot \psi_{\theta,r}; \quad e_\theta = u/r + z \cdot \psi_\theta / r; \quad \gamma_{rz} = w_{,r} + \psi_\theta \quad (3)$$

где u – радиальные перемещения в срединной поверхности; ψ_θ – угол поворота сечения пластины относительно оси θ ; w – прогиб срединной поверхности пластины.

Принимая во внимание принятые гипотезы уравнения (1) преобразуем к виду:

$$\begin{aligned} e_r &= (A_{1111}(\sigma_i) + B_{1111}(\sigma_i) \cdot \alpha_r) \cdot \sigma_r + [A_{1122}(\sigma_i) + B_{1122}(\sigma_i) \cdot (\alpha_r + \alpha_\theta)] \cdot \sigma_\theta; \\ e_\theta &= [A_{1122}(\sigma_i) + B_{1122}(\sigma_i) \cdot (\alpha_r + \alpha_\theta)] \cdot \sigma_r + (A_{2222}(\sigma_i) + B_{2222}(\sigma_i) \cdot \alpha_\theta) \cdot \sigma_\theta \\ e_z &= [A_{1133}(\sigma_i) + B_{1133}(\sigma_i) \cdot \alpha_r] \cdot \sigma_r + [A_{2233}(\sigma_i) + B_{2233}(\sigma_i) \cdot \alpha_\theta] \cdot \sigma_\theta; \\ e_{rz} &= C_{1313}(\sigma_i) \cdot \tau_{rz}; \end{aligned} \quad (4)$$

где $\alpha_r = \sigma_r / S$; $\alpha_\theta = \sigma_\theta / S$; $\alpha_{rz} = \tau_{rz} / S$; $S = \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_\theta^2 + \tau_{rz}^2}$;

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_r^2 - \sigma_r \cdot \sigma_\theta + \sigma_\theta^2 + 3\tau_{rz}^2}.$$

Для удобства дальнейшего изложения введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned} C_{1111} &= A_{1111}(\sigma_i) + B_{1111}(\sigma_i) \cdot \alpha_r; & C_{1122} &= A_{1122}(\sigma_i) + B_{1122}(\sigma_i) \cdot (\alpha_r + \alpha_\theta); \\ C_{1133} &= A_{1133}(\sigma_i) + B_{1133}(\sigma_i) \cdot \alpha_r; & C_{2222} &= A_{2222}(\sigma_i) + B_{2222}(\sigma_i) \cdot \alpha_\theta; \\ C_{2233} &= A_{2233}(\sigma_i) + B_{2233}(\sigma_i) \cdot \alpha_\theta; & C_{1313} &= C_{1313}(\sigma_i); \end{aligned} \quad (5)$$

Выразив напряжения через деформации с учетом упрощающих уравнений (3) – (5), после несложных математических манипуляций приходим к следующим зависимостям:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \Delta_{1111}(u_{,r} - z \cdot \psi_{\theta,r}) + \Delta_{1122}(u/r - z \cdot \psi_\theta / r); \\ \sigma_\theta &= \Delta_{1122}(u_{,r} - z \cdot \psi_{\theta,r}) + \Delta_{2222}(u/r - z \cdot \psi_\theta / r); \\ \tau_{rz} &= \frac{(\psi_\theta + w_{,1})}{\Delta_{1313}}; \end{aligned} \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} \Delta_{1111} &= C_{2222} / (C_{1111} \cdot C_{2222} - C_{1122}^2); & \Delta_{1122} &= C_{1122} / (C_{1111} \cdot C_{2222} - C_{1122}^2); \\ \Delta_{2222} &= C_{1111} / (C_{1111} \cdot C_{2222} - C_{1122}^2); & \Delta_{1313} &= C_{1313}; \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь в явной форме не включены деформации e_z , но они легко вычисляются из третьего уравнения системы (4).

Принимая за основу новые физические уравнения, мы тем самым не вносим изменений в зависимости статико-геометрической природы, а поэтому статические условия для кольцевых пластин в цилиндрической системе координат представим в традиционной форме [34]:

$$N_{r,r} + (N_r - N_\theta) / r = 0; \quad Q_{r,r} + Q_r / r = -q; \quad M_{r,r} + (M_r - M_\theta) / r - Q_r = 0; \quad (8)$$

где N_r , N_θ , Q_r , M_r , M_θ – усилия и моменты в сечениях пластины.

Усилия и моменты определяются интегрированием выражений для напряжений (6) по толщине пластины:

$$\begin{aligned} N_r &= \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_r dz; & N_\theta &= \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_\theta dz; & Q_r &= \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{rz} dz; \\ M_r &= \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_r \cdot z dz; & M_\theta &= \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_\theta \cdot z dz; \end{aligned} \quad (9)$$

Из совместного рассмотрения зависимостей (6) – (9) вытекают разрешающие уравнения осесимметричного изгиба пластин средней толщины, обладающих цилиндрической ортотропией и нелинейной зависимостью механических характеристик материала от вида напряженного состояния:

$$\begin{aligned} D_{11,r} \cdot u_{,rr} + K_{11,r} \cdot \psi_{\theta,rr} + D_{12,r} \cdot u_{,r} / r + K_{12,r} \cdot \psi_{\theta,r} / r + (D_{11} \cdot u_{,r} + K_{11} \cdot \psi_{\theta,r} + D_{12} \cdot u / r + \\ + K_{12} \cdot \psi_\theta / r - D_{12} \cdot u_{,r} + K_{12} \psi_{\theta,r} + D_{22} \cdot u / r + K_{22} \cdot \psi_\theta / r) / r = 0; \\ D_{13,r} \cdot (w_{,rr} + \psi_{\theta,r}) + D_{13} (w_{,r} + \psi_\theta) / r = -q; \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} (K_{11} \cdot u_{,r} + R_{11} \cdot \psi_{\theta,r} + K_{12} \cdot u / r + R_{12} \cdot \psi_\theta / r - K_{12} u_{,r} + R_{12} \cdot \psi_{\theta,r} + K_{22} u / r + R_{22} \cdot \psi_\theta / r) / r - \\ - D_{13} \cdot (w_{,r} + \psi_\theta) = 0. \end{aligned}$$

где D_{11} , D_{12} , D_{22} , D_{13} , K_{11} , K_{12} , K_{22} , R_{11} , R_{12} , R_{22} – интегральные функции по толщине пластины, вытекающие после интегрирования по формулам (9); $D_{11,r}$, $D_{12,r}$, $D_{33,r}$, $K_{11,r}$, $K_{12,r}$, $R_{11,r}$, $R_{12,r}$ – производные интегральных функций по радиальной координате.

Для решения полученных уравнений (10) используем конечно-разностный метод с аппроксимацией второго порядка точности [35, 36].

Результаты и обсуждения

Для решения данного класса задач разработана программа в среде MatLAB. Рассматривались 2 варианта закрепления пластины: шарнирное и жёсткое защемление по краям. Так же, были рассмотрены 3 варианта решения.

После обработки результатов расчетов, были получены следующие графики и диаграммы:

- прогибы от величины нагрузки;
- прогибы по координате «r»;
- распределение напряжений по координатам;
- распределение напряжений в пластинке в различных сечениях;
- распределение моментов в пластине.

Основные результаты приведены на графиках для сечения кольцевой пластины "R-a". На рисунках 2 - 4 приведены результаты расчёта пластины с жестким защемлением, а на рисунках 5 и 7 – с шарнирным опиранием.

В ходе реализации модели деформирования кольцевых пластин под действием равномерно распределённых нагрузок получены основные значения параметров, характеризующие их напряженно-деформированные состояния.

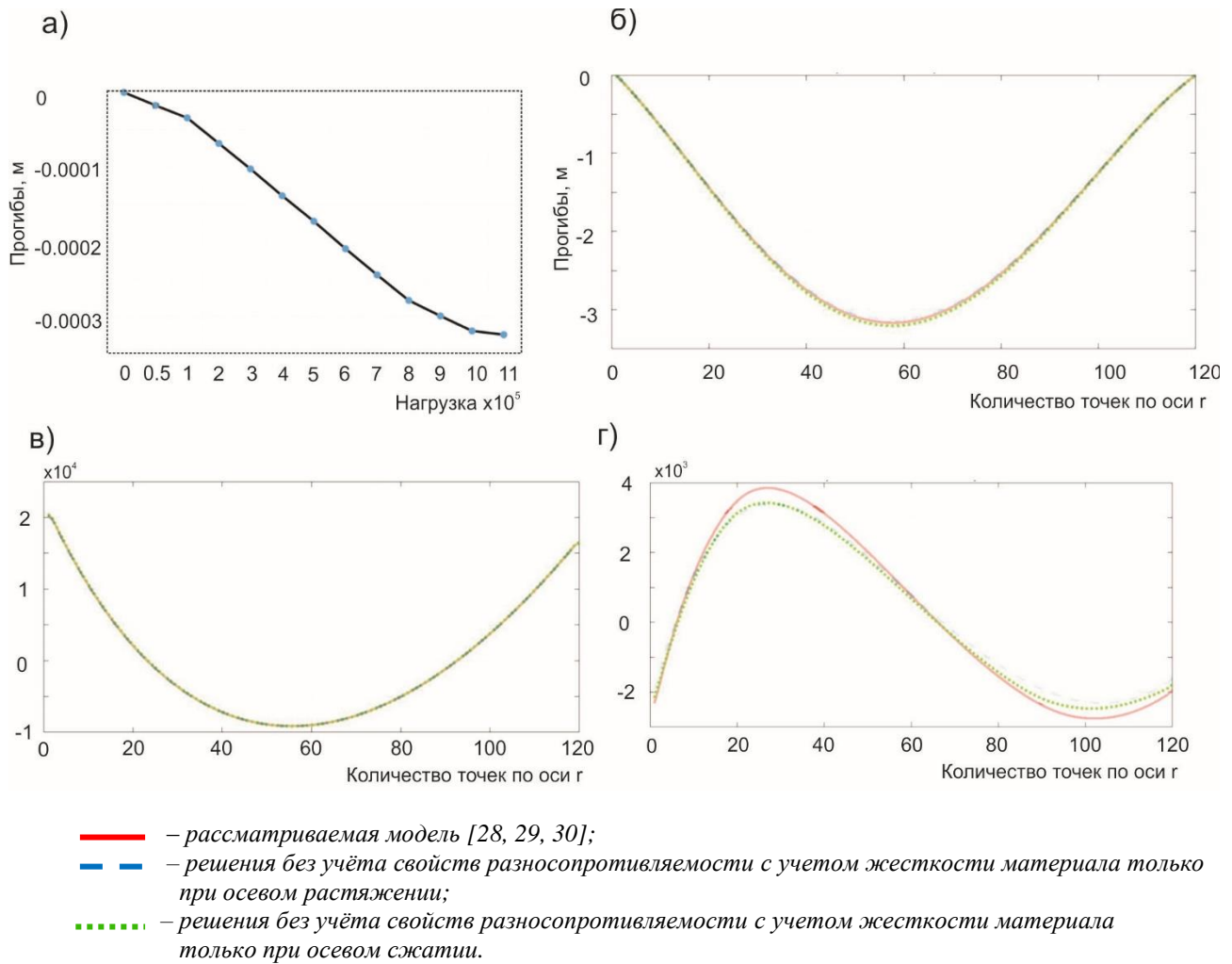


Рисунок 2 – Результаты расчета пластины с жестким защемлением: а) прогибы от величины нагрузки; б) прогибы по координате r ; в) распределение моментов M_r ; г) распределение моментов M_θ

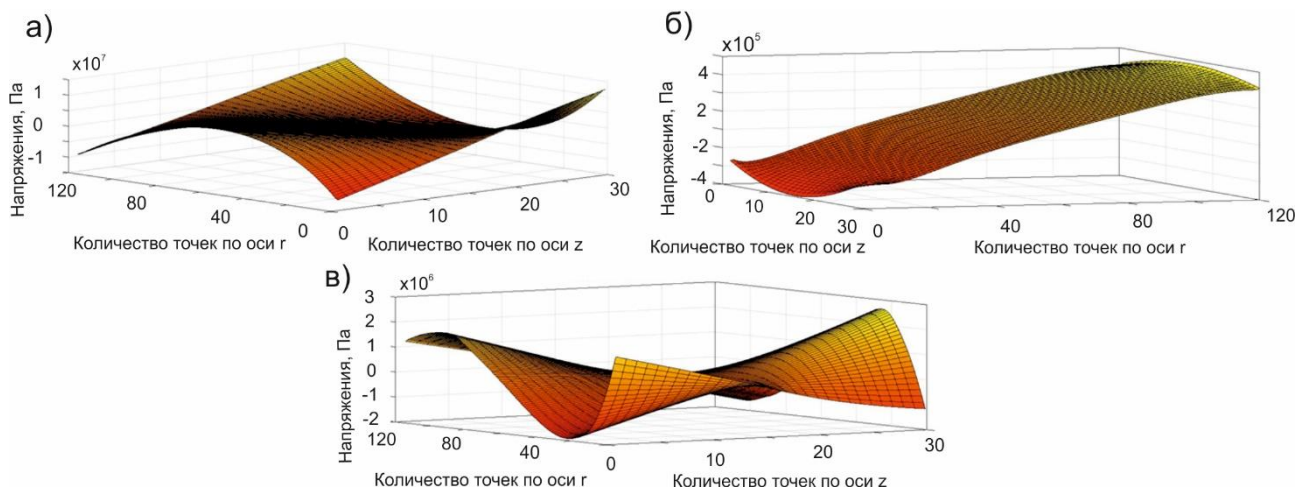


Рисунок 3 – Распределение напряжений в жестко защемленной пластине: а) σ_r по координатам r и z ; б) σ_θ по координатам r и z ; в) σ_{rz} по координатам r и z

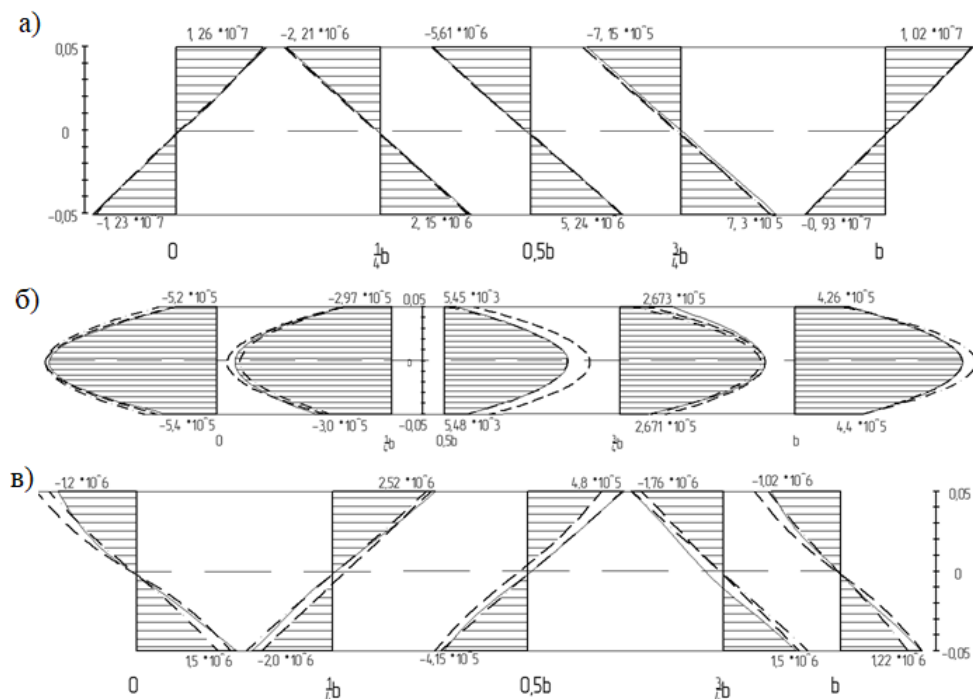


Рисунок 4 – Распределение напряжений по толщине жестко защемленной кольцевой пластины в характерных сечениях: а) σ_r , Па; б) σ_{θ} , Па; в) σ_{θ} , Па

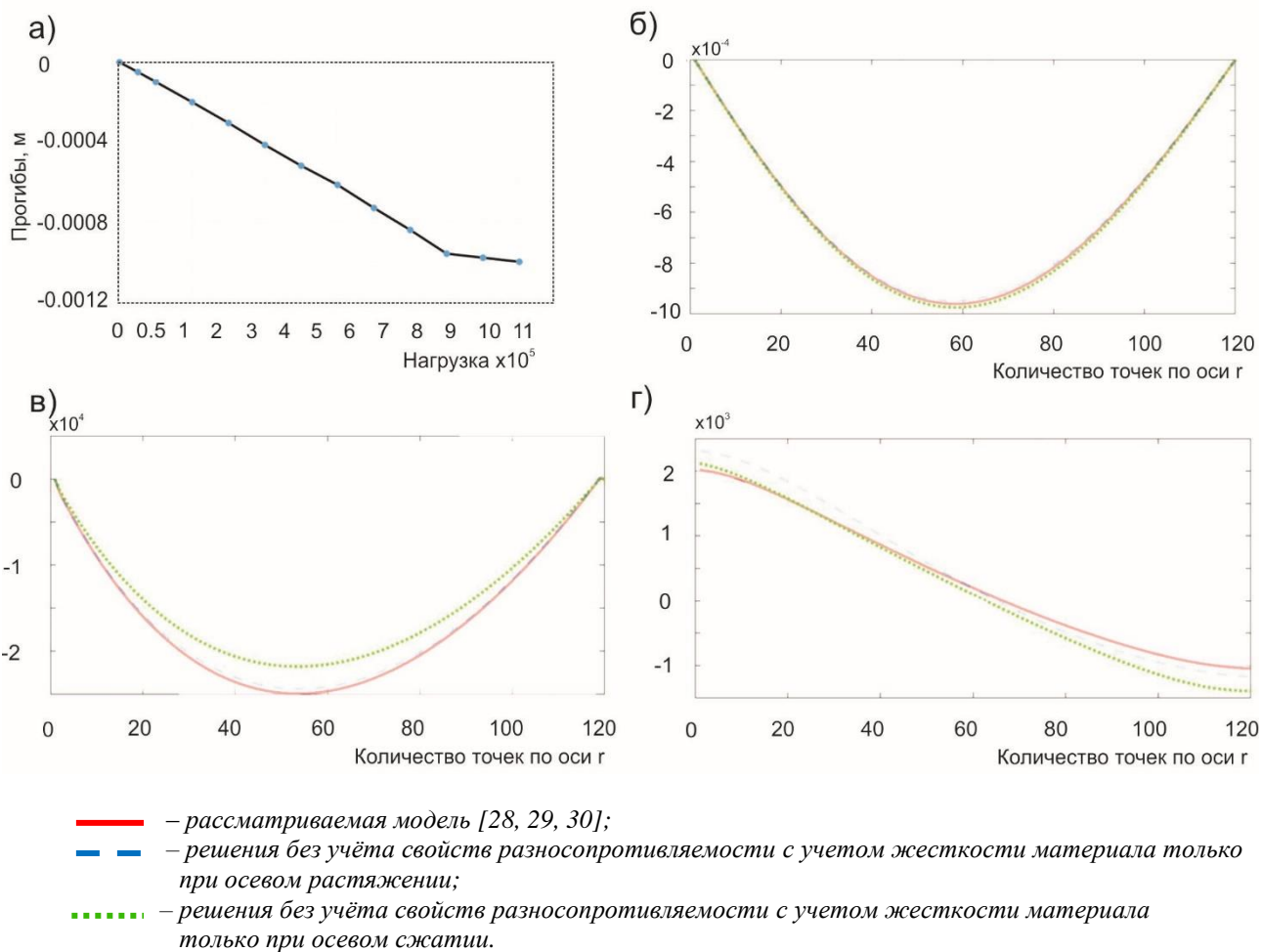


Рисунок 5 – Результаты расчета пластины с шарнирным опиранием: а) прогибы от величины нагрузки; б) прогибы по координате r ; в) распределение моментов M_r ; г) распределение моментов M_{θ}

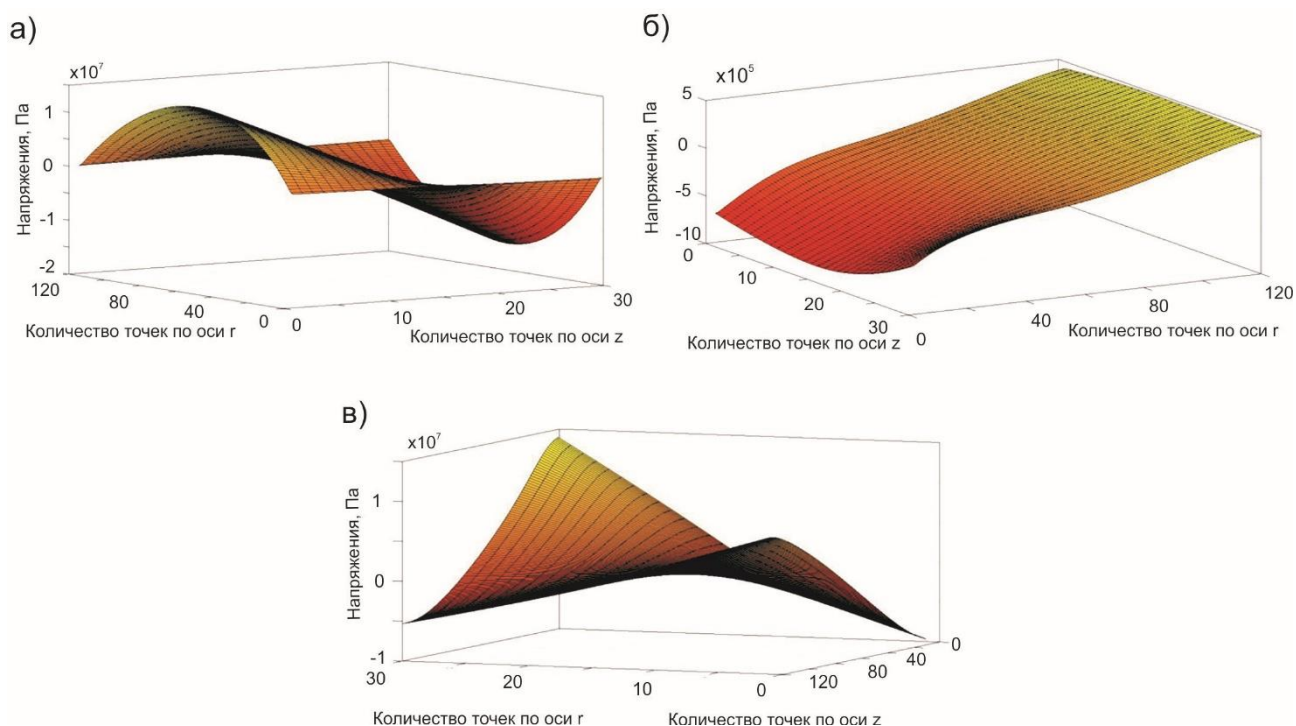


Рисунок 6–Распределение напряжений в шарнирно опертой пластине: а) σ_r по координатам r и z ; б) σ_θ по координатам r и z ; в) σ_{rz} по координатам r и z

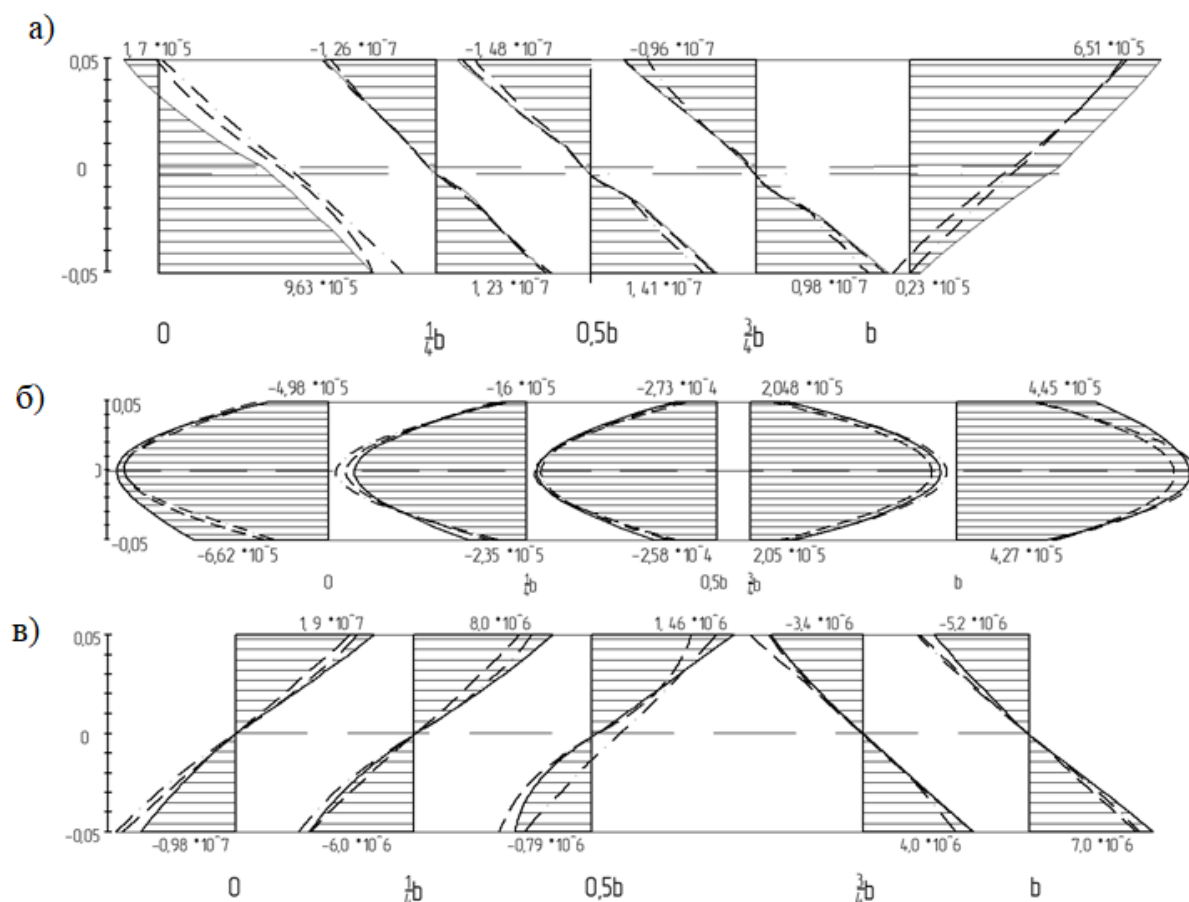


Рисунок 7 – Распределение напряжений по толщине шарнирно опертой кольцевой пластины в характерных сечениях: а) σ_r , Па; б) σ_{rz} , Па; в) σ_θ , Па

В результате сравнения решений рассмотренных задач по представленной модели деформирования с данными традиционной нелинейной теории без учёта свойств разнсопротивляемости, отмечены следующие особенности, характеризующие отличия параметров НДС:

1. Жёстко защемлённая пластина:

- а. разница в прогибах составляет 1,3%;
- б. разница в значениях усилий в различных сечениях кольцевой пластины колеблется в интервале 1,5-3% для σ_r ; 13-17% для σ_{13} ; 5-7% для σ_θ ;
- с. разница в значениях горизонтальных перемещений составляет 6%;
- д. разница в значениях углов поворота составляет 4%;
- е. разница в значениях момента M_r составляет 0,5-1%; а M_θ – 10-15%.

2. Шарнирно опёртая пластина:

- а. разница в прогибах составляет 1,5-2%;
- б. разница в значениях напряжений в различных сечениях кольцевой пластины колеблется в интервале 7-15% для σ_r ; 5-19% для σ_{rz} ; 10-14% для σ_θ ;
- с. разница в значениях горизонтальных перемещений составляет 2-4%;
- д. разница в значениях углов поворота составляет 15-17%;
- е. разница в значениях момента M_r составляет 15%; а M_θ – 25%.

Таким образом установлено, что неучёт нелинейной разнсопротивляемости материалов при рассмотрении параметров деформирования различных конструкций, выполненных из подобных материалов, приводит к заметным погрешностям.

Выводы

В результате проделанного исследования была конкретизирована и применена модель деформирования разнсопротивляющихся ортотропных материалов, которая наиболее точно и адекватно описывает большинство известных на сегодняшний день нелинейных материалов. В основу рассматриваемой модели были положены обработанные результаты экспериментов по деформированию разнсопротивляющихся материалов, материальные нелинейные функции и константы [34].

Для решения задачи деформирования кольцевой пластины из нелинейного ортотропного материала по разработанной модели был использован метод переменных параметров упругости с конечно-разностной аппроксимацией второго порядка точности. Был разработан алгоритм решения задач «по расчёту осесимметричного деформирования кольцевых пластинок средней толщины из нелинейных ортотропных разнсопротивляющихся материалов при малых прогибах». Практическое применение алгоритма и оценка итерационных методов решения реализовывалось с помощью пакета прикладных программ «MatLAB».

В результате проделанной работы был решён ряд тестовых задач по теме деформирования пластин средней толщины из нелинейных ортотропных материалов, определены параметры состояния пластин на различных этапах загрузки поперечной равномерно-распределённой нагрузкой, рассмотрены два варианта закрепления кольцевых пластин, приведены результаты сравнения трёх вариантов решения данной задачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Амбарцумян С.А. Теория анизотропных пластин: прочность, устойчивость, колебания. М.: Наука, 1967. 266 с.
2. Амбарцумян С.А. Основные уравнения и соотношения разномодульной теории упругости анизотропного тела // Изв. АН СССР. МТТ. 1969. № 3. С. 51–61.
3. Амбарцумян С.А. Разномодульная теория упругости // М.: Наука, 1982. 320 с.

4. Амбарцумян С.А., Хачатурян А.А. Основные уравнения теории упругости для материалов, разнсопротивляющихся растяжению и сжатию // Инж. журн. МТТ. 1966. №2. С. 44–53.
5. Амбарцумян С.А., Хачатурян А.А. К разномодульной теории упругости // Инж. журн. МТТ. 1966. №6. С. 64–67.
6. Jones R.M. A Nonsystemmetric Compliance Matrix Approach to Nonlinear Multimoduls Ortotropic Materials // AIAA Journal. 1977. Vol. 15. №10. Pp. 1436–1443.
7. Jones R.M., Nelson D.A.R. Material for nonlinear Deformation // AIAA Journal. 1976. Vol. 14. №6. Pp. 709–716.
8. Jones R.M. Modeling Nonlinear Deformation of Carbon-Carbon Composite Materials // AIAA Journal. 1980. Vol. 18. №8. Pp. 995–1001.
9. Jones R.M. Stress-Strain Relations for Materials with Different Moduli in Tension and Compression / R.M.Jones // AIAA Journal. 1977. Vol. 15. №1. Pp. 16–25.
10. Bert C.W. Models for Fibrous Composite with Different Properties in Tension and Compression // Transaction of the ASME. 1977. Vol. 99 H. Ser. D. No 4. Pp. 344–349.
11. Bert C.W. Micromechanics of the different elastic behavior of filamentary composite in tension and compression // Mechanics of bimodulus materials. 1979. Pp. 17–28.
12. Bert C.W., Gordaninejad F. Deflection of Thick Beams of Multimodular Materials // International Journal for Numerical Methods in Engineering. 1984. Vol. 20. Pp. 479–503.
13. Bert C.W., Reddy J.N., Chao W.C. Bending of Thick Rectanqular Plates Laminated of Bimodulus Composite Materials // AIAA Journal. 1981. Vol. 19. No 10. Pp. 1342–1349.
14. Золочевский А.А. К тензорной связи в теориях упругости и пластичности анизотропных композитных материалов, разнсопротивляющихся растяжению и сжатию // Механика композитных материалов. 1985. № 1. С. 53–58.
15. Золочевский А.А. Определяющие уравнения и некоторые задачи разномодульной теории упругости анизотропных материалов // ПМТФ. 1985. №4. С. 131–138.
16. Золочевский А.А. К теории пластичности материалов различно сопротивляющихся растяжению и сжатию // Изв. вузов. Машиностроение. 1986. №6. С. 13–16.
17. Золочевский А.А. О соотношениях теории упругости анизотропных разномодульных материалов / А.А.Золочевский // Динамика и прочность машин. 1981. Вып. 34. С. 3–8.
18. Золочевский А.А. Соотношения разномодульной теории упругости анизотропных материалов на основе трех смешанных инвариантов / А.А.Золочевский // Динамика и прочность машин. 1987. Вып. 46. С. 85–89.
19. Золочевский А.А., Морачковский О.К. Направления развития моделей и методов расчета нелинейного деформирования тел и элементов машиностроительных конструкций // Динамика и прочность машин. 1989. Вып. 50. С. 3–9.
20. Золочевский А.А., Склепус С.Н. К теории пластичности с тремя инвариантами напряженного состояния // Изв. вузов. Машиностроение. 1987. №5. С. 7–10.
21. Золочевский А.А. Об учете разнсопротивляемости в теории ползучести изотропных и анизотропных материалов // ПМТФ. 1982. №4. С. 140–144.
22. Ломакин Е.В. Разномодульность композитных материалов // Механика композитных материалов. 1981. №1. С. 23–29.
23. Ломакин Е.В. Соотношения теории упругости для анизотропного тела, деформационные характеристики которых зависят от вида напряженного состояния // Изв. АН СССР. МТТ. 1983. №3. С. 63–69.
24. Березин И.С., Жидков Н.П. Методы вычислений: в 2 т. Т. 1. М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит.-ры. 1959. С. 464.
25. Матченко Н.М., Трещев А.А. Учет влияния вида напряженного состояния на упругие и пластические состояния начально изотропных деформируемых сред // Тезисы докладов Международного научно-технического симпозиума «Моделирование и критерии подобия в процессах развитого пластического формоизменения». Орел: ОПТУ, 1996. С.11-12.
26. Матченко Н.М., Трещев А.А. Теория деформирования разнсопротивляю-щихся материалов. Определяющие соотношения. Тула: ТулГУ, 2000. 149 с.
27. Матченко Н.М., Трещев А.А. Теория деформирования разнсопротивляющихся материалов. Тонкие пластины и оболочки. М.; Тула: РААСН; ТулГУ, 2005. 187 с.
28. Трещев А.А. Описание нелинейного деформирования анизотропных материалов // Актуальные проблемы строительства и строительной индустрии: сборник материалов Международной конференции. Тула: ТулГУ. 2001. С. 107–108.
29. Трещев А.А. Описание деформирования нелинейных анизотропных материалов // Архитектурно-строительное материаловедение на рубеже веков: материалы докладов Международной конференции. Белгород: БелГТАСМ. 2002. С. 86.
30. Трещев А.А., Федоссов О.В. Описание нелинейного деформирования анизотропных материалов // Проблемы и достижения строительного материаловедения. 2005. С. 233–234.

31. Трещев А.А. Анизотропные пластины и оболочки из разносопротивляющихся. М.; Тула: РААСН; ТулГУ, 2007. 160 с.
32. Ромашин Д.А. Изгиб круглых пластин из ортотропных существенно-нелинейных материалов, чувствительных к виду напряженного состояния // V-я молодёжная научно-практическая конференция Тульского государственного университета «Молодёжные инновации»: сборник докладов под общей редакцией д-ра техн. наук, проф. Е. А. Ядыкина. В 2 ч. Ч. 1. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. — с. 163-164.
33. Jones R.M., Nelson D.A.R. Theoretical-experimental correlation of material models for non-linear deformation of graphite // *AIAA Journal*. 1976. Vol. 14. № 10. Pp. 1427-1435.
34. Трещев А.А. Анизотропные пластины и оболочки из разносопротивляющихся материалов: монография. М.; Тула: РААСН; ТулГУ. 2007. 160 с.
35. Биргер И.А., Мавлютов Р.Р. Сопротивление материалов: Учебное пособие. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. 560 с.
36. Писаренко Г.С., Можаровский Н.С. Уравнения и краевые задачи теории пластичности и ползучести. Справочное пособие. Киев: Наук. думка, 1981. 496 с.

REFERENCES

1. Ambartsumyan S.A. Teoriya anizotropnykh plastin: prochnost', ustoychivost', kolebaniya [Theory of anisotropic plates: strength, stability, vibrations]. Moscow : Nauka, 1967. 266 p. (rus)
2. Ambartsumyan S.A. Osnovnyye uravneniya i sootnosheniya raznomodul'noy teorii uprugosti anizotropnogo tela [Basic equations and ratios of the multi-modular theory of elasticity of an anisotropic body]. *Izv. Academy of Sciences of the USSR. MTT*. 1969. No 3. Pp. 51–61. (rus)
3. Ambartsumyan S.A. Raznomodul'naya teoriya uprugosti [Multi-modular theory of elasticity]. Moscow : Nauka, 1982. 320 p. (rus)
4. Ambartsumyan S.A., Khachatryan A.A. Osnovnyye uravneniya teorii uprugosti dlya materialov, raznosoprotivlyayushchikhsya rastyazheniyu i szhatiyu [The basic equations of the theory of elasticity for materials of different resistance to tension and compression]. *Inzh. journals MTT*. 1966. No 2. Pp. 44–53. (rus)
5. Ambartsumyan S.A. K raznomodul'noy teorii uprugosti [Towards a multimodular theory of elasticity / S.A. Ambartsumian, A.A. Khachatryan]. *Ing. journals MTT*. 1966. - No 6. Pp. 64–67. (rus)
6. Jones R.M. A Nonsystemmetric Compliance Matrix Approach to Nonlinear Multimoduls Ortotropic Materials. *AIAA Journal*. 1977. Vol. 15. No 10. Pp. 1436–1443.
7. Jones R.M., Nelson D.A.R. Material for nonlinear Deformation. *AIAA Journal*. 1976. Vol. 14. No 6. Pp. 709–716.
8. Jones R.M. Modeling Nonlinear Deformation of the Carbon-Carbon Composite Materials. *AIAA Journal*. 1980. Vol. 18. No 8. Pp. 995-1001.
9. Jones R.M. Stress-Strain Relations for Materials with Moduli in Tension and Compression. *AIAA Journal*. 1977. Vol. 15. No 1. Pp. 16-25.
10. Bert C.W. Models for Fibrous Composites. *Transaction of the ASME*. 1977. Vol. 99 H. Ser. D. No 4. Pp. 344–349.
11. Bert C.W. Micromechanics of the different elastic behavior of filamentary composite in tension and compression. *Mechanics of bimodulus materials*. 1979. Pp. 17–28.
12. Bert C.W., Gordaninejad F. Multi-modular Materials. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 1984. Vol. 20. Pp. 479–503.
13. Bert C.W., Reddy J.N., Chao W.C. Bending of Thick Rectangular Plates Laminated of Bimodulus Composite Materials. *AIAA Journal*. 1981. Vol. 19. No 10. Pp. 1342–1349.
14. Zolochovsky A.A. K tenzornoy svyazi v teoriyakh uprugosti i plastichnosti anizotropnykh kompozitnykh materialov, raznosoprotivlyayushchikhsya rastyazheniyu i szhatiyu [To tensor coupling in the theories of elasticity and plasticity of anisotropic composite materials that are differently opposed to tension and compression]. *Mechanics of composite materials*. 1985. No 1. Pp. 53–58. (rus)
15. Zolochovsky A.A. Opredelyayushchiye uravneniya i nekotoryye zadachi raznomodul'noy teorii uprugosti anizotropnykh materialov [Determining equations and some problems of the multimodular theory of elasticity of anisotropic materials]. *PMTF*. 1985. No 4. Pp. 131–138. (rus)
16. Zolochovsky A.A. K teorii plastichnosti materialov razlichno soprotivlyayushchikhsya rastyazheniyu i szhatiyu [On the theory of plasticity of materials differently resisting tension and compression]. *Izv. universities. Engineering*. 1986. No 6. Pp. 13–16. (rus)
17. Zolochovsky A.A. O sootnosheniyakh teorii uprugosti anizotropnykh raznomodul'nykh materialov [On the relations of the theory of elasticity of anisotropic multi-modular materials]. *Dynamics and durability of machines*. 1981. Vol. 34. Pp. 3–8. (rus)

18. Zolochovsky A.A. Sootnosheniya raznomodul'noy teorii uprugosti anizotropnykh materialov na osnove trekh smeshannykh invariantov [Ratios of the multimodular theory of elasticity of anisotropic materials based on three mixed invariants]. *Dynamics and Strength of Machines*. 1987. Vol. 46. Pp. 85–89. (rus)
19. Zolochovsky A.A., Morachkovsky O.K. Napravleniya razvitiya modeley i metodov rascheta nelineynogo deformirovaniya tel i elementov mashinostroitel'nykh konstruktсий [The directions of development of models and methods for calculating the nonlinear deformation of bodies and elements of engineering structures]. *Dynamics and strength of machines*. 1989. Vol. 50. Pp. 3–9. (rus)
20. Zolochovsky A.A., Sklepus S.N. K teorii plastichnosti s tremya invariantami napryazhennogo sostoyaniya [On the theory of plasticity with three invariants of the stress state]. *Izv. universities. Engineering*. 1987. No 5. Pp. 7–10. (rus)
21. Zolochovsky A.A. Ob uchete raznosoprotivlyayemosti v teorii polzuchesti izotropnykh i anizotropnykh materialov [Concerning consideration of the multiresistance in the theory of creep of isotropic and anisotropic materials]. *PMTF*. 1982. No 4. Pp. 140–144. (rus)
22. Lomakin E.V. Raznomodul'nost' kompozitnykh materialov [Multi-modularity of composite materials]. *Mechanics of composite materials*. 1981. No 1. Pp. 23–29.
23. Lomakin E.V. Sootnosheniya teorii uprugosti dlya anizotropnogo tela, deformatsionnyye kharakteristiki kotorykh zavisyat ot vida napryazhennogo sostoyaniya [Relations of the theory of elasticity for an anisotropic body, the deformation characteristics of which depend on the type of stress state]. *Izv. Academy of Sciences of the USSR. MTT*. 1983. No 3. Pp. 63–69. (rus)
24. Berezin I.S., Zhidkov N.P. Metody vychisleniy: v 2 t. T. 1 [Calculation methods: in 2 tons. T. 1]. Moscow: Gos. Publ. house phys. lit-ry. - 1959. 464 p. (rus)
25. Matchenko N.M., Treshchev A.A. chet vliyaniya vida napryazhennogo sostoyaniya na uprugiy i plasticheskiye sostoyaniya nachal'no izotropnykh deformiruyemykh sred [Accounting for the influence of the type of stress state on elastic and plastic states of initially isotropic deformable media]. Tezisy dokladov Mezhdunarodnogo nauchno-tehnicheskogo simpoziuma "Modelirovaniye i kriterii podobiya v protsessakh razvitogo plasticheskogo formoizmeneniya" [Abstracts of the reports of the International Scientific and Technical Symposium, "Modeling and similarity criteria in the processes of developed plastic form change"]. Orel: OSTU, 1996. Pp. 11-12. (rus)
26. Matchenko N.M., Treshchev A.A. Teoriya deformirovaniya raznosoprotivlyayu-shchikhsya materialov. Opredeleyayushchiye sootnosheniya [Theory of deformation of materials with different resistance. Determining relations]. Tula: TSU, 2000. 149 p. (rus)
27. Matchenko N.M., Treshchev A.A. Teoriya deformirovaniya raznosoprotivlyayushchikhsya materialov. Tonkiye plastiny i obolochki [Theory of deformation of materials with different resistance. Thin plates and shells]. Moscow; Tula: RAACS; TSU, 2005. 187 p. (rus)
28. Treschev A.A. Opisaniye nelineynogo deformirovaniya anizotropnykh materialov [Description of non-linear deformation of anisotropic materials. Actual problems of the construction and construction industry]. Aktual'nyye problemy stroitel'stva i stroitel'noy industrii: sbornik materialov Mezhdunarodnoy konferentsii [Collection of materials of the International Conference]. Tula: TSU. 2001. Pp. 107–108. (rus)
29. Treschev A.A. Opisaniye deformirovaniya nelineynykh anizotropnykh materialov [Description of the deformation of nonlinear anisotropic materials]. Arkhitekturno-stroitel'noye materialovedeniye na rubezhe vekov: materialy dokladov Mezhdunarodnoy konferentsii [Architectural and building materials science at the turn of the century: materials of reports of the International Conference]. Belgorod: BelGTASM. - 2002. - p. 86. (rus)
30. Treschev A.A., Fedoseev O.V. Opisaniye nelineynogo deformirovaniya anizotropnykh materialov [Description of nonlinear deformation of anisotropic materials]. Problemy i dostizheniya stroitel'nogo materialovedeniya [Problems and Achievements of Building Materials]. Belgorod: BSTU. 2005. Pp. 233–234.
31. Treschev A.A. Anizotropnyye plastiny i obolochki iz raznosoprotivlyayushchikhsya [Anisotropic plates and shells from materials of different resistance]. Moscow; Tula: RAACS; TSU, 2007. 160 p. (rus)
32. Romashin D.A. Izgib kruglykh plastin iz ortotropnykh sushchestvenno-nelineynykh materialov, chuvstvitel'nykh k vidu napryazhennogo sostoyaniya [Bending of round plates from orthotropic substantially non-linear materials sensitive to the type of stress state]. V-ya molodozhnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta «Molodozhnyye innovatsii»: sbornik dokladov pod obshchey redaktsiyey d-ra tekhn. nauk, prof. Ye. A. Yadykina. V 2 ch. CH. 1 [V-th Youth Scientific-Practical Conference of Tula State University "Youth Innovations": a collection of reports edited by Dr. tech. sciences, prof. E. A. Yadykina. In 2 hours. Part 1]. Tula: Izd-vo TSU, 2011. Pp. 163-164. (rus)
33. Jones R.M., Nelson D.A.R. Theoretical-experimental correlation of material models for non-linear deformation of graphite. *AIAA Journal*. 1976. Vol. 14. No 10. Pp. 1427-1435.
34. Treschev A.A. Anizotropnyye plastiny i obolochki iz raznosoprotivlyayushchikhsya materialov: monografiya [Anisotropic plates and shells of materials with different resistance: monograph]. Moscow; Tula: RAACS; TSU. 2007. 160 p. (rus)
35. Birger I.A., Mavlyutov R.R. Soprotivleniye materialov: Uchebnoye posobiye [Resistance materials: Tutorial]. Moscow: Science. Ch. ed. Phys. Mat. lit., 1986. 560 p. (rus)

36. Pisarenko G. S., Mozharovsky N. S. Uravneniya i krayevyye zadachi teorii plastichnosti i polzuchesti. Spravochnoye posobiye [Equations and boundary value problems of the theory of plasticity and creep. Reference book]. Kiev: Naukova Dumka, 1981. (rus)

Информация об авторах:

Трещев Александр Анатольевич.

Тульский Государственный Университет, Тула, Россия,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Строительство, строительные материалы и конструкции»,
член-корреспондент РААСН.

E-mail: taa58@yandex.ru

Журин Евгений Андреевич

Тульский Государственный Университет, Тула, Россия,
аспирант кафедры «Строительство, строительные материалы и конструкции».

E-mail: EAZhurin@mail.ru

Information about authors:

Treschev Alexander A.

Tula State University, Tula, Russia,
doctor of technical sciences, professor, head. Department of "Construction, building materials and structures",
corresponding member of RAACS.

E-mail: taa58@yandex.ru

Zhurin Evgeniy A.

Tula State University, Tula, Russia,
graduate student of the department "Construction, building materials and structures."

E-mail: EAZhurin@mail.ru

ПРОГИБЫ И ЧАСТОТЫ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ СОСТАВНЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ КВАДРАТНЫХ ИЗОТРОПНЫХ ПЛАСТИН С ШАРНИРНЫМ ОПИРАНИЕМ ПО КОНТУРУ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ЖЕСТКОСТИ СВЯЗЕЙ СДВИГА

ТУРКОВ А.В., МАРФИН К.В., БАЖЕНОВА А.В.

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орел, Россия

Аннотация. Рассматривается взаимосвязь основной частоты свободных поперечных колебаний ω многослойных изотропных квадратных пластин в ненагруженном состоянии и их максимальных прогибов W_0 при действии равномерно распределённой нагрузки в зависимости от количества слоёв и жесткости связей сдвига. Количество слоёв в составной пластинке изменяется от двух до десяти. В работе проводились численные исследования составных двухслойных пластин на податливых связях методом конечных элементов. Разработана конечно-элементная схема многослойной пластины. Расчет выполнялся в программном комплексе SCAD. Построены кривые для разного количества слоёв многослойных пластин «Прогиб – жесткость связей сдвига» и «Частота поперечных колебаний – жесткость связей сдвига». Показано, что для составных многослойных пластинок квадратного очертания коэффициент K с точностью до 5,4% совпадает с аналогичным коэффициентом для квадратных пластин цельного сечения.

Ключевые слова: составная пластина, связи сдвига, поперечные связи, частота собственных колебаний, максимальный прогиб.

THE DEFLECTIONS AND NATURAL FREQUENCIES OF THE COMPOSITE LAYERED SQUARE ISOTROPIC PLATES WITH HINGED SUPPORTS ALONG THE CONTOUR AT DIFFERENT STIFFNESS VALUES OF SHEAR TIES

TURKOV A.V., MARFIN K.V., BAZHENOVA A.V.

Orel state University named after I. S. Turgenev, Orel, Russia

Abstract. The relationship between the fundamental frequency of free transverse vibrations ω of multilayer isotropic square plates in an unloaded state and their maximum deflections W_0 under the action of a uniformly distributed load depending on the number of layers and the rigidity of shear bonds is considered. The number of layers in a composite plate varies from two to ten. In the work, numerical studies of composite two-layer plates on compliant bonds were carried out using the finite element method. A finite element diagram of a multilayer plate is developed. The calculation was performed in the SCAD software package. The curves for different numbers of layers of multilayer plates "Deflection - stiffness of shear bonds" and "Frequency of transverse vibrations - stiffness of shear bonds" are plotted. It is shown that for composite multilayer square-shaped plates, the coefficient K coincides with an accuracy of 5.4% with the same coefficient for square plates of whole section.

Keywords: composite plate connection shear, cross-connection, the natural frequency of oscillation, the maximum deflection.

Введение

В современном строительстве важную роль играет не только контроль качества выпускаемых изделий, но и оценка несущей способности и жесткости уже существующих и эксплуатирующихся конструкций. В последнее время интенсивно стали развиваться динамические методы оценки качества строительных конструкций. Это связано с выявлением профессором В.И. Коробко нескольких фундаментальных закономерностей в строительной ме-

ханике, в основе которых лежат строгие функциональные взаимосвязи между физическими характеристиками строительных конструкций, в частности, между максимальным прогибом нагруженных конструкций в виде балок и пластинок и их основной частотой колебаний в ненагруженном состоянии. Однако, в отличие от изотропных пластин цельного сечения, для составных многослойных пластин эта закономерность еще не подтверждена. Решение данной проблемы имеет не только научное, но и практическое значение.

Работа многослойных изотропных пластин на податливых механических связях является актуальной проблемой. Пластины разнообразной формы в настоящее время являются распространенными строительными конструктивными элементами, которые подвержены воздействию не только статических, но и динамически нагрузок. А при эксплуатации конструкций под машиностроительные станки и агрегаты, динамических воздействий, порой, не удастся избежать.

В работе [1] профессор В.И. Коробко вывел фундаментальную зависимость для изотропных пластин постоянного сечения, которая формулируется следующим образом: вне зависимости от граничных условий произведение максимального прогиба W_0 от действия равномерно распределенной нагрузки q на квадрат основной частоты колебаний балки в ненагруженном состоянии ω с точностью до размерного множителя q/m есть величина постоянная и соответствует закономерности:

$$W_0 \cdot \omega^2 = K \frac{q}{m}, \quad (1)$$

где m – равномерно распределённая по площади масса пластины.

Эта закономерность носит фундаментальный характер, она позволяет по частоте колебаний пластины найти ее максимальный прогиб и, наоборот, по величине максимального прогиба найти ее основную частоту колебаний. Тем самым, методы определения максимального прогиба пластинок обогащаются методами определения основной частоты колебаний и наоборот. Кроме того, указанная закономерность открывает широкие возможности по развитию и совершенствованию вибрационных методов диагностики и контроля качества строительных конструкций. Применение этой закономерности также возможно в области развития методов геометрического и физико-механического моделирования строительных конструкций.

В работе [2] выведены основные уравнения для составных стержней и пластин с упругоподатливыми поперечными связями и связями сдвига.

Расчетом составных пластин по теории А.Р. Ржаницина занимался Филатов В.В. [3,4], более того, автор глубоко затронул методы расчета, которые значительно расширяют теорию А.Р. Ржаницина, такие как [5,6]. Помимо отечественных исследований в этой области, нестандартный подход представлен в работе [7], где составная стенка представлена в виде нескольких слоев чередующихся мягких и жестких материалов. В работе [8] рассматриваются задачи о собственных колебаниях многослойных пластин с шарнирно опертыми краями. В [9] рассматривается колебания и устойчивость высотных зданий на основе теории слоистых балок.

Исследованиями взаимосвязи максимальных прогибов и частот собственных колебаний двухслойных пластин занимались В.И. Коробко и О.В. Бояркина [10], А.В. Турков, К.В. Марфин и Е.В. Карпова [11, 12]. Чтобы подтвердить закономерность (1) для составных многослойных пластин, были проведены их численные исследования при различном количестве слоёв и переменной жесткости связей сдвига между слоями.

Сложностью расчета составных пластин обусловлена неопределенностью значений их изгибной жесткости вследствие неопределённости жёсткости поперечных связей и связей сдвига. Это обстоятельство выражено в первую очередь значительной податливостью связей, соединяющих слои этих пластин. Для определения действительной податливости связей и совместности работы слоев для составных пластин используют экспериментальные методы.

На сегодняшний день это практически единственный доступный вариант решения поставленной задачи. Однако, закономерность (1) позволит упростить ее решение.

Методы

Численные исследования составных двухслойных пластин на податливых связях проводились методом конечных элементов. В ходе теоретических исследований определялся максимальный прогиб и частота собственных колебаний конструкций.

В качестве расчетной конструкции была принята квадратная составная пластина со сторонами $a \times b = 1000 \times 1000$ мм. Количество слоёв составляло от 2-х до 10-ти. Каждый слой разбивался на 400 (20×20) квадратных пластинчатых конечных элементов. Поперечные связи и связи сдвига вводились во все узлы пластинчатых конечных элементов всех слоёв (рисунок 1).

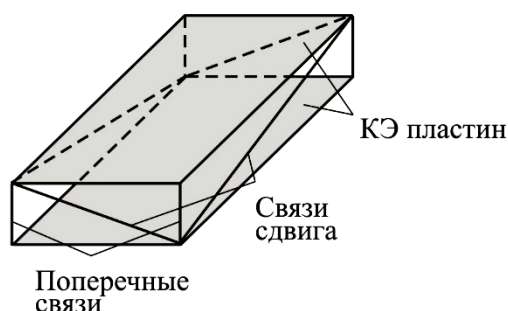


Рисунок 1 – Конечные элементы составной пластины с поперечными связями и связями сдвига

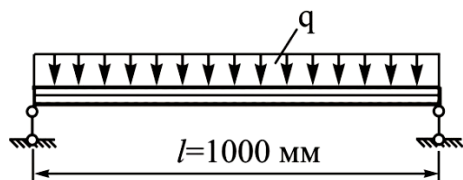


Рисунок 2 – Расчётная схема составной многослойной пластины

Опоры по контуру плиты располагались в узлах конечных элементов конструкции, при этом граничные условия слоёв были одинаковыми (рисунок 2). Слои составной пластинки приняты постоянного сечения толщиной $\delta = 8$ мм из древесно-стружечной плиты, жесткость поперечных связей принята постоянной и составляет $EA_{\text{пс}} = 646$ кН, что соответствует жесткости стального цилиндрического нагеля диаметром 3 мм. Все характеристики слоёв взяты из паспорта изделия: толщина $\delta = 8$ мм, средняя плотность $\rho = 7,40$ кН/м³, модуль упругости при изгибе $E = 2600$ кН/м². Для нахождения частот собственных колебаний в узлы конечных элементов прикладывались сосредоточенные массы от собственного веса слоев в зависимости от грузовой площади узла. При статическом расчёте к верхнему слою прикладывалась равномерно распределённая нагрузка интенсивностью $1,0$ кН/м².

Исследования проводились методом конечных элементов. Расстояние между слоями принималось равным расстоянию между их центрами тяжести слоёв $\delta = 8$ мм. Расчет выполнялся в программном комплексе SCAD.

Критерием точности в работе служит коэффициент K , который определялся из (1). Этот коэффициент для квадратных пластин составляет при шарнирном опирании $K = 1,582$.

Результаты и их анализ

В результате расчёта определялся максимальный прогиб и частота основного тона поперечных колебаний пластин при изменении жёсткости связей сдвига, которая изменялась от $10 \cdot 3$ до 106 кН. В статье представлены таблицы по результатам численных исследований составной 3-х слойной пластины (таблица 1) и 10-и слойной пластины (таблица 2).

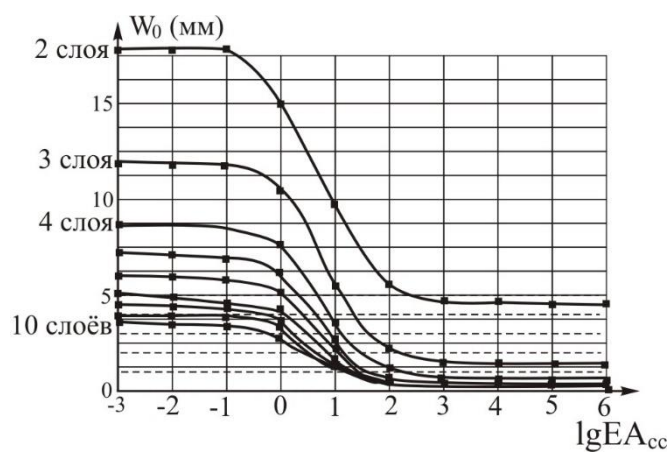
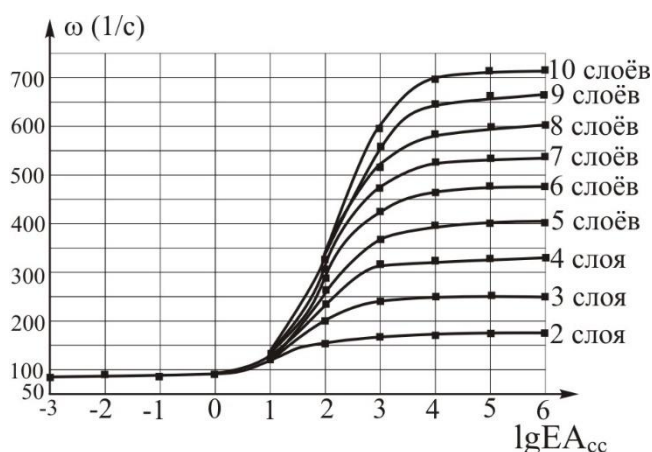
По результатам исследования многослойных пластин графики изменения прогибов и частот колебаний в зависимости от жесткости связей сдвига $EA_{\text{сс}}$ и количества слоев (рисунки 3 и 4).

Таблица 1 – Результаты численных исследований составной квадратной 3-х слойной пластины размером $a \times b = 1000 \times 1000$ мм, шарнирно опертой по контуру

$\lg EA_{cc}$	Круговая частота основного тона, ω (c^{-1})	Максимальный прогиб, W_0 (мм)	$K=W_0 \omega^2/(q/m)$	$K_{аналит}=W_0 \omega^2/(q/m)$ на основе аналитических W_0 и ω	Отклонение K от $K_{аналит}$ (%)
-3	85,69	11,91	1,582	1,582	0,000
-2	85,75	11,89	1,582		0,003
-1	86,31	11,73	1,582		0,028
0	91,59	10,39	1,578		0,263
1	126,30	5,388	1,555		1,695
2	200,67	2,124	1,547		2,193
3	240,87	1,498	1,572		0,609
4	249,31	1,404	1,579		0,199
5	250,35	1,393	1,580		0,149
6	250,46	1,392	1,580		0,144

Таблица 2 – Результаты численных исследований составной квадратной 10-и слойной пластины размером $a \times b = 1000 \times 1000$ мм, шарнирно опертой по контуру

$\lg EA_{cc}$	Круговая частота основного тона, ω (c^{-1})	Максимальный прогиб, W_0 (мм)	$K=W_0 \omega^2/(q/m)$	$K_{аналит}=W_0 \omega^2/(q/m)$ на основе аналитических W_0 и ω	Отклонение K от $K_{аналит}$ (%)
-3	85,70	3,572	1,582	1,582	-0,002
-2	85,77	3,565	1,582		0,001
-1	86,53	3,502	1,581		0,035
0	93,71	2,976	1,576		0,356
1	145,13	1,214	1,542		2,504
2	331,45	0,226	1,497		5,388
3	591,02	0,072	1,522		3,812
4	697,29	0,053	1,549		2,097
5	716,96	0,050	1,557		1,578
6	719,61	0,050	1,558		1,503



Анализ данных показывает, что независимо от жесткости связей сдвига и количества слоёв в составных пластинах фундаментальная зависимость (1) выполняется.

Заключение

В результате исследований подтверждена фундаментальная зависимость (1) для составных многослойных изотропных пластин на податливых связях. Результаты численных исследований показали хорошее совпадение по коэффициенту K . Максимальное расхождение численных и аналитических значений достигает 5,34% в 10-и слойных пластинах при жесткости связей сдвига $EA_{cc} = 10^2$ кН. В основном расхождения не превышают 3%, причём ошибка нарастает с увеличением количества слоёв.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коробко В.И. Об одной "замечательной" закономерности в теории упругих пластинок // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1989. № 11. С. 32-36.
2. Ржаницын, А.Р. Составные стержни и пластинки. М.: Стройиздат, 1986. 316 с.
3. Филатов В.В. К расчету составных пластин по теории А.Р.Ржаницына. // Труды международной научно-технической конф. «Вычислительная механика деформируемого твердого тела». Москва: МИИТ, 2006. Том 2. С. 414-416.
4. Филатов В.В., Мусса Сали. Об учете податливости поперечных связей в расчетах составных пластин по теории // Промышленное и гражданское строительство. 2010. №2. С. 28-29.
5. Филатов В.В. Расчет составных пластин на винклеровском основании с кусочно-постоянным коэффициентом постели // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. 2014. Вып. 2(33). С. 22.
6. Филатов В.В. О расчете составных пластин на вынужденные колебания // Известия вузов. Строительство. 2010. №7. С. 125-128.
7. Kollar Laszlo P. Buckling analysis of coupled shear walls by the multilayer sandwich model // Actatechn. Acad. sei. hung. 1986. 99. №3-4. Pp. 317332.
8. Rikards R., Chate A., Kenser M. Finite-Element-Mjdelle der Vibrationsdampfung dei Schichtplatten // Techn. Mech. 1990. 11. №3. Pp. 186190.
9. Potztc O. Kollar L. Analysis of building structures by replacement sandwich beams // Int. J. Solids and Struct. 2003. 40. №3. Pp.535-553.
10. Коробко В.И., Бояркина О.В. Взаимосвязь задач поперечного изгиба и свободных колебаний треугольных пластинок // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2007. № 22 (94). С. 24-26.
11. Турков А.В., Карпова Е. В. Численные исследования составных пластин треугольного очертания при различных условиях опирания // Сборник трудов международной научно-технической конференции «Строительная наука XXI век». 2015. С. 378-391.
12. Турков А.В., Марфин К.В. Определение коэффициента жесткости шва круглой составной изотропной пластины по её основной частоте колебаний // Строительная механика и расчет сооружений. 2013. №4. С. 58-62.

REFERENCES

1. Korobko V.I. Ob odnoy "zamechatel'noy" zakonomernosti v teorii uprugikh plastinok [One "remarkable" regularity in the theory of elastic plates]. *Izv. vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura*. 1989. No 11. Pp. 32-36. (rus)
2. Rzhانيتsyn, A.R. Sostavnyye sterzhni i plastinki [Compound rods and plates]. Moscow: Stroyizdat, 1986. 316 p. (rus)
3. Filatov V.V. K raschetu sostavnykh plastin po teorii A.R.Rzhانيتsyna [Calculation of composite plates according to the theory of A.R.Zhanitsyn]. *Trudy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konf. "Vychislitel'naya mekhanika deformiruyemogo tverdogo tela"* [Proceedings of the international scientific and technical conf. "Computational mechanics of a deformable solid"]. Moscow: MIIT, 2006. Vol. 2. Pp. 414-416.
4. Filatov V.V., Mussa Sali. Ob uchete podatlivosti poperechnykh svyazey v raschetakh sostavnykh plastin po teorii [About taking into account the compliance of cross-links in the calculations of composite plates according to theory]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2010. No 2. Pp. 28-29. (rus)
5. Filatov V.V. Raschet sostavnykh plastin na vinklerovskom osnovanii s kusochno-postoyannym koefitsiyentom posteli [Calculation of composite plates on a Winkler base with a piecewise constant bed coefficient]. *Internet-vestnik VolgGASU. Ser.: Politematicheskaya*. 2014. Vol. 2 (33). Pp. 22. (rus)
6. Filatov V.V. O raschete sostavnykh plastin na vynuzhdennoye kolebaniya [Calculation of composite plates for forced vibrations]. *Izvestiya vuzov. Stroi-tel'stvo*. 2010. No 7. Pp. 125-128. (rus)
7. Kollar Laszlo P. Buckling analysis of coupled shear walls by the multilayer sandwich model. *Actatechn. Acad. sei. hung.* 1986. 99. No 3-4. Pp. 317332.
8. Rikards R., Chate A., Kenser M. Finite-Element-Mjdelle der Vibrationsdampfung dei Schichtplatten. *Techn. Mech.* 1990. Vol. 11. No 3. Pp. 186190.

9. Potztc O. Kollar L. Analysis of building structures by replacement sandwich beams. *Int. J. Solids and Struct.* 2003. Vol. 40. No 3. Pp.535-553.
10. Korobko V.I., Boyarkina O.V. Vzaimosvyaz' zadach poperechnogo izgiba i svobodnykh kolebaniy treugol'nykh plastinok [The relationship between the problems of transverse bending and free vibrations of triangular plates]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2007. No 22 (94). Pp. 24-26. (rus)
11. Turkov A.V., Karpova Ye. V. Chislennyye issledovaniya sostavnykh plastin treugol'nogo ochertaniya pri razlichnykh usloviyakh opiraniya [Numerical studies of composite plates of triangular shape under various conditions of support]. *Sbornik trudov mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Stroitel'naya nauka XXI vek"* [Proceedings of the international scientific and technical conference "Building Science of the XXI Century"]. 2015. Pp. 378-391. (rus)
12. Turkov A.V., Marfin K.V. Opredeleniye koeffitsiyenta zhestkosti shva krugloy sostavnoy izotrop-noy plasty ny po yeyo osnovnoy chastote kolebaniy [Determination of the stiffness coefficient of a seam of a round composite isotropic plate from its main vibration frequency]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy*. 2013. No 4. Pp. 58-62. (rus)

Информация об авторах:

Турков Андрей Викторович

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орел, Россия,
Доктор технических наук, заведующий кафедрой строительных конструкций и материалов.
E-mail: aturkov@bk.ru

Марфин Кирилл Васильевич

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орел, Россия,
Кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций и материалов.
E-mail: marfinkirill@yandex.ru

Баженова Александра Викторовна

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орел.
инженер

Information about authors:

Turkov Andrey V.

Orel state University named after I. S. Turgenev, Orel, Russia,
Doctor of technical Sciences, head of the Department of building structures and materials,
E-mail: aturkov@bk.ru

Marfin Kirill V.

Orel state University named after I. S. Turgenev, Orel, Russia,
Candidate of technical Sciences, associate Professor of building structures and materials,
E-mail: marfinkirill@yandex.ru

Bazhenova Alexandra V.

Orel state University named after I. S. Turgenev, Orel, Russia,
Engineer

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОБЕСПЕЧЕНИЮ РАБОТОСПОСОБНОСТИ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ В УСЛОВИЯХ КОРРОЗИОННОЙ ОПАСНОСТИ

КОРОЛЁВ В.П.

Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь, Украина

Аннотация. Проанализирован процесс управления технологической безопасностью конструкций и сооружений в условиях коррозионной опасности строительных объектов. Высокий уровень износа и предельные сроки службы конструкций зданий и сооружений составляют существенную угрозу, при которой увеличивается вероятность наступления ущерба. Рассмотрены принципы обеспечения технологической безопасности конструкций и сооружений, как неотъемлемой структурной составляющей безопасности предприятия. Показано, что разработка мер программы обеспечения надежности включает квалитетический мониторинг и риск-диагностику определяющих параметров коррозионного состояния конструкций.

В данном контексте предложена методика оценки работоспособности корродирующих конструкций с учетом требований процессного подхода к управлению качеством и безопасностью на основе принципов DMAIC (Define, Measure, Analyze, Improve, Control). Выполнена классификация признаков работоспособности по классу безопасности систем противокоррозионной защиты конструкций для обоснования эффективности мер технического обслуживания конструкций по фактическому состоянию.

Теоретически и экспериментально обоснованы методы резервирования средств первичной и вторичной защиты стальных конструкций от коррозии. Представлен практический пример постановки и решения прямой и обратной задач расчетной оценки живучести конструкций в условиях коррозионной опасности. Показаны преимущества технико-экономического обоснования показателей коррозионной защищенности на основе информационных моделей управления технологической безопасностью зданий и сооружений.

Ключевые слова: работоспособность стальных конструкций, конструктивная и технологическая безопасность, программа обеспечения надежности, коррозионная защищенность, резервирование, уровень рисков коррозионной опасности

METHOCAL APPROACH TO ASSURING STRUCTURAL STEEL SERVICEABILITY UNDER CORROSION HAZARD

KOROLOV V.P.

Priazovskyi State Technical University, Mariupol, Ukraine

Abstract. The process has been analyzed of monitoring of structure and installation process safety under corrosion hazard of building facilities. A high level of wear and service limits of structures of buildings and installations are the real threat, which increases probability of a loss. The principles are analyzed of assurance of process safety of structures and installations as an integral structural component of the enterprise safety. It is shown that the development of measures of the reliability assurance program comprises the qualimetric monitoring and risk diagnostics of the determining parameters of structural corrosion state.

As used here, a methodology is proposed for assessing serviceability of corrosive structures taking into account the requirements of the process approach to quality and safety management based on the principles of DMAIC (Define, Measure, Analyze, Improve and Control). Classified are the signs

of serviceability based on the safety class of systems of structure corrosion protection to justify efficiency of measures for structure maintenance based on their actual state.

Methods are theoretically and experimentally justified of redundancy of means of primary and secondary corrosion protection of structural steel. A practical example is presented of setting and solving the direct and inverse problems of the design calculation of structure survivability under corrosion hazard.

Key words: *structural steel serviceability, structural and process safety, program of reliability assurance, corrosion protection, redundancy, levels of corrosion hazard risks*

Введение

Обеспечение безопасности строительных объектов имеет огромное техническое, экономическое, социальное и политическое значение, носит комплексный характер и охватывает все стадии жизненного цикла конструкций зданий и сооружений [1-4]. Основой для формирования требований безопасности конструкций и сооружений является теория техногенных и природных катастроф, вопросы правового и экономического управления рисками, принципы и методы мониторинга, диагностики и инженерной защиты.

Развитие нормативно-технического регулирования создает объективные условия для эффективного применения современных материалов, увеличения межремонтных сроков эксплуатации строительных конструкций, повышения безопасности зданий и сооружений [5, 6]. Защищенность строительных объектов, наряду с требованиями конструктивной безопасности (пассивного барьера), определяется мерами технологической безопасности (активного барьера). Активируемые барьеры устанавливаются на основе пяти принципов *DMAIC*, связанных с определением, измерением, анализом, усовершенствованием и контролем технического состояния конструкций. Взаимообусловленность требований конструктивной и технологической безопасности ограничивает технико-экономические угрозы возможных отклонений параметров работоспособного состояния конструкций и сооружений.

Как известно, работоспособность характеризует техническое состояние конструкций, при котором объект соответствует функциональному назначению при наличии допустимого уровня риска. Нормальная эксплуатация зданий и сооружений в условиях деградиационных процессов определяется принятой концепцией технического обслуживания, устанавливающей выбор проектных решений:

- *f*-стратегии отказоустойчивости в течение всего жизненного цикла конструкций (*fault-tolerance*);
- *s*-стратегии обеспечения работоспособности по фактическому состоянию конструкций (*survivability*).

Решению проблемы технико-экономического обоснования параметров работоспособности строительных объектов, исходя из условий эксплуатации, надежности и долговечности, посвящены работы научной школы проф. Я.М. Лихтарникова, становление которой в Донбассе связано с 60-70 годами прошлого столетия [7, 8]. Сущность сформированного методического подхода отражают базовые показатели качества металлоконструкций. Проведенные исследования строительных коэффициентов позволили разработать интегральную структуру рангов показателей качества (их весовых коэффициентов). Оценка работоспособности строительных металлоконструкций на основе методов современной квалитологии позволяет формировать модели и алгоритмы анализа рисков методами экспертной квалитметрии [9, 10].

Важным аспектом поддержания эксплуатационных характеристик работоспособности металлоконструкций является создание эффективной системы управления техническим обслуживанием и ремонтом. Наиболее сложные вопросы регулирования технологической безопасности строительных объектов возникают при оценивании показателей ремонтпригодности и живучести конструкций [11-13]. Вместе с этим, новые возможности информационных технологий [14, 15] создают благоприятные условия для накопления и учета данных мо-

ниторинга параметров технического состояния, диагностики и анализа рисков объектов повышенного уровня ответственности.

В связи с практической значимостью подобных задач приобретает очевидную актуальность развитие основных положений, принципов и критериев оценивания работоспособности при техническом обслуживании конструкций и сооружений по фактическому состоянию с учетом технологий построения автоматизированных баз данных и цифрового моделирования технико-экономических рисков. Не вызывает сомнения, что широкий спектр средств обеспечения безопасности должен быть реализован для совершенствования требований технического регулирования строительных объектов в условиях опасных природных и техногенных факторов, среди которых особое внимание вызывают коррозионные воздействия [16, 17].

К сожалению, действующие нормативные документы не содержат указаний по количественной оценке показателей работоспособности металлоконструкций с учетом факторов коррозионного разрушения. Подавляющее большинство ведомственных стандартов о безопасности зданий и сооружений ограничиваются характеристиками коррозионных поражений конструкций и их защитных покрытий в соответствии с рекомендациями Пособия по контролю и восстановлению защиты от коррозии к СНиП 2.03.11-85 [18]. Такой подход не позволяет производить подтверждение соответствия показателей надежности и безопасности и снижает эффективность рационального выбора средств защиты металлоконструкций от коррозии.

Целью исследования является методическое обоснование принципов и задач оценки работоспособности корродирующих конструкций для разработки информационных моделей управления технологической безопасностью зданий и сооружений.

Принципы и методы оценки работоспособности

Снижение работоспособности конструкций связано с необратимыми деградационными процессами случайного характера, протекающими при эксплуатации зданий и сооружений. Коррозионный износ сопровождается накоплением повреждений элементов и их защитных покрытий, что вызывает изменения геометрических характеристик сечений и механических свойств материала конструкций.

Общеизвестно, что описание процесса накопления повреждений имеет громоздкое аналитическое описание в виде вероятностно-физических моделей типа DM-распределения. Инженерная практика диктует требования выявления параметров технического состояния строительных объектов с учетом процессного подхода к управлению качеством (*TQM*) и безопасностью на основе принципов *DMAIC* (рис. 1) [19, 20].

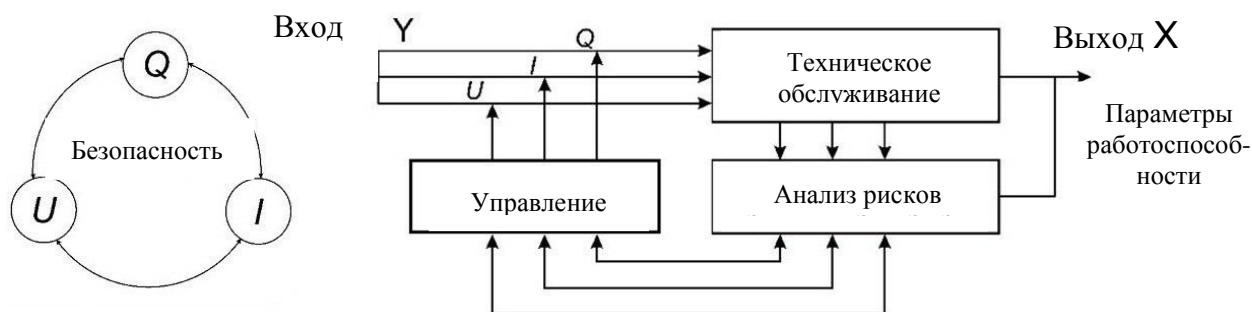


Рисунок 1 – Схема управления безопасностью конструкций зданий и сооружений: техническая *Q*, информационная *I* и управленческая *U* составляющие

Одним из эффективных направлений обеспечения безопасности является разработка программ обеспечения надежности (ПОН) для резервирования работоспособности по результатам квалитетного мониторинга и риск-диагностики корродирующих конструкций. Контроль параметров работоспособности («выход» системы X) и сравнительный анализ показателей надежности («вход» системы Y) формирует условия выявления опасности (класса риска) и разработки превентивных мер по ограничению или предотвращению коррозионного разрушения (табл. 1). Уровень рисков технологической безопасности устанавливается с учетом групп ответственности, уровня угроз и уязвимости конструкций зданий и сооружений (табл. 2).

Таблица 1 – Условия резервирования надежности на основе параметров работоспособности

Обозначение категории ответственности	Условие резервирования / Признаки соответствия категории ответственности требованиям коррозионной защищенности	Параметры работоспособности				
		Класс риска СПЗК	Критерий единичного отказа защитных покрытий		Коэффициент надежности	
			A_z	h_k , мкм	γ_{zn}	γ_{zk}
П1	ВР / Допускает снижение декоративных свойств вторичной защиты	3	0,85	-	0,99	0,95
		4	0,90		1,00	0,99
П2	ВР / Не допускает снижения защитных свойств вторичной защиты	3	0,55	-	0,95	0,90
		4	0,60		0,99	0,95
П3	ВР / Допускает снижение защитных свойств вторичной защиты	3	0,40	50	0,90	0,85
		4	0,45	30	0,95	0,90
П4	ПР / Допускает снижение характеристик первичной защиты	3	0,30	100	0,85	0,80
		4	0,35	70	0,90	0,85

Таблица 2 – Риски технологической безопасности (R_i , балл) в зависимости от параметров работоспособности конструкций и сооружений

Класс надежности СПЗК	Уровень угрозы (категория технического состояния)														
	Низкий (I)			Ограниченный (II)			Средний (III)			Высокий (IV)			Предельный (V)		
	Оценка уязвимости (категория ответственности)														
	В	Б	А	В	Б	А	В	Б	А	В	Б	А	В	Б	А
ZI	1	1	2	2	2	3	3	3	4	4	5	5	6	6	7
ZII	1	2	2	2	3	3	3	4	4	5	5	6	6	7	7
ZIII	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5	6	6	7	7	7
ZIV	2	2	3	3	4	4	4	5	5	6	6	7	7	7	8
KI	2	3	3	4	4	4	5	5	6	6	7	7	7	8	8
KII	3	3	4	4	4	5	5	6	6	7	7	7	8	8	9
KIII	3	4	4	4	5	5	6	6	7	7	7	8	8	9	9
KIV	4	4	4	5	5	6	6	7	7	7	8	8	9	9	10
KV	4	4	5	5	6	6	7	7	7	8	8	9	9	10	10

Оценка технологической безопасности корродирующих конструкций выполняется на основе классического метода анализа рисков HAZOP (Hazard and Operability Study), регламентированного требованиями ISO/IEC 31010. Как известно, условия конструктивной безопасности задаются с использованием показателей обобщенной матрицы надежности систе-

мы противокоррозионной защиты конструкций (СПЗК) [16, см. табл. 2]. Подтверждение соответствия характеристик проектной надежности СПЗК и параметров технологической безопасности корродирующих конструкций осуществляется путем идентификации рисков по признакам, установленным в табл. 3. Во многих случаях оценивание класса риска является технико-экономическим обоснованием вариантов корректировки ПОН с учетом фактического технического состояния, результатов диагностики и мер поддержания работоспособности конструкций.

Таблица 3 – Классификация признаков работоспособности по классу безопасности корродирующих конструкций и сооружений

Состояние СПЗК	Класс безопасности	Наименование риска	Характеристика потерь	Уровень риска технологической безопасности (R_t , балл)	Размер потенциального ущерба, МРОТ*
Коррозионная опасность	1	Катастрофичный	Частичное или полное разрушение конструкций и сооружений	9–10	> 72500
	2	Критичный	Потери превышают расчетные суммы валового дохода восстановления объектов	7–8	25000–72500
	3	Допустимый	Потери не превышают расчетные суммы прибыли при продлении ресурса и технологическом обновлении объектов	5–6	2500 – 25000
Коррозионная защищенность	4	Приемлемый	Потери не превышают затрат на поддержание качества в период срока эксплуатации объекта	1–4	< 2500

*МРОТ – минимальный размер оплаты труда

Необходимо отметить, что формирование методической основы (см. рис.1) и регламента требований снижения рисков технологической безопасности зданий и сооружений (см. табл. 1-3) ограничивает неопределенность признаков коррозионной опасности. Такой подход создает условия для обоснованного выбора варианта резервирования мер защиты и восстановления работоспособного состояния корродирующих конструкций с учетом всех стадий жизненного цикла строительного объекта (рис.2).

По определению риск является функцией вероятности реализации угрозы, а также величины возможного ущерба. Принципиальной особенностью является взаимосвязь качественных и количественных показателей оценки рисков. Вместе с этим, для структурирования входных данных при оценке рисков, необходим интегральный показатель, который определяет базисную основу анализа и принятия решений. По мнению авторов работы [19], таким комплексным критерием может служить индекс уровня риска коррозионной защищенности (УРКЗ):

$$\text{УРКЗ} = \text{КСКП} / \text{ЗСЗК}, \quad (1)$$

где **КСКП** – компенсационная составляющая коррозионных потерь;

ЗСЗК – затраты на систему защиты от коррозии.

Индикаторы КСКП и ЗСЗК (в денежных единицах) рассчитывают на единую натуральную единицу измерения, характеризующую сравниваемые конструкции (шт., т, м³, м², м). Индекс УРКЗ изменяется от нуля до единицы, выше которой риск не оправдан. Анализ УРКЗ позволяет производить нормирование его интервальных значений по группам объектов.

Индикаторный подход связан в первую очередь с необходимостью эффективного использования материалов и технологий. Сущность организационно-экономического механиз-

ма управления качеством, надежностью и безопасностью конструкций и их защитных покрытий определяется обоснованием требуемых ЗСЗК на основе оценки КСКП и УРКЗ. Приняв УРКЗ за основу, мы получаем возможность анализа коррозионной защищенности по классификационным категориям живучести конструкций.

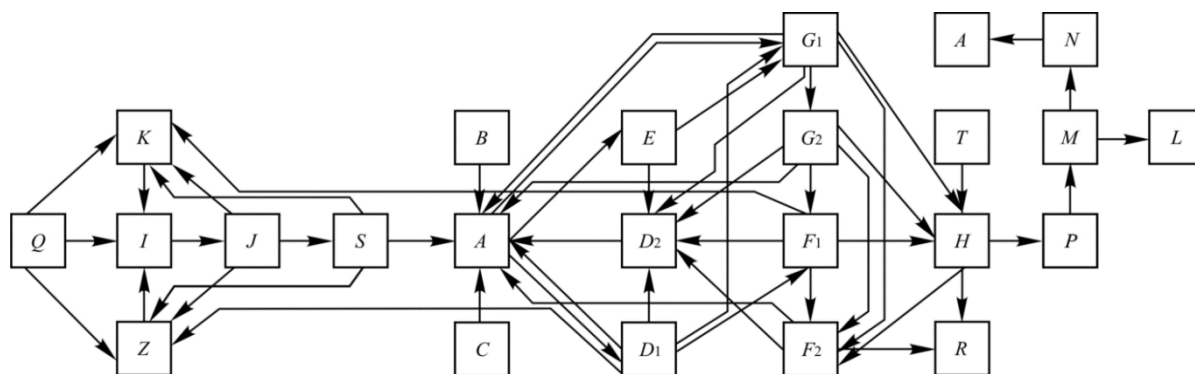


Рисунок 2 – Обобщенная структурная модель работоспособности по признакам коррозионной опасности:
А - сохранение объектом исправного состояния в период нормальной эксплуатации; В - нарушение исправного состояния технологического оборудования и изменение степени агрессивности воздействий; С - нарушение работоспособного состояния ограждающих конструкций и изменение степени агрессивности воздействий; D₁ - нарушение работоспособного состояния противокоррозионной защиты и появление коррозионных поражений; D₂ - восстановление работоспособного состояния противокоррозионной защиты; Е - нарушение исправного состояния противокоррозионной защиты; F₁ - нарушение исправного состояния в результате коррозионно-механических повреждений; F₂ - восстановление работоспособного состояния резервируемых мер защиты конструктивного элемента; G₁ - нарушение исправного состояния в результате отклонения фактического состояния конструкции от предусмотренного проектом; G₂ - восстановление исправного состояния по проектным требованиям; Н - нарушение работоспособности по признакам коррозионной опасности стальных конструкций; Т - введение конструктивно-технологических ограничений для восстановления работоспособного состояния; R - продление ресурса за фактическим сроком службы объекта путем восстановления работоспособного состояния; Р - переход объекта в предельное состояние (аварийный режим); М - вывод из эксплуатации; L - ликвидация (демонтаж) объекта; N - замена (монтаж) новой конструкции или сооружения

Исходя из индикаторного подхода, живучесть отражает интегральные свойства корродирующих конструкций, позволяющие сохранять ограниченную работоспособность при наличии дефектов и повреждений. Количественные показатели живучести существенно зависят от параметров работоспособности конструкций и сооружений. Поэтому, в качестве обобщенной характеристики работоспособного состояния конструкций при квалитетном мониторинге устанавливается уровень риска технологической безопасности. Для корродирующих конструкций живучесть характеризует способность мер первичной и вторичной защиты от коррозии противодействовать деградиационным процессам до частичного или полного восстановления работоспособного состояния. Резервирование корродирующих конструкций на уровне приемлемого риска включает четыре последовательных этапа: задание показателей надежности (долговечность, ремонтпригодность); выбор условий резервирования первичной и вторичной защиты (класс надежности и класс безопасности); обоснование критерия живучести с учетом единичного отказа средств защиты; разработку спецификации восстановления работоспособности СПЗК.

Резервирование надежности СПЗК направлено на изменение оценённого состояния коррозионной опасности (KI - KV) и переход к режиму коррозионной защищенности строи-

тельного объекта (ZI - ZIV) [17, 20]. Элементы ПОН f - стратегии рассчитаны на реализацию принципов функционального и временного резервирования коррозионной защищенности стальных конструкций. Средства защиты f - стратегии призваны обеспечить коррозионную стойкость конструкций (ПР - первичное резервирование) и долговременную защиту (ВР - вторичное резервирование). Временное резервирование связано с расчетно-измерительным методом определения долговечности и ремонтпригодности. Элементы s – стратегии требуют контроля параметров живучести и послеремонтной несущей способности. При этом для элементов ПОН s – стратегии существенным является наличие эффективной системы мониторинга, диагностики и принятия решений на основе анализа рисков мер первичной и вторичной защиты для восстановления работоспособности конструкций зданий и сооружений.

На основе представленного анализа можно заключить, что работоспособность стальных конструкций может быть обеспечена при поэтапном рассмотрении задач временного резервирования несущей способности стальных конструкций с учётом функциональной живучести систем коррозионной защищенности в области приемлемого риска последствий коррозионно-механического разрушения.

Экспериментальное обоснование моделей резервирования

Основными входными данными для идентификации работоспособности по методу HAZOP являются определяющие параметры коррозионного состояния (ОПКС), а также цели и функциональные задачи обеспечения конструктивной безопасности СПЗК (см. табл. 1). С позиций квалитетного мониторинга задача контроля ОПКС включает оценку условий технологической безопасности (R_i , балл) на уровне приемлемого или допустимого рисков и разработку мер технического обслуживания по фактическому состоянию. При выявлении критических значений ($R_i=7 - 8$ баллов) устранение негативных последствий изменения эксплуатационной несущей способности производится на основе расчета или испытаний корродирующих конструкций.

В работе [19] сформулированы условия прямой и обратной задачи расчетной оценки живучести. Прямая задача отражает требования конструктивной безопасности на стадии проектирования: по заданным показателям матрицы надежности СПЗК определить фиктивную коррозионную нагрузку (A_f). Работоспособность корродирующих конструкций связана с условиями обратной задачи расчета живучести: по измеренным ОПКС выбрать модель восстановления стальных конструкций.

Рассмотрим условия прямой задачи живучести на примере расчета параметров конструктивной безопасности балочных стальных элементов рабочей площадки (табл. 4).

Для экспериментальной проверки методики оценки работоспособности по признакам коррозионной опасности проведены стендовые определительные испытания балочных элементов Z – образного сечения (далее по тексту - образцы), выполненных из холодногнутого тонколистового проката из стали С 235.

Программа эксперимента включала два последовательных этапа:

- на первом этапе (стендовые коррозионные испытания в промышленной атмосфере) 2 образца (Б-1, Б-2 с категорией ответственности П-1) и два образца (Б-3, Б-4 категории П-3) размещались в условиях высокоагрессивных воздействий ($0,08 < K \leq 0,20$). Продолжительность коррозионных испытаний для образцов (Б-1, Б-2) составила один год (коррозионные потери эталонных образцов 1600 г/м^2). Продолжительность коррозионных испытаний для образцов (Б-3, Б-4) составила 2,8 лет (коррозионные потери эталонных образцов 4700 г/м^2);
- на втором этапе (стендовые силовые испытания) образцы закреплялись на опорных элементах испытательного стенда и проходили диагностирование ОПКС путем нагружения и оценки параметров напряженно-деформированного состояния (НДС).

Таблица 4 – Постановка и решение прямой задачи живучести конструкций

№№ п/п	Характеристика условий задачи	Обозначение образцов – марка балки			
		Б-1	Б-2	Б-3	Б-4
1.	Определяющие параметры нормативных требований				
1.1.	Уровень коррозионной опасности	КП		КП	
1.2.	Характеристическое значение годовых коррозионных потерь (A_n), г/м ² год	1200			
1.3.	Коэффициент готовности (K_g)	0,10		0,22	
1.4.	Категория ответственности	С-2		С-4	
1.5.	Коэффициент надежности (γ_{zk})	0,90		0,80	
2.	Алгоритм решения:				
2.1.	Фиктивная коррозионная нагрузка (A_f): $m=7,85 \cdot 10^4$ - переводной коэффициент коррозионных потерь, г/см ³ ; t – приведенная толщина сечения элемента, см.	$A_f = (1 - \gamma_{zk})mt$;			
		3140		6280	
2.2.	Сроки службы: конструкций (T_{ny})/ первичной защиты ($T_{k\gamma}$); коэффициент кинетики коррозионного износа для стали С235 $c=0,78$; коэффициент надежности по воздействиям $\gamma_{fk}=1,2$.	$T_{zk} = \sqrt[3]{A_f / \gamma_{fk} A_n}$;			
		30/3,0		30/6,5	
2.3.	Отношение резерва надежности (Γ):	$\Gamma = \Phi / N$;			
		1,24		1,4	
2.4.	Проектный индекс уровня риска коррозионной защищенности (УРКЗ):	Формула (1)			
		0,41		0,50	

Стенд для определительных испытаний (рис. 3) представляет сборно-разборную установку, опорные конструкции, балки – образцы (Б-1 ÷ Б-4), профилированный настил, обеспечивающий совместную работу системы пневматического нагружения, тензометрическую аппаратуру для измерения относительных деформаций, механические прогибомеры и индикаторы часового типа, манометр для контроля величины испытательной нагрузки.



а) опорные конструкции и пневматическая система нагружения



б) контроль параметров НДС образца Б – 4

Рисунок 3 – Стендовые силовые испытания балок – образцов с коррозионными повреждениями

Программа экспериментальных исследований предусматривала режимы нагружения, при которых балки – образцы сохраняли работоспособное состояние без признаков потери несущей способности. При этом основное внимание уделялось контролю изменения НДС балок – образцов, с учетом различий

ОПКС в результате коррозионного разрушения на первом этапе стендовых испытаний.

Расчетные условия для обратной задачи живучести по данным квалитетричного мониторинга и диагностики ОПКС балочных стальных элементов рабочей площадки представлены в табл. 5.

Таблица 5 – Постановка и решение обратной задачи живучести конструкций

№№ п/п	Характеристика условий задачи	Обозначение образцов – марка балки				
		Б-1	Б-2	Б-3	Б-4	
1.	Определяющие параметры коррозионного состояния					
1.1.	Контролируемое значение годовых коррозионных потерь (A_k), г/м ² год	1350		1480		
1.2.	Коэффициент коррозионных потерь (γ_{cf})	0,95	0,97	0,86	0,84	
1.3.	Срок службы на момент контроля ОПКС (T_{km}), год	1,0		2,8		
2.	Алгоритм решения:					
2.1.	Коэффициент обратной связи (ψ_m) режима эксплуатации на момент контроля	$\psi_m = 1 - \gamma_{cf}$;				
		0,05	0,03	0,14	0,16	
2.2.	Интегральный показатель живучести (η_m)	$\eta = 1 - 1/(\Gamma - \psi)$				
		0,16	0,17	0,21	0,19	
2.3.	Коэффициент обратной связи (ψ_{cr}) для допустимой живучести ($\eta_{cr}=0,05$)	$\psi = \Gamma - 1/(1-\eta)$				
		0,19		0,35		
2.4.	Ресурс ($T_{k\eta}$) по критерию живучести ($\eta_{cr}=0,05$), год	$T_{k\eta} = \sqrt{mt\psi_{cr}/A_k}$;				
		7,0		13,0		
2.5.	Остаточный ресурс (T_{rm}) на момент контроля, год	$T_{rm} = T_{k\eta} - T_{km}$;				
		6,0		10,2		
2.6.	Коэффициент готовности (K_{gm}) на момент контроля	0,21		0,38		
2.7.	Уровень коррозионной опасности на момент контроля	КП		КІ		
2.8.	Индекс уровня риска коррозионной защищенности (УРКЗ) по данным мониторинга ОПКС:	Формула (1)				
		0,31		0,75		

Сравнительная оценка экспериментальных данных, полученных при силовых определительных испытаниях, выявила обоснованность ОПКС и расчетных ситуаций, использованных при анализе НДС балок – образцов Б-1 ÷ Б-4. Средняя сходимость расчетных и экспериментальных значений составила от 10 до 15%.

Анализ условий прямой и обратной задач живучести по данным моделирования параметров конструктивной (табл. 4) и технологической безопасности (табл. 5) позволяет заключить, что выявленные взаимосвязи проектных и эксплуатационных показателей надежности устраняют неопределенность признаков коррозионной опасности. Таким образом, результаты квалитетрического мониторинга и диагностики корродирующих конструкций позволяют формировать информационную базу данных для технического обслуживания конструкций по фактическому состоянию с учетом приемлемого уровня риска (рис. 4).

Повышение работоспособности по условиям функционального резервирования стальных конструкций осуществляется заданием требуемого класса надежности СПЗК посредством избыточности мер первичной и вторичной защиты по сравнению с минимально необходимыми для выполнения установленных функций строительного объекта. Квалитетрическое обоснование работоспособности корродирующих конструкций создает возможность подтверждения соответствия расчетных критериев временного резервирования (долговечности, живучести, ремонтпригодности).



Рисунок 4 – Организационно-методическая схема управления технологической безопасностью строительных объектов

Следует отметить, что постановка и решение прямой и обратной задач оценки живучести отражает требования технико-экономического анализа для сбалансированного применения средств и методов первичной и вторичной защиты от клоррозии. Представленные задачи содержат объективные данные для сравнительного анализа эффективности мер первичной и вторичной защиты с учетом индексного задания коэффициента сочетания элементов коррозийной защищенности (СЭКЗ):

$$\text{СЭКЗ} = \text{ЗСЗК(II)} / \text{ЗСЗК(I)}, \quad (2)$$

где ЗСЗК(I) –затраты на систему первичной защиты от коррозии;
ЗСЗК(II) – затраты на систему вторичной защиты от коррозии.

Разработанная процедура организационно-методического управления технологической безопасностью (см. рис. 4) обеспечивает обоснованное и своевременное принятие решений для поддержания работоспособности конструкций при техническом обслуживании по фактическому состоянию.

Выводы

1. Обеспечение надежности и безопасности строительных объектов в условиях коррозионной опасности требует совершенствования нормативно-технических положений и принципов оценки работоспособности конструкций и сооружений. Снижение эксплуатационных затрат на поддержание надежности конструкций при техническом обслуживании по фактическому состоянию связано с анализом угроз, оценкой уязвимости и идентификацией рисков коррозионного разрушения.

2. Разработанная методика управления технологической безопасностью предполагает проведение квалитетричного мониторинга (служба технической эксплуатации объекта) и риск-диагностики корродирующих конструкций (экспертная организация). При этом, формирование ПОН осуществляется в соответствии с требованиями, включающими оценку критериев функционального и временного резервирования средств коррозионной защищенности. Сформулированы и экспериментально апробированы условия решения прямой и обратной задач подтверждения соответствия живучести корродирующих конструкций с учетом ОПКС.

3. Представленные в статье принципы и задачи оценивания работоспособности в условиях коррозионной опасности создают условия для информационного моделирования параметров долговечности, живучести и ремонтпригодности конструкций и их защитных покрытий. Таким образом, инструментарий метода анализа рисков HAZOP, примененный

для управления технологической безопасностью корродирующих конструкций с учетом приемлемого риска СПЗК, может быть реализован для пересмотра положений Пособия [18] и технико-экономического обоснования восстановления средств первичной и вторичной защиты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михеев Д.В. О системе технического регулирования в строительстве // Строительство и реконструкция. 2016. №3 (65). С. 5-9.
2. Абелев М. Ю., Махова И. Д. Современное страхование строительных рисков // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 4. С. 7-10.
3. Мамин А. Н., Кодыш Э. Н., Бобров В. В. Разработка нормативной документации в области эксплуатации зданий и сооружений // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 6. С. 24-27.
4. Ведяков И. И., Еремеев П. Г., Соловьев Д. В. Научно-техническое сопровождение и нормативные требования при реализации проектов зданий и сооружений повышенного уровня ответственности // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 12. С. 14-19.
5. Ведяков И. И., Одесский П. Д., Гуров С. В. О нормировании материалов в новом своде правил СП 16.13330.2017 "СНиП II-23-81* Стальные конструкции" // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 8. С. 61-69.
6. Степанова В. Ф., Розенталь Н. К., Чехний Г. В. Актуализация свода правил 28.13330.2017 "Защита строительных конструкций от коррозии" // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 3. С. 19-25.
7. Лихтарников Я.М. Вариантное проектирование и оптимизация стальных конструкций. – М.: Стройиздат, 1979. – 319 с.
8. Лихтарников Я.М., Летников Н.С., Левченко В.Н. Техничко-экономические основы проектирования строительных конструкций. – Киев – Донецк: Вища школа, 1980. – 240 с.
9. V. Korolov, Yu. Filatov, N. Magunova, P. Korolov. Management of the Quality of Corrosion Protection of Structural Steel Based on Corrosion Risk Level // Journal of Materials Science and Engineering A & B, V.3, No. 11. New York: David Publishing Company, 2013. pp. 740 – 747.
10. Королёв В.П. Требования качества, надежности и безопасности для управления коррозионной защищенностью металлоконструкций и сооружений / Научный электронный журнал «Вестник науки и образования Северо-запада России», 2018, Т.4, №3, <http://vestnik-nauki.ru/wp-content/uploads/2018/08/2018-N3-Korolov.pdf>
11. Бузало Н.А., Канунников А.В. Определение коэффициента значимости строительных конструкций при оценке технического состояния зданий // Строительство и реконструкция. 2018. №3 (77). С. 3-11.
12. Турков А.В. Метод оценки живучести систем с использованием весовых коэффициентов отдельных элементов стальных конструкций // Строительство и реконструкция. 2016. №4 (66). С. 56-63.
13. Туснин А. Р., Бергер М. П. Расчет фермы с поврежденными элементами // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 11. С. 35-41.
14. Беляев А. В., Антипов С. С. Жизненный цикл объектов строительства при информационном моделировании зданий и сооружений // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 1. С. 65-72.
15. Князева Н. В. Интеграция информационных систем служб эксплуатации с информационной моделью здания // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 9. С. 68-72.
16. Королёв В.П. Нормативное регулирование надежности и безопасности систем противокоррозионной защиты металлоконструкций / В.П. Королёв, И.В. Кущенко // Промышленное и гражданское строительство. – М.: ПГС, 2016. – № 1. – С. 37-42.
17. Korolov V.P. Structural Survivability Reserve Planning Based On Analysis Of Corrosion Hazard Of Industrial Facilities / Korolov P.V., Godun T.N., Trofimchuk T.S. // EUROCORR-2017. 20th International Corrosion Congress & Process Safety Congress 2017 / 3-7 September 2017, Prague, Czech Republic // Book of Abstracts.
18. Пособие по контролю состояния строительных металлических конструкций зданий и сооружений в агрессивных средах, проведению обследований и проектированию восстановления защиты конструкций от коррозии (к СНиП 2.03.11-85) / Сост.: Голубев А.И., Горохов Е.В., Королев В.П. и др. М.: Стройиздат, 1989. 51 с.
19. Королёв П.В., Королёв В.П., Кущенко И.В. Управление рисками коррозионной защищенности при решении прямой и обратной задач живучести стальных конструкций // Вестник Одесской государственной академии строительства и архитектуры. – Одесса: ОГАСА, 2016. – № 63. – С. 67-75.
20. Королёв В.П. Управление безопасностью на основе инноваций технико-экономической защищенности инфраструктурных объектов / Олимпийское наследие и крупномасштабные мероприятия: влияние на экономику, экологию и социокультурную сферу принимающих дестинаций / Материалы X Междунар. науч.-практ. конф., Сочи, 17-18 мая 2018 г. – Сочи: РИЦ ФГБОУ ВО «СГУ», 2018. – 306 с.

REFERENCES

1. Mikheyev D. O sistemye tekhnicheskogo ryegulirovaniya v stroitel'stve [About system of technical regulation in construction]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2016. No.3 (65). Pp. 5-9. (rus)
2. Abyelyev M.Yu., Makhova I.D. Sovremennoye strakhovaniye stroitel'nykh riskov [Modern insurance of construction risks]. *Promyshlyennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2018. No.4. Pp. 7-10. (rus)
3. Mamin A.N., Kodysh E.N., Bobrov V.V. Razrabotka normativnoy dokumentatsii v oblasti ekspluatatsii zdaniy i sooruzheniy [Development of regulations in the field of usage of buildings and installations]. *Promyshlyennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2018. № 6. Pp. 24-27. (rus)
4. Vyedyakov I.I., Yeryemyev P.G., Solovyev D.V. Nauchno-tekhnicheskoye soprovozhdeniye i normativnyye tryebvaniya pri realizatsii proyektov zdaniy i sooruzheniy povyshennogo urovnya otvetstvennosti [Scientific and technical support and regulatory requirements when implementing designs of buildings and installations of a high criticality level]. *Promyshlyennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2018. No.12. Pp. 14-19. (rus)
5. Vyedyakov I.I., Odyessky P.D., Gurov S.V. O normirovaniy materialov v novom svode pravil SP16.13330.2017 "SNiP II-23-81* Stal'nyye konstruksii" [About the rationing of materials in the new set of rules SP 16.13330.2017 "SNiP II-23-81* Steel structures"]. *Promyshlyennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2018. No. 8. Pp. 61-69. (rus)
6. Stepanova V.F., Rozental N.K., Chekhniy G.V. Aktualizatsiya svoda pravil 28.13330.2017 "Zashchita stroitel'nykh konstruksiy ot korrozii" [Updating of Code 28.13330.2017 "Corrosion protection of building structure"]. *Promyshlyennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2018. No.3. Pp. 19-25. (rus)
7. Likhtarnikov Ya.M. Variantnoye proyektirovaniye i optimizatsiya stal'nykh konstruksiy [Trial design and optimization of structural steel]. Moscow. Stroyizdat. 1979. 319 p. (rus)
8. Likhtarnikov Ya.M., Lyetnikov N.S., Lyevenchenko V.N. Tekhniko-ekonomicheskiye osnovy proektirovaniya stroitel'nykh konstruksiy [Technical and economic basis for design of building structures]. Kiev-Donetsk. Vyshcha shkola. 1980. 240 p. (rus)
9. V. Korolov, Yu. Filatov, N. Magunova, P. Korolov. Management of the Quality of Corrosion Protection of Structural Steel Based on Corrosion Risk Level. *Journal of Materials Science and Engineering A & B*, V.3, No. 11. New York. David Publishing Company, 2013. Pp. 740 – 747.
10. Tryebvaniya kachestva, nadezhnosti i bezopasnosti dlya upravleniya korrozionnoy zashchishchennostyu metallokonstruksiy i sooruzheniy [Quality, Reliability and Safety Requirements for Management of Corrosion Protection of Structural Steel and Installations]. *Electronic scientific journal "Vestnik nauki i obrazovaniya Syevero-zapada Rossii"*. 2018. V. 4. No 3. (rus) <http://vestnik-nauki.ru/wp-content/uploads/2018/08/2018-N3-Korolov.pdf>
11. Buzalo N.A., Kanunnikov A.V. Opryedyeleniye koeffitsiyenta znachimosti stroitel'nykh konstruksiy pri otsyenyeniy tekhnicheskogo sostoyaniya zdaniy [Determination of the coefficient of significance of building structures in assessing the technical condition of buildings]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2018. No 3 (77). Pp. 3-11. (rus)
12. Turkov A. V. Myetod otsyenyki zhivuchestiy sistemy s ispolzovaniyem vesovykh koeffitsiyentov otdyelynykh elyemyentov stal'nykh konstruksiy [Method of assessment of survivability using weights factors of elements of steel structures]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2016. No 4 (66). Pp. 56-63. (rus)
13. Tusnin A.R., Byergyer M.P. Raschyety fyermiy s povrezhdyennymi elyemyentami [Analysis of truss with damaged members]. *Promyshlyennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2018. No 11. Pp. 35-41. (rus)
14. Byelyayev A.V., Antipov S.S. Zhiznyennyy tsikl obyektov stroitel'stva pri informatsionnom modelirovaniy zdaniy i sooruzheniy [Life cycle of construction facilities in the course of information modeling of buildings and installations]. *Promyshlyennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2019. No.1. Pp. 65-72. (rus)
15. Knyazyeva N.V. Integratsiya informatsionnykh system sluzhby ekspluatatsii s informatsionnoy modelyu zdaniya [Integration of information system of maintenance service with information model]. *Promyshlyennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2018. No. 9. Pp. 68-72. (rus)
16. Korolov V.P., Kushchenko I.V. Normativnoye regulirovaniye nadezhnosti i bezopasnosti sistemy protivokorrozionnoy zashchity metallokonstruksiy [Regulatory control of reliability and safety of structural steel corrosion protection system]. *Promyshlyennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. Moscow. PGS. 2016. No.1. Pp. 37-42. (rus)
17. Korolov V.P. Structural survivability reserve planning based on analysis of corrosion hazard of industrial facilities. Korolov P.V., Godun T.N., Trofimchuk T.S. EUROCORR-2017. 20th International Corrosion Congress & Process Safety Congress 2017. 3-7 September 2017, Prague, Czech Republic. Book of Abstracts.
18. Golubyev A.I., Gorokhov Ye.V., Korolov V.P. and others. Posobiye po kontrolyu sostoyaniya stroitel'nykh metallichyeskikh konstruksiy zdaniy i sooruzheniy ot korrozii (k SNiP 2.03.11-85) [Manual on monitoring of state of structural steel of buildings and installations in corrosive environments, surveying and design of renewal of structure corrosion protection (to SNiP 2.03.11-85)]. Moscow. Stroyizdat. 1989. 51 p. (rus)
19. Korolov P.V., Korolov V.P., Kushchenko I.V. Upravleniye riskami korrozionnoy zashchishchennosti pri reshenii pryamoy i obratnoy zadach zhivuchestiy stal'nykh konstruksiy [Corrosion protection risk management in

solving the direct and inverse problems of structural steel survivability]. Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture. 2016. No 63. Pp.67-75.

20. Korolov V.P. Upravlyeniye bezopasnostyu na osnove innovatsiy tekhniko-economichyeskoy zashchishchyennosti infrastrukturykh ob'yektov. Olimpiyskoye naslyediye I krupnomasshtabnyye meropriyatiya: vliyaniye na ekonomiku, ekologiyu I sotsiokulturnuyu sferu prinyimayushchikh destinatsiy. [Safety management based on innovation of technical and economic protection of infrastructure facilities. Olympic legacy and mega-events: Economic, ecological, social and cultural impact on hosting destinations]. Matyerialy X Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konfyeryentsii [Proceedings of X International Scientific and Practical Conference]. Sochi. May 17-18 2018. Sochi. RITS FGBOU VO "SGU". 306 p.

Информация об авторах:

Королёв Владимир Петрович

Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь, Украина,
доктор технических наук, профессор, председатель подкомитета ПК-4 «Противокоррозионная защита в металлостроительстве» технического комитета ТК-301 «Металлостроительство»,

E-mail: center_sts@ukr.net

Information about authors:

Korolov Vladimir P.

Priazovskyi State Technical University, Mariupol, Ukraine,
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Chairman of Sub-committee PK-4 «Corrosion Protection in Metal Construction» of Technical Committee TK-301 «Metal Construction».

E-mail: center_sts@ukr.net

КОНСТРУКТИВНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ МОНОЛИТНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЕРЕКРЫТИЙ ПО НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ И ДЕФОРМАТИВНОСТИ

СМОЛЯГО Г.А.¹, ДРОКИН С.В.², ДРОНОВ А.В.¹,
БЕЛОУСОВ А.П.², СМОЛЯГО Е.Г.²

¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия

²ООО «Строительная экспертиза», г. Белгород, Россия,

Аннотация. Возникновение аварийных ситуаций зданий и сооружений связано с просчетами и недоработками проектной документации, отклонениям от проекта и строительным браком в процессе строительства. Одними из наиболее распространенных конструкций, применяемых в строительстве, являются монолитные железобетонные перекрытия. При их конструировании необходимо учитывать, что в целом ряде случаев определяющими являются требования по деформативности и трещиностойкости, адекватная оценка которых обусловлена учетом физической нелинейности, ползучести бетона, изменением изгибной жесткости сечений и пр. Приведены результаты обследования технического состояния монолитного железобетонного перекрытия про профилированному настилу со значительными прогибами*. В процессе проведения работ, было установлено, что при производстве строительно-монтажных работ плита и балки перекрытия устроены с отклонениями от проекта, плита перекрытия имеет непроектное армирование, в средних балках перекрытия присутствуют многочисленные нормальные и наклонные трещины, а в крайних балках – трещины, вызванные совместным действием изгибающего и крутящего моментов. Поверочный расчет перекрытия без дефектов (выполненного в соответствии с проектом) на проектные и нормативные нагрузки показал, что прочность и деформативность отдельных элементов и всего перекрытия не обеспечена. На основании вышеизложенного при дальнейшей эксплуатации обследуемого перекрытия возможно его обрушение. Выполнено сравнение расхода материалов и приведенных затрат для различных типов перекрытий применительно к рассматриваемому зданию.

Ключевые слова: дефекты, монолитное железобетонное перекрытие, трещины, кручение с изгибом, прогиб, надежность

ASSESSMENT OF STRUCTURAL SAFETY IN STRENGTH AND DURABILITY OF THE CORRUGATED CONCRETE SLAB

SMOLYAGO G.A.¹, DROKIN S.V.², DRONOV A.V.¹,
BELOUSOV A.P.², SMOLYAGO E.G.²

¹BSTU after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia

²ООО «Stroitel'naya expertiza», Belgorod, Russia

Abstract. Emergency cases in buildings are caused by mistakes and imperfections of design documentation, deviations from design documentation and defects of construction. Reinforced concrete structures are the most prevalent type of structures in building and construction. It's necessary to consider that deformability and crack resistance requirements are the main factors of design of such structures. Correct assessment of deformability and crack resistance depends on physical nonlinearity and creep of concrete and change of bending resistance of a section. The results of the assessment of technical condition of the corrugated concrete slab with significant deflections are given in the article. During the assessment it was determined, that in the course of construction the slab and the beams were built with deviations from design, middle beams had numerous normal and shearing cracks, outside beams had cracks caused by torque and bending moment. Calculations of the slab ender reveal that its strength and deformability are not enough to carry the loadings. Further exploitation of the floor slab

* В обследовании также принимали участие Пушкин С.А. и Широкий В.В.

will cause its failure. Economical comparison of various types of floor slabs with reference to the given building is done in the article.

Keywords: *defects, corrugated slab, cracks, torque and bending moment, deflection, durability*

Введение

В настоящее время обеспечение конструктивной безопасности зданий и сооружений различного функционального назначения приобретает все большее значение. Возникновение проблем оценки уровня конструктивной безопасности, с одной стороны, связано со снижением силового сопротивления конструкций во время эксплуатации вследствие появления различных дефектов, включая коррозионные, изменением прочностных и деформативных характеристик материалов, расчетных схем, состояния узлов и связей, просчетами при разработке проектных решений и отступлениями от них в ходе строительства, а также с дефектами, возникающими в ходе строительства и монтажа [1-5].

К основным дефектам при использовании монолитного железобетона можно отнести [6-10]:

- заниженная относительно проектной прочность бетона конструкций вследствие различных причин;
- отклонение величины защитного слоя бетона;
- отклонение от проектных размеров конструкций;
- непроектное расположение конструкций;
- непроектное расположение арматуры.

Методы

Одними из наиболее распространенных конструкций, применяемых в строительстве, являются железобетонные перекрытия, доля затрат на их устройство составляет от 15 до 30% от общей стоимости строительства. Данной факт определяет важность выбора рационального варианта применяемой конструкции перекрытия с точки зрения технологичности изготовления, прочностных и деформативных параметров. При конструировании монолитных железобетонных конструкций перекрытий необходимо учитывать, что в целом ряде случаев определяющими являются требования по деформативности и трещиностойкости, адекватная оценка которых обусловлена учетом физической нелинейности, ползучести бетона, изменением изгибной жесткости сечений и пр. Их неучет может привести, в ряде случаев, к недооценке фактических прогибов монолитного железобетонного перекрытия в процессе возведения и снижению конструктивной безопасности по деформативности [11].

Проводимые обследования технического состояния монолитных железобетонных перекрытий зданий различного функционального назначения свидетельствуют, в целом ряде случаев, как о допущенных просчетах при их проектировании, так и о различных дефектах и несоответствиях, допущенных на стадии изготовления, что нашло своё подтверждение при обследовании 2-х этажного промышленного здания в Белгородской области с размерами в плане 55,0х54,0 м. Конструктивная схема здания представляет собой смешанный каркас с монолитными железобетонными колоннами и монолитным железобетонным перекрытием по профилированному настилу проектной толщиной 234 мм из бетона класса по прочности на сжатие В20. Покрытие – металлические фермы пролетом 16,0; 17,0 и 21,0 м с шагом колонн 6,0 м. Нормативная временная нагрузка на перекрытие согласно проекта составляет 6,0 кПа.

В связи с отсутствием рифленой поверхности настила или профилей, приваренных к настилу поперек гофр, профилированный настил служит в качестве несъемной опалубки для железобетонной монолитной плиты перекрытия.

Проведение обследования было обусловлено определением технического состояния конструкций перекрытий и возможных причин образования существенных прогибов. При

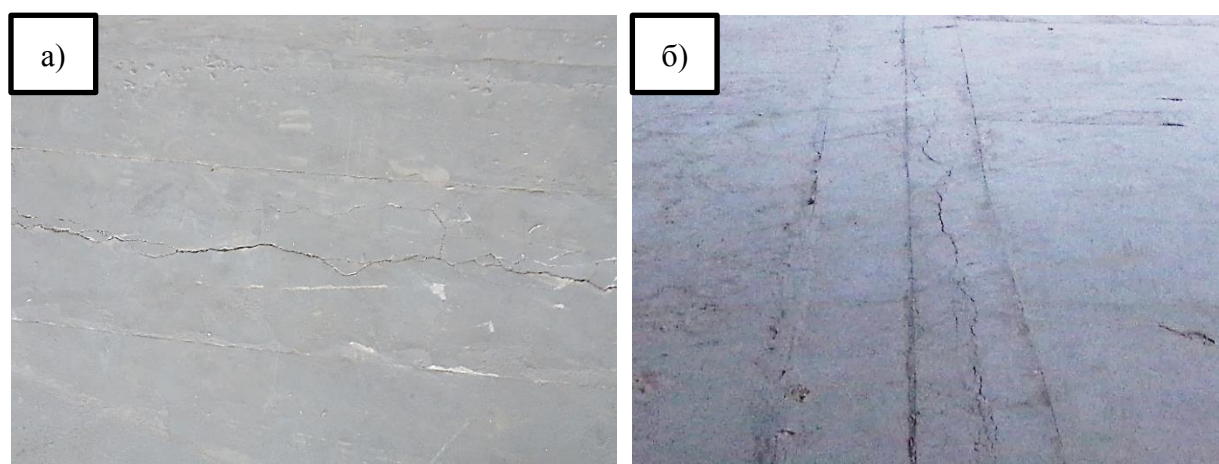
анализе проекта было установлено, что высота плиты перекрытия составляет 234 мм, что меньше рекомендуемых значений (п. 7.7 [12]).

На момент проведения обследования временная нагрузка на перекрытие отсутствовала.

Результаты и обсуждение

При выполнении инженерно-обследовательских работ были выявлены следующие дефекты и повреждения перекрытия.

1) На верхней поверхности монолитного железобетонного перекрытия со стороны 2-го этажа были выявлены многочисленные дефекты и повреждения напольного покрытия (цементно-песчаной стяжки) в виде трещин и отслоений, которые вероятнее всего появились вследствие значительных деформаций перекрытия и нарушения технологии его устройства. Необходимо отметить, что в напольном покрытии над средними балками по всей длине здания присутствуют трещины с шириной раскрытия до 5,0 мм (рис. 1).



**Рисунок 1 – Трещины в напольном покрытии над железобетонными балками перекрытия:
а) участок 1, б) участок 2**

Шурфирование (вскрытие зон) позволило установить, что напольное покрытие выполнено в виде цементно-песчаной стяжки и имеет непостоянную толщину, которая варьируется в пределах от 40 до 60 мм (над балками перекрытия), а на отдельных участках достигает 120 мм (в пролетах). Данный факт свидетельствует о том, что при устройстве перекрытия, варьируя толщиной цементно-песчаной стяжки, входящей в конструкцию пола, выравнивалась верхняя плоскость исследуемого монолитного железобетонного перекрытия, получившего свой первоначальный прогиб уже при его устройстве.

2) Крайние монолитные железобетонные балки перекрытия пролётом 6,0 м имеют силовые трещины шириной раскрытия до 0,3 мм от совместного действия изгибающего и крутящего моментов (рис. 2, а-б).

3) Средние монолитные железобетонные балки перекрытия пролётом 6,0 м имеют многочисленные нормальные и наклонные силовые трещины на опорах и в пролётах (рис. 2, в-г).

4) Значительное количество рабочих швов бетонирования колонн и балок имеют непроектное расположение (рис. 2, д-е), что привело к уменьшению рабочей высоты сечения балок на опоре и образованию силовых трещин.

5) Демонтаж стяжки и защитного слоя бетона позволил установить, что верхнее армирование плиты соответствует проекту (Ø14 А500 шаг 200 мм в обоих направлениях), но стык верхней продольной арматуры плиты перекрытия по длине выполнен над балкой без нахлестки (рис. 3).

Основное верхнее армирование средней балки соответствует проекту (3Ø20 A500), но дополнительная продольная арматура у колонн, а также поперечная арматура отсутствуют.

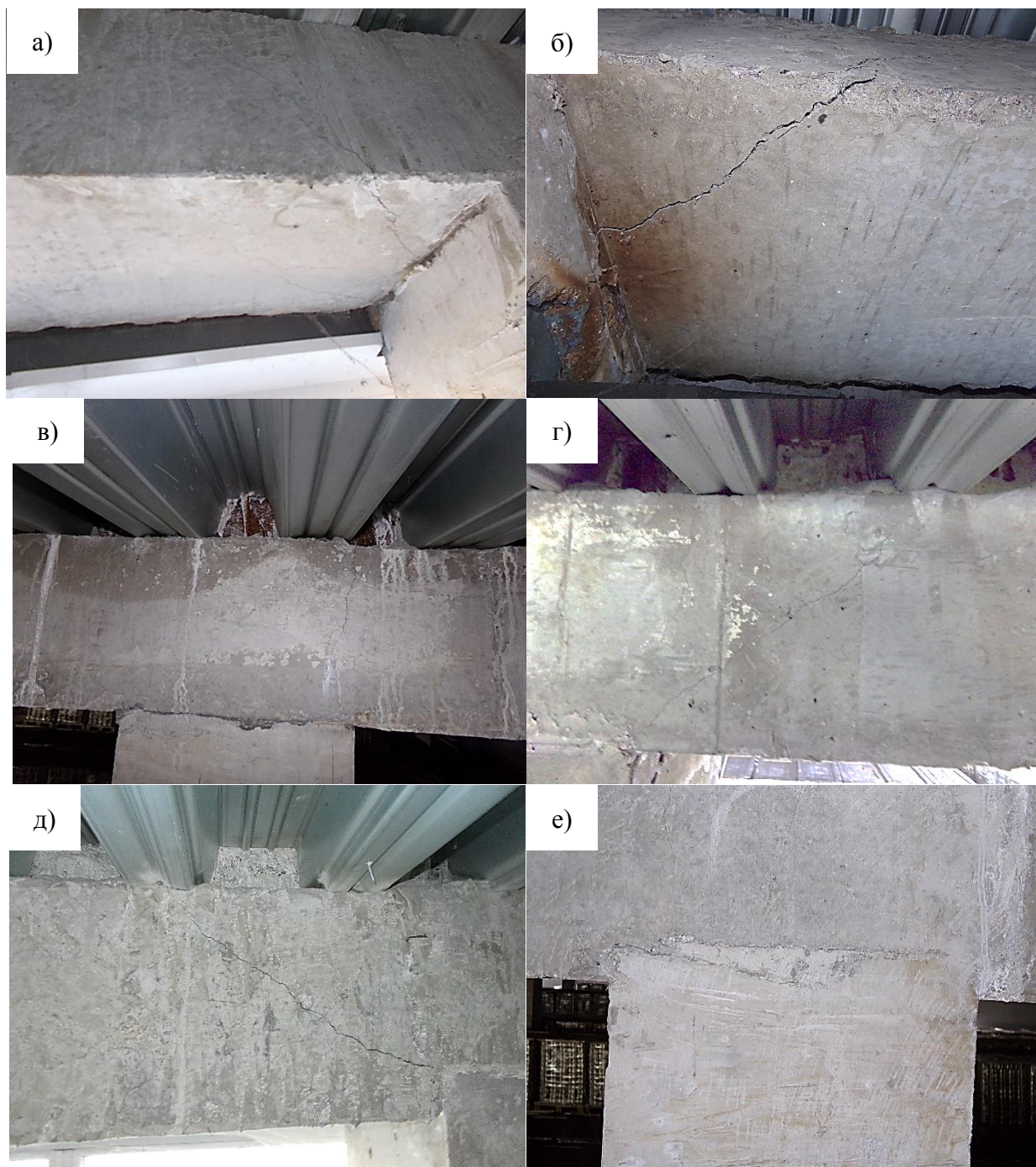


Рисунок 2 – Трещины в железобетонных конструкциях: а)-б) в крайних балках перекрытия от совместного действия изгибающего и крутящего моментов, в)-г) нормальные и наклонные в средних балках, д)-е) вызванные непроектным расположением рабочего шва колонны и балки перекрытия

6) Инструментальные обследования монолитной железобетонной плиты перекрытия с помощью нивелира позволили установить, что фактический максимальный остаточный прогиб на момент проведения обследования достигал 202 мм, что существенно больше предельно допустимого значения полного прогиба, установленного [13] и равного 44 мм.

7) Часть профилированных листов, используемых в качестве несъемной опалубки под монолитную железобетонную плиту перекрытия, уложены широкими гофрами вверх, что не соответствует требованиям проектной документации и п. 3.12 [14].

Демонтаж фрагмента нижней гофры профлиста плиты перекрытия и защитного слоя бетона до нижней арматуры плиты позволил установить, что фактическое армирование выполнено из арматуры 1Ø16 A500 в каждой гофре, что соответствует требованиям проектной документации.

Вскрытие защитного слоя бетона нижней продольной рабочей арматуры балки перекрытия показало, что фактическое армирование выполнено из 2Ø25 класса A500 и соответствует требованиям проектной документации.

Согласно проекта перекрытие должно выполняться монолитным железобетонным с одновременным бетонированием плиты и балок. Профлист, выполняющий роль несъемной опалубки, должен был опираться на систему стоек и балок, демонтируемых после набора бетоном перекрытия необходимой прочности. Необходимо отметить, что в проекте отсутствовали указания по технологии производства работ на устройство плиты перекрытия.

В ходе проведения обследования было установлено, что в процессе строительства сначала были выполнены железобетонные балки перекрытия высотой, значительно меньше проектной, на них был уложен профилированный лист несъемной опалубки перекрытия, что привело к появлению пустот в бетоне балок (между гофрами профилированного настила) и невозможности установки хомутов в средних балках перекрытия (в крайних балках хомуты частично установлены).

Таким образом, фактическое примыкание плиты перекрытия к балкам не соответствует проекту и сечение плиты не может рассматриваться в качестве верхней полки балки для восприятия возникающих в поперечном сечении элемента внутренних усилий. Сечение балок необходимо рассматривать как прямоугольное с фактической высотой значительно меньше проектного значения.

Стык верхней арматуры плиты перекрытия выполнен над балками перекрытия в зоне максимальных изгибающих моментов без нахлестки. Соответственно, при нагружении это привело образованию в месте опирания плиты перекрытия на балку пластического шарнира и к трансформации расчетной схемы из многопролетной балки в систему шарнирно опертых однопролетных балок, что привело к значительному увеличению изгибающих моментов и прогибов в пролете и углов поворота плиты на опорах.

Указанные обстоятельства привели к снижению несущей способности крайних балок на совместное действие изгибающих и крутящих моментов, изменению расчетной схемы перекрытия, снижению жесткости крайних балок, что привело к значительному увеличению прогибов, особенно в крайних пролётах [15, 16, 17].



Рисунок 3 - Стык верхней продольной рабочей арматуры плиты перекрытия над средней балкой

Расчет конструкций перекрытия производился с использованием ПК «Ли́ра» согласно проектного решения с учётом физической нелинейности материалов на расчетные сочетания нагрузок при различных загрузениях временной нагрузкой (расчетная схема плиты – многопролетная неразрезная опертая балка, поперечное сечение балок перекрытия не разделено по высоте на две части профнастилом).

В результате выполненного поверочного расчёта, установлено, что происходит разрушение плиты перекрытия при достижении временной нагрузки 2,60 кПа, что существенно меньше ее проектного значения – 6,0 кПа и минимальной нагрузки для складских помещений, рекомендуемой действующими нормами [13] – 3,0 кПа, а значения прогибов при разрушающей нагрузке значительно превышают предельно допустимое значение – 44,0 мм.

Монолитная плита перекрытия не соответствует требованиям расчета по прочности нормальных сечений, ширине раскрытия трещин и прогибам, согласно разработанному проекту даже при минимальном значении временной нагрузки 3,0 кПа.

Расчет монолитных балок перекрытия показал, что требования по прочности нормальных сечений на действие изгибающих моментов, наклонных сечений на действие поперечных сил и пространственных сечений крайних балок на совместное действие крутящего момента и поперечной силы при значении временной нагрузки 3,0 кПа не выполняются, что свидетельствует о наступлении предельных состояний.

Причинами, приведшими к наступлению предельных состояний исследуемых конструкций монолитного железобетонного перекрытия явились ошибки проектирования и низкое качество строительно-монтажных работ по его устройству.

На основании вышеизложенного при дальнейшей эксплуатации обследуемого перекрытия возможно его обрушение.

Было рекомендовано приостановить дальнейшую эксплуатацию здания по назначению, ограничить доступ и исключить нахождение людей в здании и на прилегающей территории; разработать и выполнить комплекс срочных противоаварийных мероприятий до выполнения работ по замене перекрытия.

Следует отметить, что выполнение ремонтно-восстановительных работ по усилению и восстановлению несущей способности, эксплуатационной пригодности и приведения конструкций перекрытия здания в нормативное состояние для возможности его дальнейшей эксплуатации по назначению с необходимым нормативным сроком, потребует не только значительных затрат, но и технически сложных проектных решений для восстановления эксплуатационной пригодности. Ошибки проектирования, нарушение технологии возведения и, как следствие, дефекты изготовления и монтажа, возникшие необратимые деформации монолитного железобетонного перекрытия, угроза внезапного обрушения не позволяют в полной мере привести его в нормативное техническое состояние с нормативным сроком службы.

Было рекомендовано выполнить работы по полному демонтажу конструкций монолитного железобетонного перекрытия здания с последующим устройством нового в соответствии с рекомендациями разработанного нового рабочего проекта и проекта производства работ по демонтажу и устройству нового перекрытия.

Для выбора оптимального типа железобетонного перекрытия, удовлетворяющего требованиям несущей способности и жесткости, было проведено сравнение расхода материалов для их различных типов при пролете 10,5 м. Ненапрягаемая арматура принята класса А500С, бетон класса по прочности на сжатие В25.

При больших пролетах и значительных нагрузках часто выполняются железобетонные балочные перекрытия. При шаге второстепенных балок 2,1 м высота полки плиты принята 7,0 см. При пролете 10,5 метров высота главных балок составила порядка 1050 мм, что приведет к значительному уменьшению высоты и полезного объема помещения, что особенно важно для складских зданий.

Возможно устройство монолитного предварительно напряженного перекрытия с плоскими балками [18]. При устройстве данного типа перекрытий при пролетах от 9 до 12 м

предусмотрено утолщение плиты в надколонной зоне в направлении большего пролета, что приведет к следующим размерам сечений: толщина перекрытия равна 200 мм в зоне плиты и 340 мм в зоне плоской балки, ширина плоской балки - 2000 мм. Предварительное напряжение выполняется без сцепления напрягаемой арматуры с бетоном арматурными канатами st.1860 диаметром 15,7 мм, каждый из которых имеет индивидуальную пластиковую оболочку со смазкой. За счет наличия смазочного состава достигается минимальный коэффициент трения каната о стенки канала и соответственно минимальные потери от трения. Также за счет пластиковой оболочки и смазки напрягаемая арматура надежно защищена от коррозии на протяжении всего срока эксплуатации конструкции [19]. Достоинством данного перекрытия является его незначительная высота и плоский потолок.

Перекрытие с повышенными временными нагрузками и значительными пролетами выполняют в виде кессонной плиты [20]. Геометрические размеры элементов перекрытия назначались в соответствии с [21] и равны: общая высота 450 мм, толщина полки 50 мм, ширина ребер внизу и их шаг соответственно 170 мм и 1000 мм. У колонн выполнены сплошные монолитные участки.

Расход материалов и приведенные затраты для различных вариантов перекрытий приведены в табл. 1.

Таблица 1 - Расход материалов и приведенные затраты для различных вариантов перекрытий

Тип перекрытия	Расход бетона, м ³ /м ²	Расход арматуры, кг/м ²	Приведенные затраты, тыс. руб./м ²
Существующее (прочность и жесткость не обеспечены)	0,15	31,0	3,78
Балочное перекрытие	0,16	21,7	2,69
Монолитная предварительно напряженная плита перекрытия с плоскими балками	0,25	предварительно-напряженная арматура st.1860 – 4,2 без предварительного напряжения – 23	3,57
Кессонное перекрытие	0,19	24,2	2,80

Выводы

На основании сравнения расхода материалов и приведенных затрат для различных вариантов перекрытия можно сделать вывод, что обследуемое перекрытие по расходу арматуры уступает предложенным вариантам, при этом его несущая способность не обеспечена. Выполнение балочного перекрытия в виде системы главных и второстепенных балок или кессонного перекрытия позволило бы снизить расход арматуры на 22-30%, а приведенные затраты – на 26,0-29,0% при обеспечении несущей способности и жесткости.

Ошибки в проектировании и возведения зданий ведут к значительным экономическим потерям. Правильный выбор конструктивного решения перекрытия позволяет сократить расход бетона и арматуры, а также уменьшить стоимость его устройства, обеспечить требуемую прочность, жесткость и долговечность железобетонных конструкций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аварии зданий и сооружений на территории Российской Федерации в 2003 году / Общероссийский общественный фонд «За качество строительства»: отчет. М., 2004. 67 с.
2. Богданова Е. Н. Анализ причин обрушения зданий и сооружений методы усиления конструкций : обзор.-аналит. докл. Москва: ВНИИТПИ, 2004. 96 с.

3. Леденёв В.В., Однолько В.Г. Анализ причин аварий зданий и пути повышения надежности // Вестник Тамбовского государственного технологического университета. 2012. Т. 18. №2. С. 449-457.
4. Yang, F., Jiang, S., Zhou, Y. F. The Case Analysis of Building Collapse during the Decoration Process // *Applied Mechanics and Materials*. 2013. Vols. 423-426. Pp 1173–1177. doi:10.4028/www.scientific.net/amm.423-426.1173.
5. Hulimka J., Kałuża M. A history of failure and repairs of the reinforced concrete raw coal silo // *Engineering Failure Analysis*. 2019. Vol. 104. Pp. 657–672.
6. Смоляго Г.А., Луценко А.Н., Дрокин С.В. К оценке живучести каркасных конструктивных систем из монолитного железобетона с учетом дефектов изготовления и монтажа // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2010. № 2. С. 80-83.
7. Болотова А.С., Свиридов В.Н. Основные виды аварий и нарушений в монолитном строительстве // Научное обозрение. 2017. № 3. С. 18-22.
8. Гроздов В.Т. Дефекты строительных конструкций и их последствия. СПб., 2005. 137 с.
9. Garrido Vazquez, E., Naked Haddad, A., Linhares Qualharini, E., Amaral Alves, L., Amorim Féo, I. Pathologies in Reinforced Concrete Structures // *Building Pathology and Rehabilitation*. 2016. Pp. 213–228. doi:10.1007/978-981-10-0651-7_10.
10. Maj M. Some Causes of Reinforced Concrete Silos Failure // *Procedia Engineering*, 2017. Vol. 172. Pp. 685–691. doi:10.1016/j.proeng.2017.02.081.
11. Волков Н. Аварии, аварии, аварии... Почему в России привыкают к этим опасным явлениям // Строительная газета. №5 от 5 февраля 2010 года.
12. СП 52-103-2007. Железобетонные монолитные конструкции зданий. М, 2007. 22 с.
13. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. М, 2016. 104 с.
14. Рекомендации по проектированию монолитных железобетонных перекрытий со стальным профилированным настилом. М, 1987. 45 с.
15. Демьянов А. И., Сальников А.С., Колчунов Вл.И. Экспериментальные исследования железобетонных конструкций при кручении с изгибом и анализ их результатов // Строительство и реконструкция. 2017. №4(72). С. 17-26
16. Mai Chi Trung, Nguyen and Phạm, Tinh. Torsional stiffness of reinforced concrete slab at pre and post-cracking stages // *Journal of Ministry of Construction*. 2016. №10. Pp. 20-23.
17. Křístek, V., Průša, J., Vitek, J. L. Torsion of Reinforced Concrete Structural Members // *Solid State Phenomena*. 2018. Vol. 272. Pp. 178–184. doi:10.4028/www.scientific.net/ssp.272.178.
18. Shruti Vijaykumar, Deshmukh and C. Jawalkar, G. Comparative Analysis of RCC Flat Slab with Post-Tensioned Flat Slab // *International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology*. 2019. 06. Pp. 241-249. doi: 10.32628/IJSRSET196356
18. Портаев Д.В. Расчет и конструирование монолитных преднапряженных конструкций гражданских зданий: Научное издание. М.: Издательство ACB, 2011. 248 с.
19. Schwetz, P. F., Gastal, F. P. S. L., da Silva Filho, L. C. P. (2014). Numerical and Experimental Analysis of a Waffle Slab Parking Floor // *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 2014. 19(4). Pp 1-36. doi:10.1061/(asce)sc.1943-5576.0000164
20. Лоскутов И.С. Монолитные железобетонные кессонные перекрытия. М., 2015. 3 с.

REFERENCES

1. Avarii zdaniy i sooruzheniy na territorii Rossiyskoy Federatsii v 2003 godu. Obshcherossiyskiy obshchestvennyy fond “Za kachestvo stroitel'stva”: otchet [accidents of buildings and structures on the territory of the Russian Federation in 2003. All-Russian Public Fund “For the Quality of Construction”: report]. Moscow, 2004. 67 s.
2. Bogdanova Ye. N. Analiz prichin obrusheniya zdaniy i sooruzheniy metody usileniya konstruktivnykh sistem : obzor.-analit. dokl. [Analysis of the causes of the collapse of buildings and structures; methods for strengthening structures: review-analytical report] Moscow: VNIINTPI, 2004. 96 p.
3. Ledenov V.V., Odnol'ko V.G. Analiz prichin avariya zdaniy i puti povysheniya nadezhnosti [Analysis of the causes of building accidents and ways to improve reliability]. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2012. Vol. 18. No 2. Pp. 449-457.
4. Yang, F., Jiang, S., Zhou, Y. F. The Case Analysis of Building Collapse during the Decoration Process. *Applied Mechanics and Materials*. 2013. Vols. 423-426. Pp 1173–1177. doi:10.4028/www.scientific.net/amm.423-426.1173.
5. Hulimka J., Kałuża M. A history of failure and repairs of the reinforced concrete raw coal silo. *Engineering Failure Analysis*. 2019. Vol. 104. Pp. 657–672.
6. Smolyago G.A., Lutsenko A.N., Drokin S.V. K otsenke zhivuchesti karkasnykh konstruktivnykh sistem iz monolitnogo zhelezobetona s uchetom defektov izgotovleniya i montazha [To the assessment of the survivability of

frame structural systems from monolithic reinforced concrete taking into account manufacturing and installation defects]. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova*. 2010. No 2. Pp. 80-83.

7. Bolotova A.S., Sviridov V.N. Osnovnyye vidy avari i narusheniy v monolitnom stroitel'stve [The main types of accidents and violations in monolithic construction]. *Nauchnoye obozreniye*. 2017. No 3. Pp. 18-22.

8. Grozdov V.T. Defekty stroitel'nykh konstruktсий i ikh posledstviya [Defects in building structures and their consequences]. Saint Petersburg, 2005. 137 p.

9. Garrido Vazquez, E., Naked Haddad, A., Linhares Qualharini, E., Amaral Alves, L., Amorim Féo, I. Pathologies in Reinforced Concrete Structures. *Building Pathology and Rehabilitation*. 2016. Pp. 213–228. doi:10.1007/978-981-10-0651-7_10.

10. Maj M. Some Causes of Reinforced Concrete Silos Failure. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 172. Pp. 685–691. doi:10.1016/j.proeng.2017.02.081.

11. Volkov N. Avarii, avarii, avarii... Pochemu v Rossii privykayut k etim opasnym yavleniyam [Accidents, accidents, accidents ... Why in Russia they get used to these dangerous phenomena]. *Stroitel'naya gazeta*. No5 from 5 February 2010.

12. Russian Building Code SP 52-103-2007. Zhelezobetonnyye monolitnyye konstruktсии zdaniy [Reinforced concrete monolithic structures of buildings]. Moscow, 2007. 22 p.

13. Russian Building Code SP 20.13330.2016. Nagruzki i vozdeystviya. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIp 2.01.07-85* [Loads and impacts. Updated version of SNIp 2.01.07-85 *]. Moscow, 2016. 104 p.

14. Rekomendatsii po proyektirovaniyu monolitnykh zhelezobetonnykh perekrytiy so stal'nyim profilirovannym nastilom [Recommendations for the design of monolithic reinforced concrete floors with steel profiled flooring]. Moscow, 1987. 45 p.

15. Dem'yanov A. I., Sal'nikov A.S., Kolchunov V.I. Eksperimental'nyye issledovaniya zhelezobeton-nykh konstruktсий pri kruchenii s izgibom i analiz ikh rezul'tatov. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2017. 4(72). Pp. 17-26

16. Mai Chi Trung, Nguyen and Phạm, Tinh. Torsional stiffness of reinforced concrete slab at pre and post-cracking stages. *Journal of Ministry of Construction*. 2016. No 10. Pp. 20-23.

17. Křístek, V., Průša, J., Vítek, J. L. Torsion of Reinforced Concrete Structural Members. *Solid State Phenomena*. 2018. Vol. 272. Pp. 178–184. doi:10.4028/www.scientific.net/ssp.272.178.

18. Shruti Vijaykumar, Deshmukh and C. Jawalkar, G. Comparative Analysis of RCC Flat Slab with Post-Tensioned Flat Slab. *International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology*. 2019. No 06. Pp. 241-249. doi: 10.32628/IJSRSET196356

19. Portayev D.V. Raschet i konstruirovaniye monolitnykh prednapryazhennykh konstruktсий grazhdanskikh zdaniy: Nauchnoye izdaniye [Calculation and design of monolithic prestressed structures of civil buildings: Scientific publication]. Moscow: Izdatel'stvo ASV, 2011. 248 p.

20. Schwetz, P. F., Gastal, F. P. S. L., da Silva Filho, L. C. P. (2014). Numerical and Experimental Analysis of a Waffle Slab Parking Floor. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*. 2014. 19(4). Pp 1-36. doi:10.1061/(asce)sc.1943-5576.0000164

21. Loskutov I.S. Monolitnyye zhelezobetonnyye kessonnyye perekrytiya [Monolithic reinforced concrete caisson floors]. Moscow, 2015. 3 p.

Информация об авторах:

Смоляго Геннадий Алексеевич

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия,

Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительства и городского хозяйства

E-mail: tpk-psv@yandex.ru

Дрокин Сергей Владимирович

ООО «Строительная экспертиза», г. Белгород, Россия,

Кандидат технических наук, инженер-проектировщик

E-mail: drokin_sergey@mail.ru

Дронов Андрей Васильевич

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия,

Кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры теоретической механики и сопротивления материалов

E-mail: dronov.andrey.1989@gmail.com

Белоусов Александр Петрович

ООО «Строительная экспертиза», г. Белгород, Россия,

Заместитель директора по техническим вопросам

Смоляго Елена Геннадьевна

ООО «Строительная экспертиза», г. Белгород, Россия,
Кандидат технических наук, начальник отдела строительного аудита

Information about authors:

Smolyago Gennadiy A.

BSTU after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia,
Doctor of Sciences, Professor, Department of Building and Urban development
E-mail: tpk-psv@yandex.ru

Drokin Sergey V.

ООО «Stroitel'naya ekspertiza», Belgorod, Russia,
Candidate of Sciences, Design engineer ООО «Stroitel'naya ekspertiza»
E-mail: drokin_sergey@mail.ru

Dronov Andrey V.

BSTU after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia,
Candidate of Sciences, Assistant Professor, Department of Theoretical Mechanics and Strength of Materials
E-mail: dronov.andrey.1989@gmail.com

Belousov Alexander P.

ООО «Stroitel'naya ekspertiza», Belgorod, Russia,
Deputy Director of Technical Problems

Smolyago Elena G.

ООО «Stroitel'naya ekspertiza», Belgorod, Russia,
Candidate of Sciences, Head of Building and Construction Audit Department

О ХАРАКТЕРЕ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ СТАЛЕФИБРОБЕТОНА ПОСЛЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

ШУБИН И. Л.¹, ДОРФ В. А.², КРАСНОВСКИЙ Р.О.²,
КАПУСТИН Д. Е.³, СУЛТЫГОВА П.С.⁴

¹Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН (НИИСФ РААСН), г. Москва, Россия

²АО «Институт «Оргэнергострой», г. Москва, Россия

³Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

⁴Ингушский государственный университет, г. Магас, Россия

Аннотация. В статье представлены результаты экспериментального исследования прочности при изгибе сталефибробетонных образцов (СФБ) после воздействия высоких температур. Рассмотрены свойства СФБ на основе высокопрочной цементно-песчаной матрицы при армировании пятью различными видами фибры. Процент содержания каждого вида фибры по объему составлял от 0,5 до 6,0%. Все виды фибры имели различные прочностные и геометрические характеристики. Результаты исследований показали, что прочность на растяжение при изгибе образцов СФБ, в диапазоне воздействия температур от 20 до 1100 °С, зависит от объемного содержания фибры и ее прочностных и геометрических характеристик. Практически полное разрушение СФБ наблюдалось при достижении температуры 1100°С для всех рассматриваемых видов фибры и при всех процентах армирования. Остаточная прочность при такой температуре не превышала 5МПа.

Ключевые слова: температурное воздействие, сталефибробетон, различный вид фибры

THE CHARACTER OF CHANGE OF PROPERTIES OF STEEL FIBRE CONCRETE AFTER TEMPERATURE EXPOSURE

SHUBIN I.L.¹, DORF V.A.², KRASNOVSKIY R.O.², KAPUSTIN D.E.³, SULTYGOVA P.S.⁴

¹Research institute of construction physics of RAACS (NIISF RAASN), Moscow, Russia

²JSC "Institute "Orgenergostroy", Moscow, Russia

³Moscow State National Research University of Civil Engineering, Moscow, Russia

⁴Ingush State University, Magas, Russia

Abstract. The article presents the results of an experimental study of the bending strength of steel-fiber-concrete (SFC) samples after exposure to high temperatures. The properties of SFC based on high-strength cement-sand matrix with reinforcement of five different types of fibers are considered. The percentage of the content of each type of fiber by volume ranged from 0.5 to 6.0%. All types of fibers had different strength and geometric characteristics. The research results showed that the tensile strength in bending of SFC specimens, in the range of exposure to temperatures from 20 to 1100 °C, depends on the volume content of the fiber and its strength and geometric characteristics. Almost complete destruction of the SFC was observed at a temperature of 1100 °C for all types of fiber under consideration and at all percentages of reinforcement. The residual strength at this temperature did not exceed 5 MPa.

Keywords: temperature exposure, steel fiber concrete, different type of fiber

Изменение прочностных характеристик сталефибробетона (СФБ) при пожаре можно объяснить физико-механическими и химическими процессами, которые одновременно происходят в цементно-песчаной матрице и стальной фибре. Связаны они с дегидратацией це-

ментного камня, а также с газовой коррозией стали фибры. Действующая в данный момент времени на СФБ температура определяет интенсивность и результат таких процессов.

Рассмотрим изменения, происходящие в цементном камне (матрице) и стальной фибре в различных диапазонах температурного воздействия. Можно отметить, что наблюдаемое в диапазоне температур 20-100 °С снижение прочности бетона является результатом испарения кристаллизационной (гидратной) воды из пор цементного камня вследствие уменьшения сил поверхностного натяжения в порах, с одновременной усадкой матрицы или же, происходит возрастание прочности за счет дополнительной гидратации цементного камня [1,2].

Для температуры от 200 до 300 °С из минералов цементного камня удаляется кристаллизационная вода, что способствует коррозии стали. Прочность СФБ может снизиться на 7-13%, или восстановиться до первоначального значения, либо повышается на 60% [1,3-4].

При воздействии температур от 300 до 400 °С прочность бетона снижается на 22% за счет адсорбционного действия влаги воздуха при охлаждении после нагрева до нормальной температуры [2]. Из кристаллической решетки минералов происходит удаление конституционной воды, что приводит к образованию микротрещин и разрушению.

Диапазону температур от 400 до 600 °С присуще снижению прочности до 43% вследствие трансформации кварца с увеличением его объема, а также из-за разницы коэффициентов температурного расширения цементного камня и заполнителя, за счет чего появляются трещины с шириной раскрытия 0,5-1 мм [5]. Также в данном диапазоне температур ускоряется процесс коррозии стали и повышается ее хрупкость за счет растворения азота в железе.

Границей структурной целостности матрицы на портландцементе можно считать температуру от 550 до 600 °С [6].

Диапазон температур от 600 до 800 °С снижает прочность на 68% за счет потери кристаллизационной воды, гашения свободной извести, расщепления доломита [1], что приводит к растрескиванию поверхности СФБ. В результате тепловой коррозии стали исчезает влияние на прочность вида фибрового армирования [6,7].

Температура от 1000 до 1100 °С приводит к снижению прочности СФБ до 90%, при этом происходит разрушение как матрицы, так и фибры.

По сравнению с неармированным бетоном фибробетон обладает более высокой прочностью, водонепроницаемостью, огнестойкостью. Для снижения возрастающей (с увеличением прочности) хрупкости, в бетон обычно добавляют стальные волокна, так как фибра способствует сдерживанию трещинообразования [8-12]. Стальная фибра повышает вязкость разрушения. Указанные свойства способствуют применению фибробетона в таких конструкциях, как защитные оболочки атомных электростанций, мосты, тоннели, высотные и сверхвысотные здания.

При нагреве СФБ теряет свою прочность в зависимости от температуры и продолжительности температурного воздействия [8,10,13]. Обычно потеря прочности невелика при нагреве 25-400 °С и резко снижается при нагреве от 400 до 600 °С.

При нормальной температуре (20±2) °С для СФБ прочность на сжатие обычно мало зависит от процента армирования, прочности и геометрии волокон самой фибры [14], а при изгибе эта зависимость весьма существенна [15].

Экспериментальная часть.

Нами были проведены экспериментальные исследования по изучению влияния характеристик фибры на прочность СФБ на растяжение при изгибе при высоком температурном воздействии, соответствующем пожару. Исследования проведены с использованием пяти разных видов фибры, но при этом СФБ имел один и тот же состав высокопрочной самоуплотняющейся цементно-песчаной матрицы. Матрица состояла из следующих компонентов: 800 кг/м³ цемента; 1250 кг/м³ песка; 260 кг/м³ воды; 45 кг/м³ микрокремнезема и 8 кг/м³ гиперпластификатора Sika5-800. Виды стальной фибры и их характеристики представлены в табл. 1 и рис.1.



Рисунок 1. Виды стальных фибр:

а). ФСПВ 30×0,8; б). ФСПВ 15×0,3; в). ФСПА 30×0,3; г). Harex 32×1,2; д). ФСЛ 40×0,8

Таблица 1 - Характеристики стальных фибр

	Вид фибры	Характеристика фибры	
		Длина волокон/ диаметр волокон, мм	Нормативное со- противление растя- жению, МПа
а).	Рубленая из проволоки волнистая (ФСПВ 30×0,8)	30/0,8	860
б).	Рубленая из проволоки волнистая (ФСПВ 15×0,3)	15/0,3	2450
в).	Рубленая из проволоки с анкерами по концам волокон (ФСПА 30×0,3)	30/0,3	2650
г).	Фрезерованная из слябов с анкерами по концам волокон (Harex 32×1,2)	32/1,2	600
д).	Резанная из стального листа переменного профиля (ФСЛ 40×0,8)	40/0,8	580

Экспериментальные исследования проводили на образцах-пластинах размером 260×60×20 (высота h) мм с содержанием фибры по объему 0,5; 1,0; 1,5; 3,0 и 6,0%, и сравнивались с результатами по матрице (содержание фибры 0,0%). Исключение составлял СФБ с фиброй ФСПА 30×0,3, так как при ее содержании более 1,5%, при перемешивании сталефибробетонной смеси волокна сцеплялись друг с другом. В каждой серии было по три образца и испытания проводили в соответствии с ГОСТ 30247.0-94 [16]. Для изучения влияния температуры конструкцию нагревают по стандартному (целлюлозному) режиму пожара. Пределу огнестойкости R120 соответствует нагрев $T - T_0 = 1029^\circ\text{C}$ в течение 120 минут со скоростью соответствующей зависимости

$$T - T_0 = 345 \lg(8t + 1),$$

где T_0 - температура в печи до начала теплового воздействия (равна температуре окружающей среды), $^\circ\text{C}$;

T - температура в печи, соответствующая времени t , $^\circ\text{C}$;

t - время, исчисляемое от начала испытания, мин.

По результатам экспериментальных исследований построены графики зависимости прочности матрицы и СФБ от температуры (рис.2). Нагрев от 20 до 200 $^\circ\text{C}$ привел к повышению прочности матрицы и СФБ от 12 до 56% в зависимости от вида фибры и процента армирования. Исключение для данного интервала температур составил СФБ с двумя видами фибры: ФСПА 30×0,3 и ФСЛ 40×0,8. Наблюдалось монотонное снижение прочности СФБ с фиброй ФСПА 30×0,3, но при этом необходимо отметить, что благодаря своему профилю, обеспечивающему хорошее сцепление фибры с матрицей при нормальных условиях, его прочность при температуре 20 $^\circ\text{C}$ почти в два раза превышала прочность СФБ с другими видами фибры (рис. 2, б, в) [15]. При этом после нагрева до 200 $^\circ\text{C}$ прочность СФБ с такой фиброй уже была порядка прочности СФБ с другими видами фибры.

Для СФБ с фиброй ФСЛ 40×0,8 также наблюдалось монотонное снижение прочности бетона при 6-ти процентном армировании (рис. 2, д). Полученный результат для этих случаев можно объяснить ослаблением сцепления волокон фибры с матрицей вследствие микро-трещинообразования.

Процесс повышения прочности СФБ при нагреве связан с возникновением в приведенном диапазоне температуры пуццолановой реакции взаимодействия в присутствии влаги, входящих в состав матрицы, порошкообразных силикатов (микрокремнезём) с гидроксидом кальция (известью).

Нагрев до 400°C привел к снижению прочности СФБ и матрицы почти до исходных величин в связи с микротрещинообразованием и адсорбционным действием влаги воздуха при охлаждении после нагрева.

Температурное воздействие от 400 до 800°C приводит к нарушению структурной целостности матрицы на портландцементе и кварцевом песке, а в СФБ при армировании свыше 0,5% для различных видов фибры проявляются значения получаемой после нагрева остаточной прочности (рис.2, б-д). Явно этот эффект заметен при армировании 3% (рис.2, г). Разделим рассматриваемый СФБ на две группы. Первая группа - СФБ с фиброй ФСПВ 15×0,3 и Narex 32×1,2, а вторая - это СФБ с фиброй ФСПВ 30×0,8 и ФСЛ 40×0,8. Для СФБ первой группы величина остаточной прочности была в два раза больше, чем у второй.

Все исследованные образцы СФБ имеют одинаковую матрицу, но разную фибру, поэтому различие в значениях остаточной прочности при изгибе можно объяснить условиями сцепления волокон фибры с матрицей. Схожее сцепление с матрицей имеют волокна фибры ФСПВ 30×0,8 и ФСЛ 40×0,8, так как у них нет анкеров, а по диаметру, длине и прочности они имеют близкие между собой значения. Для этих СФБ при армировании от 0 до 3% включительно наблюдаем, что до температуры 400°C волокна фибры работают совместно с матрицей, существенно не меняя ее прочность, но при более высоком проценте армирования напряжения в них будут в 1,5 - 2,0 раза выше, чем в матрице (рис.2, г, д). Будем считать, что в результате микротрещинообразования матрица частично выключается из работы, передавая часть усилий на фибру.

СФБ с фиброй ФСПВ 30×0,8 был испытан для двух вариантов - с фиброй без защитного покрытия и с защитным покрытием (ФСПВ-П 30×0,8) из оксида титана TiO₂. При этом для всех диапазонов нагрева и при всех процентах армирования полученные результаты практически не отличались друг от друга (рис.2).

После нагрева СФБ от 400 до 600°C волокна фибры выдергиваться из матрицы. В диапазоне температур 600-800 °C наблюдается выход матрицы из строя, и все усилия передаются на волокна фибры (рис.3).

Остановимся на работе СФБ с фибрами ФСПВ 15×0,3 и Narex 32×1,2. Они существенно отличаются друг от друга по своим геометрическим и прочностным характеристикам. Волнистые волокна фибры ФСПВ 15×0,3 не имеют анкеров, а прямые волокна фибры Narex 32×1,2 их имеют. Однако при армировании до 1,5% включительно и нагреве до 400°C волокна фибры работают совместно с матрицей, значительно не меняя ее прочность. При температурах нагрева от 400 до 600 °C наблюдается постепенное выдергивание и выпрямление тонких волокон фибры ФСПВ 15×0,3, а также обмятие бетона под кольцевыми анкерами волокон фибры Narex 32×1,2. При 800°C все усилия к моменту разрушения матрицы передаются на волокна фибры.

Характер работы фибры изменяется при увеличении процента армирования до 6%. В диапазоне температур от 20 до 600°C в волокнах фибры ФСПВ 15×0,3 и Narex 32×1,2 напряжения в 2-2,4 раза выше, чем в матрице. А в диапазоне температур от 200 до 500°C характер работы этих двух видов фибры аналогичен характеру работы фибры ФСПВ 30×0,8, а характер работы фибры ФСЛ 40×0,8 практически здесь не меняется. Такие закономерности можно объяснить влиянием конструкции армокаркасов, образуемых волокнами разных видов фибры при больших процентах армирования.

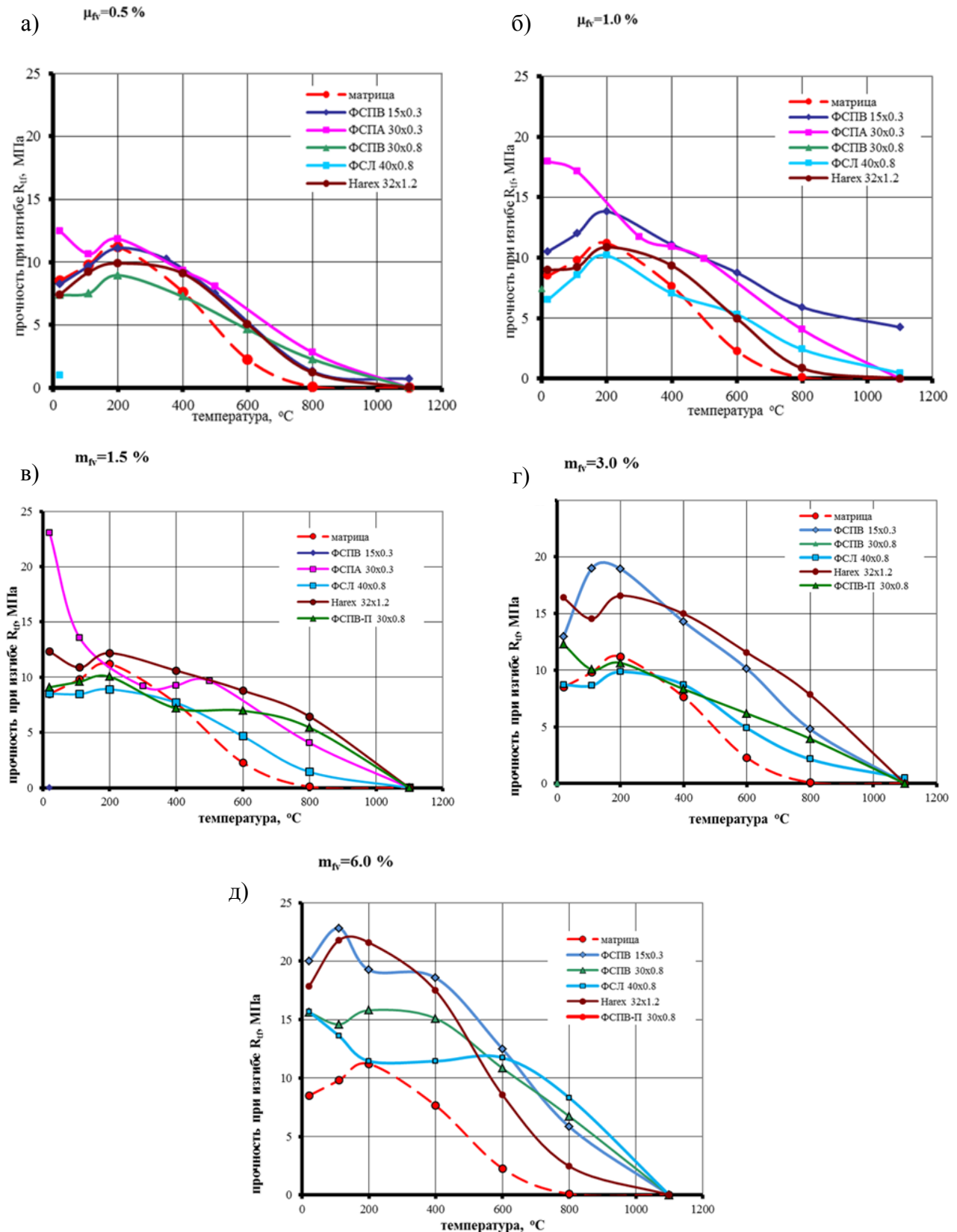
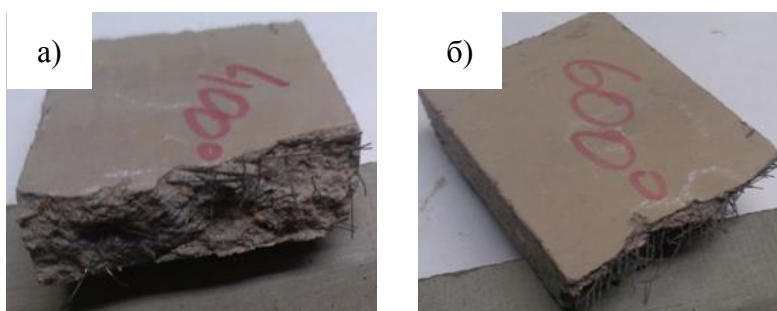


Рисунок 2 - Зависимость прочности матрицы СФБ с фиброй ФСРВ 15x0,3; ФСРВ 30x0,3; ФСРВ 30x0,8; ФСЛ 40x0,8 и Нарех 32x1,2 от температуры и содержания фибры по объему: а) $\mu_{fv} = 0.5\%$; б) $\mu_{fv} = 1.0\%$; в) $\mu_{fv} = 1.5\%$; г) $\mu_{fv} = 3.0\%$; д) $\mu_{fv} = 6.0\%$



*Рисунок 3 - Характер разрушения образцов СФБ после температурного воздействия:
а) при $t = 400$ °C; б) при $t = 600$ °C*

Практически полное разрушение СФБ наблюдалось при достижении температуры 1100°С для всех рассматриваемых видов фибры и при всех процентах армирования. Остаточная прочность при такой температуре не превышала 5МПа.

Вывод

Изучено воздействие высоких температур при пожаре на изменение прочности при изгибе СФБ с высокопрочной цементно-песчаной матрицей при различных процентах армирования фиброй разного вида, диаметра и прочности.

Установлено, что в диапазоне температур от 20 до 1100 °С прочность СФБ на растяжение при изгибе зависит от всех перечисленных характеристик фибры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Милованов А.Ф. Стойкость железобетонных конструкций при пожаре. М.: Стройиздат, 1998.
2. Некрасов К.Д., Жуков В.В., Гуляева В.Ф. Тяжелый бетон в условиях повышенных температур. М.: Стройиздат, 1972. 128 с.
3. Nordström E. Durability of sprayed Concrete - Steel fibre corrosion in cracks. Sweden, Lulea: Lulea University of Technology.
4. Tai Y.-S., Pan H.-H., Kung Y.-N. Mechanical properties of steel fiber reinforced reactive powder concrete following exposure to high temperature reaching 800°C // Nuclear Engineering and Design. 2011. Vol. 241. №7. Pp.2416-2424.
5. Степанов В.Г., Степанюченко В.С. Обеспечение огнестойкости несущих железобетонных строительных конструкций // Конференция «Научное пространство Европы», раздел «Строительство и архитектура», 2008. URL: www.rusnauka.com/10_NPE_2008/Stroitelstvo/29405.doc.htm
6. Abrams M.S. Compressive Strength of Concrete at Temperatures to 1600F // Temperature and Concrete. 1971. 25. Pp. 33-58.
7. Demirel Bahar, Kelestemur Oguzhan. Effect of elevated temperature on the mechanical properties of concrete produced with finely ground pumice and silica fume // Fire Safety Journal. 2010. №45. Pp. 385–391.
8. Guidance for the design of steel-fibre-reinforced concrete. Concrete Society Technical Report. 2007. №63. Pp.92.
9. Yoshitake Isamu, Baba Koji, Ito Tetsuo, Nakagawa Koji. Behavior of fiber reinforced concrete under fire temperature. URL: www.rilem.net
10. Dhir R. K., McCarthy, M. J. Concrete Durability and Repair Technology// Proceedings of the International Conference. University of Dundee, Scotland, UK, 8-10 September 1999. Thomas Telford Pub.-1999.
11. Spasojević Ana Structural implications of ultra-high performance fibre-reinforced concrete in bridge design // THÈSE No 4051 -2008(diss.). URL: http://infoscience.epfl.ch/record/116412/files/EPFL_TH4051.pdf.
12. Swamy R.N. Fiber Reinforced Cement and Concrete // Proceedings of the Fourth RILEM Internal Symposium. E & FN Spon. 1992.
13. Osama M. Ghazi. The Effect of Elevated Temperature of Compressive Strength of Steel Fiber Concrete // Engineering Sciences. 2013. Vol.21. No.3. Pp.1006-1012
14. Дорф В.А., Красновский Р.О., Капустин Д.Е., Султыгова П.С. Эффект пуццоланизации при высоких температурах высокопрочной цементно-песчаной матрицы сталефибробетонов // Вестник гражданских инженеров. СПбГАСУ. 2017. №2(61). С.178-183.

15. Красновский Р.О., Рогачев К.В., Денисов А.В. Преимущество использования фибробетонов, армированных двумя типами фибр // Материалы I Международной (VII Всероссийской) конференции НАСКР 2012. Чебоксары, 2012.

16. ГОСТ 30247.0-94 Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования

REFERENCES

1. Milovanov A.F. Stoykost' zhelezobetonnykh konstruktsey pri pozhare [Resistance of reinforced concrete structures in case of fire]. Moscow: Stroyizdat, 1998.

2. Nekrasov K.D., Zhukov V.V., Gulyayeva V.F. Tyazhelyy beton v usloviyakh povyshennykh temperatur [Heavy concrete at elevated temperatures]. Moscow: Stroyizdat, 1972. 128 p.

3. Nordström E. Durability of sprayed Concrete - Steel fibre corrosion in cracks. Sweden, Lulea: Lulea University of Technology.

4. Tai Y.-S., Pan H.-H., Kung Y.-N. Mechanical properties of steel fiber reinforced reactive powder concrete following exposure to high temperature reaching 800°C. *Nuclear Engineering and Design*. 2011. Vol. 241. No 7. Pp.2416-2424.

5. Stepanov V.G., Stepanyuchenko V.S. Obespecheniye ognestoykosti nesushchikh zhelezobetonnykh stroitel'nykh konstruktsey [Ensuring fire resistance of load-bearing reinforced concrete building structures]. Konferentsiya "Nauchnoye prostranstvo Yevropy", razdel "Stroitel'stvo i arkhitektura" [Conference "Scientific Space of Europe", section "Construction and Architecture"]. 2008. URL: www.rusnauka.com/10_NPE_2008/Stroitelstvo/29405.doc.htm

6. Abrams M.S. Compressive Strength of Concrete at Temperatures to 1600F. *Temperature and Concrete*. 1971. 25. Pp. 33-58.

7. Demirel Bahar, Kelestemur Oguzhan. Effect of elevated temperature on the mechanical properties of concrete produced with finely ground pumice and silica fume. *Fire Safety Journal*. 2010. No 45. Pp. 385-391.

8. Guidance for the design of steel-fibre-reinforced concrete. Concrete Society Technical Report. 2007. No 63. Pp. 92.

9. Yoshitake Isamu, Baba Koji, Ito Tetsuo, Nakagawa Koji. Behavior of fiber reinforced concrete under fire temperature. URL: www.rilem.net

10. Dhir R. K., McCarthy, M. J. Concrete Durability and Repair Technology. Proceedings of the International Conference. University of Dundee, Scotland, UK, 8-10 September 1999. Thomas Telford Pub. 1999.

11. Spasojević Ana Structural implications of ultra-high performance fibre-reinforced concrete in bridge design. THÈSE No 4051 -2008(diss.). URL: http://infoscience.epfl.ch/record/116412/files/EPFL_TH4051.pdf.

12. Swamy R.N. Fiber Reinforced Cement and Concrete. Proceedings of the Fourth RILEM International Symposium. E & FN Spon. 1992.

13. Osama M. Ghazi. The Effect of Elevated Temperature of Compressive Strength of Steel Fiber Concrete. *Engineering Sciences*. 2013. Vol.21. No.3. Pp.1006-1012

14. Dorf V.A., Krasnovskiy R.O., Kapustin D.Ye., Sulygova P.S. Effekt puttsolanizatsii pri vysokikh temperaturakh vysokoprochnoy tsementno-peschanoy matritsy stalefibrobetonov [The effect of pozzolanization at high temperatures of high-strength cement-sand matrix of steel fiber concrete]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2017. No 2 (61). Pp.178-183.

15. Krasnovskiy R.O., Rogachev K.V., Denisov A.V. Preimushchestvo ispol'zovaniya fibrobetonov, armirovannykh dvumya tipami fibr [The advantage of using fiber-reinforced concrete reinforced with two types of fibers]. Materialy I Mezhdunarodnoy (VII Vserossiyskoy) konferentsii NASKR 2012 [Materials of the 1st International (VII All-Russian) NASKR Conference 2012]. Cheboksary, 2012.

16. Russian standard GOST 30247.0-94 Konstruktsii stroitel'nyye. Metody ispytaniy na ognestoykost'. Obshchiye trebovaniya [Building constructions. Test methods for fire resistance. General requirements].

Информация об авторах:

Шубин Игорь Любимович

Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН (НИИСФ РААСН), г. Москва, Россия
Доктор технических наук,
Директор НИИСФ РААСН
E-mail: niisf@niisf.ru

Дорф Валерий Анатольевич

АО «Институт «Оргэнергострой», г. Москва, Россия
Кандидат технических наук
Директор по научной работе
E-mail: dorfva@ioes.ru

Красновский Ростислав Олегович

АО «Институт «Оргэнергострой», г. Москва, Россия
Кандидат технических наук, с.н.с.
E-mail: krasnovskijro@ioes.ru

Султыгова Пятимат Суламбековна

Ингушский государственный университет, г. Магас
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: sultygova@yandex.ru

Капустин Дмитрий Егорович

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия
Кандидат технических наук
E-mail: kde90@bk.ru

Information about authors:

Shubin Igor Lubimovich

Research institute of construction physics RAASN
(NIISF RAASN), Moscow, Russia
Director NIISF RAASN
E-mail: niisf@niisf.ru

Dorf Valeriy Anatolyevich

JSC «Institute «Orgenergostroy», Moscow, Russia
PhD in Sci. Tech.
Director of Science
E-mail: dorfva@ioes.ru

Krasnovskij Rostislav Olegovich

JSC «Institute «Orgenergostroy», Moscow, Russia
PhD in Sci. Tech., senior research worker
E-mail: krasnovskijro@ioes.ru

Kapustin Dmitry Egorovich

Moscow State National Research University of Civil Engineering, Moscow, Russia
PhD in Sci. Tech., assistant professor
E-mail: kde90@bk.ru

Sultygova Pyatimat Sulambekovna

Ingush State University, Magas, Russia
PhD in Sci. Tech., Associate Professor
E-mail: sultygova@yandex.ru

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ДОСТУПНОСТИ СОЦИАЛЬНО-ЗНАЧИМЫХ ОБЪЕКТОВ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНОГО БИОСФЕРНО- СОВМЕСТИМОГО ГОРОДА

ПИЛИПЕНКО О.В.¹, КОЛЧУНОВ В.И.², СКОБЕЛЕВА Е.А.¹, БОРИСОВ М.В.¹

¹Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орел, Россия

²Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия

Аннотация. Согласно основным положениям концепции биосферной совместимости степень реализации функций города для повышения уровня человеческого потенциала можно оценить уровнем доступности этих функций для каждого его жителя. В рассматриваемой работе в качестве одной из групп показателей, количественно отражающих уровень реализации функций города, предлагается ввести оценку в виде системы количественных показателей генпланов, в числе которых – параметр времени удовлетворения потребностей жителя города как один из параметров комфортной и безопасной городской среды. Используется интегральный подход к расчету показателей доступности объектов повседневного обслуживания жителей как объектов, которые должны размещаться на территории жилой застройки в пределах пешеходной доступности. Применительно к учреждениям образования, играющих ключевую роль в формировании и развитии человеческого потенциала, на примере двух территориальных образований города Орла проведен анализ сложившейся градостроительной ситуации, определены уровни реализации функций города в обеспечении условий для дошкольного образования (с позиций территориального размещения дошкольных образовательных учреждений (ДОУ)). Зонирование территориальных образований города Орла выполнено на основе временного фактора, это позволило наглядно оценить уровень комфорта городской территории по степени реализации рассматриваемой функции города и сформулировать предложения по развитию сети рассматриваемых объектов.

Ключевые слова: урбанизированная территория, биосферная совместимость, показатели генплана, пешеходная доступность, время, функции города

ACCESSIBILITY ASSESSMENT METHODOLOGY OF SOCIALLY- VALUABLE OBJECTS OF ENVIRONMENTALLY SAFE BIOSPHERIC COMPATIBLE CITY

PILIPENKO O.V.¹, KOLCHUNOV V. I.², SKOBELEVA E.A.¹, BORISOV M.V.¹

¹Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia

²South-West State University, Kursk, Russia

Abstract. According to the main provisions of the concept of biosphere compatibility, the feasibility of city functions (in order to increase the level of human potential) can be estimated by the level of accessibility of these functions for each resident. In this work, as one of the groups of indicators that quantitatively reflect the implementation level of the functions of the city, it is proposed to introduce an assessment in the form of a system of quantitative indicators of urban plans. Among these indicators is the time parameter for satisfying the needs of a city resident as one of the parameters for a comfortable and safe urban environment. An integrated approach is used to calculate the indicators of accessibility of objects of daily services for residents as objects that should be located within walking distance. In relation to educational institutions that play a key role in the formation and development of human potential, an analysis of the current urban planning situation is carried out on the example of two territorial entities of the city of Orel. The levels of the city's functions implementation in providing conditions for preschool

education from the position of the territorial location of preschool educational institutions are also determined. The zoning of the territorial formations of the city of Orel is based on a temporary factor. This made it possible to visually assess the level of comfort of the urban territory by the degree of implementation of the considered function of the city and formulate proposals for the development of the network of the objects under consideration.

Keywords: urban area, biosphere compatibility, urban plan indicators, pedestrian accessibility, time, city functions

Введение

Одной из ключевых задач градостроительной деятельности на современном этапе является обеспечение высокого качества пространственной среды жизнедеятельности, определяемое степенью ее безопасности и комфорта [1-3]. В предлагаемой концепции биосферно-совместимых городов [2, 4] вводится ряд фундаментальных принципов, касающихся необходимости преодоления негативных тенденций и деградационных процессов в жизнедеятельности современных городов, и - тем самым - повышения их духовного, физического и социального потенциала, улучшения здоровья жителей.

Применение таких принципов в практике разработки и корректировки генпланов городов, микрорайонов и кварталов позволит научно обоснованно сбалансировать антропогенную деятельность и повысить потенциал жизни Биосферы современного города.

В соответствии с [2,4] в основу количественного анализа качества городской среды заложены принципы регулирования и системного управления параметрами безопасности и общественного комфорта, базирующиеся на расчете тройственных (гуманитарных) балансов биотехносферы. Составляющими такого баланса являются интегральные относительные количественные показатели, отражающие биосферную совместимость городской территории (η) и уровень реализации функций города (ξ) [5]. В функции города согласно одного из принципов биосферной совместимости [2,4] включаются жизнеобеспечение, развлечения и отдых, власть, милосердие, знания, творчество, связь с природой. При этом уместно отметить два момента: 1) все функции, кроме функции «милосердие», - парные; 2) если хоть одна из функций не реализуется городом позитивно, то она обязательно проявляется в виде своего антипода, например, нереализованная функция «жизнеобеспечение» - в виде разрухи и т.д.

В первом приближении количественный анализ уровней реализации функций города можно выполнить, опираясь на имеющиеся статистические данные для конкретных городов и регионов [6]. Так, в исследованиях [7, 8] приводятся методики оценки одной из составляющих экологической безопасности города - объектов транспортного строительства и определения вклада составляющих транспортной инфраструктуры в реализацию функций биосферосовместимого города. Авторами расчетным путем получены коэффициенты реализации и доступности этих составляющих функции города исходя из анализа состояния производственной среды станций технического обслуживания автомобилей отдельно взятой территориальной автотранспортной системы. В работах [9, 10] приведен алгоритм для оценки обеспечения доступности городских объектов группам населения с ограниченными возможностями передвижения, к которым относят пожилых людей, детей дошкольного возраста, беременных женщин, людей с временной нетрудоспособностью, инвалидов и других.

Доступность общественных объектов (образовательных, культурных, развлекательных, торговых и медицинских учреждений) всем категориям населения так же, как и факторы социальной справедливости, в настоящее время во многих странах принято считать в числе приоритетов градообустройства и в рамках концепции здорового городского планирования [11]. Эта концепция была разработана в Европе как часть долгосрочной программы проекта ВОЗ «Здоровые города» в развитие программы «Здоровье для всех к 2000 году». В частности, World Health Organization в лице Barton H. & Tsourou C. [12] было предложено двенадцать ключевых аспектов здоровья в широком смысле этого слова, которые следует учитывать как детерминанты при разработке и оценке городских программ развития. При этом решение за-

дачи содействия укреплению здоровья и благополучия населения вне сектора здравоохранения было возведено в ранг приоритетных ещё на Ассамблее ВОЗ в 1979 г. [13]. На решение этой важнейшей задачи направлен и Федеральный проект «Формирование комфортной городской среды» на период до 2024 года. Охрана здоровья населения является и в России одной из стратегических приоритетных задач развития, для решения которой формирование среды жизнедеятельности должно начинаться с пространственной организации территории не только страны и регионов, но и отдельных муниципальных образований [14]. В то же время, ориентирование городских кварталов, микрорайонов на обеспечение коротких расстояний между объектами повседневного обслуживания и жильем, рабочими местами делает деятельность города более устойчивой в условиях его пространственно-экономической трансформации [15]. При этом в качестве характеристик «устойчивого» города некоторые исследователи предлагают наравне с обеспечением пространственной инклюзии также считать долговечность городской инфраструктуры в сочетании с обеспечением экономического роста и экологического равновесия [16], что полностью согласуется с концепцией создания биосферно-совместимых городов [2,4].

В свете поставленной задачи несомненный интерес представляют индикаторы, разработанные в рамках проекта San Francisco Indicator, являющиеся системой данных на уровне района, которая измеряет в восьми направлениях развитие здорового сообщества и социальную справедливость [17]. В оценке отдельных видов индикаторов участвуют и параметры доступности объектов (например, образовательных учреждений, открытых городских пространств и т.д.). Тем не менее, система таких показателей не ориентируется на конкретные расстояния между рассматриваемыми объектами и местами проживания.

Некоторые нормируемые в настоящее время в России требования и рекомендации к размещению на урбанизированной территории общественных зданий и сооружений по отношению к местам проживания приведены на рисунке 1.

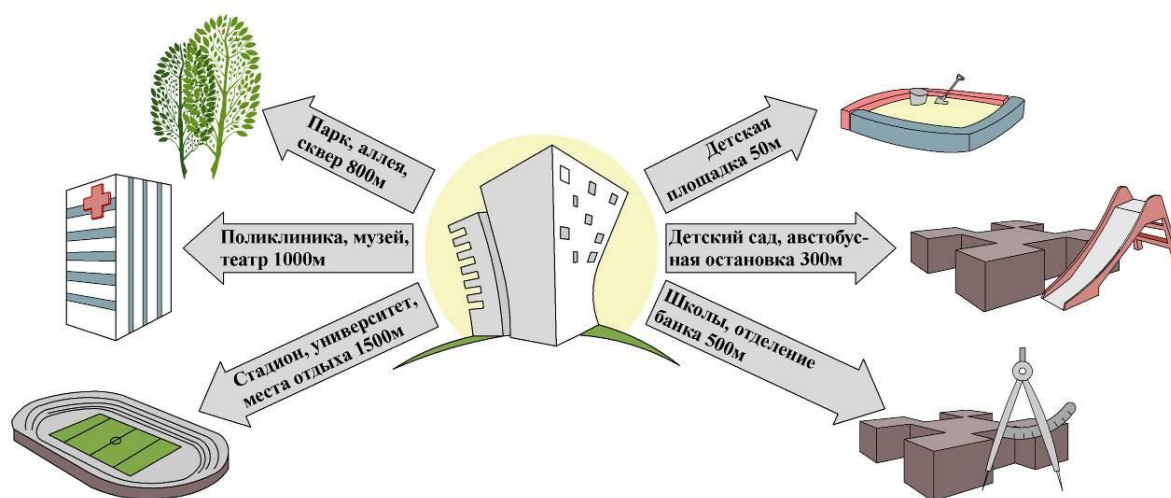


Рисунок 1 – Рекомендуемые максимальные расстояния от мест проживания до общественных зданий и сооружений

В случае с размещением объектов образовательного назначения Сводом правил СП 42.13330.2016 "Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений" регламентируется только радиус их обслуживания, который зависит от климатического района и плотности застройки. В данном нормативном документе не содержатся рекомендации по определению показателей доступности таких объектов. Отдельные указания по оценке пешеходной доступности для жилых домов точек притяжения содержатся в Методике формирования индекса качества городской среды, утвержденной распоряжением Правительства Рос-

сийской Федерации от 23 марта 2019 г. № 510-р. Здесь Индекс пешеходной доступности для каждого жилого дома определяется как среднее значение величин, полученных по результатам расчета отношения длины кратчайшего пешеходного маршрута к длине предельного маршрута до точек притяжения в пределах 800-метровой зоны с учетом топологии улично-дорожной сети. Однако такой показатель ориентирован на оценку степени пешеходной доступности для города в целом безотносительно к назначению и социальной значимости объектов инфраструктуры, а также особенностей передвижения различных групп населения, определяемых возрастом и состоянием здоровья.

Таким образом, как в нашей стране, так и в зарубежных странах [18, 19], не теряют актуальности задачи, направленные на разработку расширенного набора показателей, позволяющих качественно и количественно оценить градостроительные решения с разных позиций.

Так, с целью количественной оценки планировочных решений с учетом параметра времени на основе концепции биосферной совместимости городов авторами была разработана и апробирована на примере жилого микрорайона "Ботаника" в г. Орле методика оценки доступности социально-значимых объектов с учетом скорости передвижения различных категорий населения [20, 21]. С учетом результатов этих исследований в настоящей статье приведена методика расчета показателей доступности социально значимых объектов при зонировании территориальных образований города по фактически затрачиваемому времени на получение услуг, а также сформулированы некоторые предложения к оценке эффективности территориального развития жилых микрорайонов.

Модели и методы

1. В качестве *показателей доступности* урбанизированных территорий приняты следующие:

1.1 Персональная доступность (D_i) отражает долю населения, имеющего возможность получения услуги в рассматриваемом учреждении (F_i) (при реализации i -той функции города) в общем числе нуждающихся в этой услуге жителей рассматриваемого микрорайона (P_i):

$$D_i = \frac{F_i}{P_i} \quad (1)$$

При $F_i > P_i$ принимаем $D_i = 1$.

Плотность населения может быть принята из карт функционального зонирования территории или пояснительной записки к ППТ и уточнена путем расчета по нормам заселения в зависимости от типов жилых домов по уровням комфорта.

Например, численность населения, которому должны предоставляться услуги в рассматриваемом учреждении, можно определить исходя из нормативных актов субъекта РФ в части установленной плотности населения и потребности в местах, тогда, например:

$$P_i = \rho S_j d_i / 1000, \quad (2)$$

где ρ – плотность населения участка;

S_j – площадь j -го участка;

d – потребность в местах на 1000 жителей.

1.2 Территориальная (пешеходная) доступность ($\xi_{i,j}$), определяет отношение времени, которое мог бы затратить пешеход, проживающий в j -том участке, на преодоление максимально комфортного расстояния от места проживания до проживания до объекта, реализующего i -тую функцию города ($t_{n,i}$), ко времени, которое он тратит на преодоление фактического расстояния (t_f):

$$\xi_{i,j} = \frac{t_{n,i}}{t_{i,j}} \quad (3)$$

или

$$\xi_{i,j} = \frac{S_{n,i}}{S_{i,j}} = \frac{R_{n,i}}{R_{i,j}}, \quad (4)$$

где $S_{n,i}$ и $R_{n,i}$ - комфортное расстояние от места проживания до объекта, реализующего i -тую функцию города, с учетом и без учета излома в траектории маршрута соответственно;

$S_{i,j}$ и $R_{i,j}$ - фактическое расстояние от места проживания в j -том ярусе до объекта, реализующего i -тую функцию города, с учетом и без учета излома в траектории маршрута пешеходной связи соответственно;

при этом:

$$R_{i,j} = S_{i,j} \cdot K, \quad (5)$$

$$R_{n,i} = S_{n,i} \cdot K, \quad (6)$$

где K - коэффициент непрямолинейности пешеходной связи (в первом приближении в расчетах им можно пренебречь, полагая $K=1$).

В таблице 1 представлены значения комфортных расстояний, определенных на основании исследований средней скорости пешеходов, движущихся в осенне-зимний период быстрым или спокойным шагом, по данным Ленинградского НИЛСЭ и [22].

Таблица 1 – Расстояния, преодолеваемые за расчетное время пешеходами с различной скоростью передвижения

Возраст пешеходов или возможности передвижения	Спокойный шаг				Быстрый шаг			
	V, м/мин	Расстояние S, м			V, м/мин	Расстояние S, м		
		5 мин	7 мин	10 мин		5 мин	7 мин	10 мин
3-4 года	51,0	255,0	357,0	510,0	72,0	360,0	504,0	720,0
7-8 лет	69,3	346,5	485,1	693,0	88,8	444,0	621,6	888,0
старше 70 лет	48,3	241,5	338,1	483,0	65,6	328,0	459,2	656,0
с протезом ноги*	51,0	255,0	357,0	510,0	67,5	337,5	472,5	675,0

Показатель территориальной (пешеходной) доступности $\xi_{i,j}$ является индикатором реализации функции города для жителей рассматриваемого j -го участка или яруса. Таким образом, значения $\xi_{i,j}$ могут быть равными:

- в пределах радиуса пешеходной доступности и достаточной вместимости объекта $\xi_{i,j}=1$;
- на территории, расположенной за пределами радиуса пешеходной доступности и ограниченной исчерпанием вместимости объекта $0 < \xi_{i,j} < 1$;
- в остальных случаях $\xi_{i,j}=0$.

1.3 Территориально-персональная доступность (ξ_i) является мерой оценки времени предоставления услуги (при реализации i -той функции города) для различных групп ее пользователей с учетом удаленности проживания и численности обслуживаемого населения.

* значением такой скорости предлагается руководствоваться при оценке комфортных расстояний для людей с нарушениями опорно-двигательного аппарата

Для возможности учета интересов части населения микрорайона (квартала), проживающего на различном отдалении от рассматриваемого объекта, разделим рассматриваемую территорию на несколько j -тых участков. Такое разделение может производиться путем выделения жилых групп или зон доступности, располагаемых радиально – при построении колец одинаковой толщины ΔR , центром которых явится рассматриваемый объект, реализующий i -тую функцию города (рисунок 2).

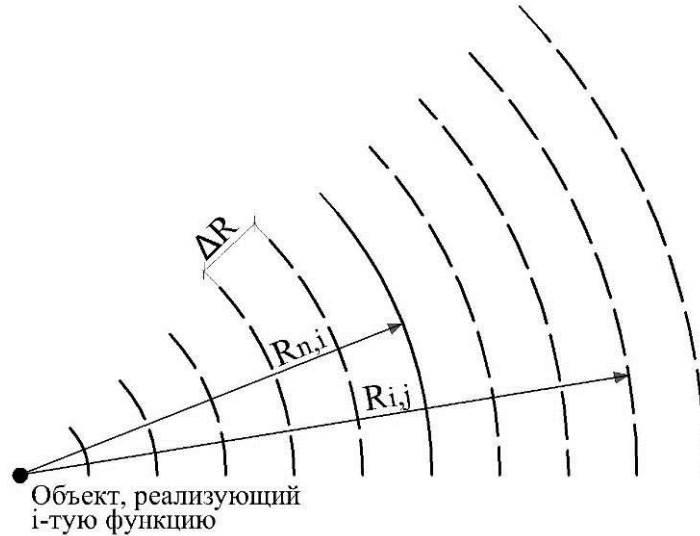


Рисунок 2 – Схема разделения рассматриваемой территории радиусами доступности

Интегральное значение рассматриваемого показателя доступности можно вычислить с помощью следующей формулы:

$$\xi_i = \frac{\sum_{j=1}^k n_j \xi_{i,j}}{P_i}, \quad (7)$$

где n_j – количество жителей, обслуживаемых в рассматриваемом микрорайоне и проживающих в его j -той зоне доступности; k – количество зон доступности, ограниченное исчерпанием фактической вместимости объекта.

Другим вариантом методики расчета рассматриваемого показателя является вариант расчета для всех ярусов, жители которых могут получить услуги в данном объекте, т.е. без ограничения исчерпанием фактической вместимости объекта. Тогда:

$$\xi_i = \frac{D_i \sum_{j=1}^m n_j \xi_{i,j}}{P_i}, \quad (8)$$

где m – количество ярусов, жители которых могут получать услуги в рассматриваемом объекте, реализующем i -тую функцию города.

Показатель территориально-персональной доступности ξ_i позволяет оценить уровень реализации i -той функции города жителями рассматриваемого территориального образования с учетом численности населения участков (зон доступности), для которых характерны различные значения $\xi_{i,j}$.

2. Под **показателем удаленности участка (r)** будем понимать расстояние между фокусами тяготения района и рассматриваемого участка.

С учётом распределения плотности населения координаты фокуса тяготения района в целом и участка района в частности определяются по известной формуле для графоаналитического метода [23], согласно которому на рассматриваемую территорию наносится координатная сетка с произвольным числом квадратов. Фокусы тяготения населения представляют собой точки, в которых обеспечивается минимальная затрата времени на транспортное и пешеходное передвижение в пределах района или участка. Координаты фокусов тяготения можно определить с помощью следующих формул:

$$X_o = \sum_{j=1}^n n_j x_j / N ; Y_o = \sum_{j=1}^n n_j y_j / N , \quad (9)$$

где N – численность населения микрорайона; n_j – количество жителей в каждом квадрате координатной сетки; $x_j; y_j$ – координаты центров тяжести квадратов координатной сетки.

Показатель удаленности участка r определяется как расстояние между фокусами тяготения района и рассматриваемого участка.

Результаты исследования и их анализ

В качестве примера приведем оценку градостроительных решений по расширению охвата обслуживания дошкольными образовательными учреждениями в условиях сложившейся застройки с помощью предложенных показателей доступности дошкольных образовательных учреждений (ДООУ): $i=3$ (согласно классификации функций города, «Знания» [2, 4]). Используя нормативы Орловской области от 1 августа 2011 года № 250 «Об утверждении региональных нормативов градостроительного проектирования Орловской области» [24], потребность в местах ДООУ принимаем $d=42$ места на 1000 жителей. Нормативный радиус обслуживания ДООУ определен в соответствии с СП 42.13330.2011 «Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений» и составляет 300 м.

В качестве объектов исследования приняты два административных района города Орла: Заводской район как самый крупный по численности населения и Северный район города, образованный значительно позже других административных районов (таблица 2).

Заводской административный район города Орла располагается между левым берегом реки Оки, правым берегом реки Орлик и южной окраиной города. На его территории располагается 28 дошкольных образовательных учреждений общей вместимостью 5820 мест при потребности 6750 мест. На территории Северного района города Орла располагается 10 дошкольных образовательных учреждений общей вместимостью 2910 мест при потребности 3220 мест.

Таблица 2 – Характеристика плотности населения в Северном и Заводском районах города Орла

Плотность населения	Северный район			Заводской район		
	Площадь ² , га	Население, тыс.чел	%	Площадь ⁴ , га	Население, тыс.чел	%
<i>Dn1</i> (365 чел/га)	113,6	32,94	49	283,4	69,02	65
<i>Dn2</i> (225 чел/га)	158,4	28,23	42	166,6	24,42	23
<i>Dn3</i> (40 чел/га)	172,8	6,05	9	477,3	12,74	12
Итого:	444,8	67,22	100	927,3	106,18	100

² - здесь понимается площадь селитебной территории районов

Жилые зоны Заводского района условно разбиваем на 30 участков, разделенных между собой уличными магистралями и зонами другого назначения, Северного района – на 13 участков (рисунок 3а и 3б соответственно).

Определим для двух районов местоположение фокусов тяготения населения по плотности и фокусов тяготения по вместимости ДООУ. Несмотря на существенные различия в струк-

туре и планировочной организации рассматриваемых территориальных образований, установленные фокусы тяготения района и ДОУ в пределах каждого района практически совпадают (расстояние между ними $\Delta < 200$ м) (рисунок 4).

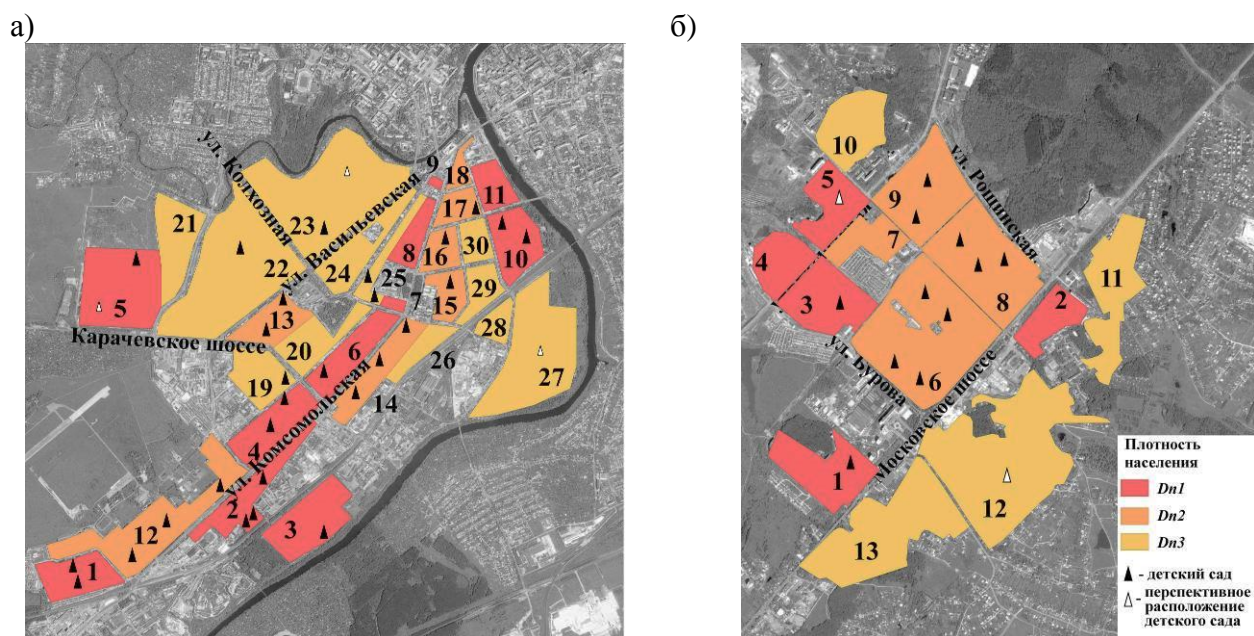


Рисунок 3 – Схема зонирования по плотностям населения для Заводского (а) и Северного (б) районов города Орла

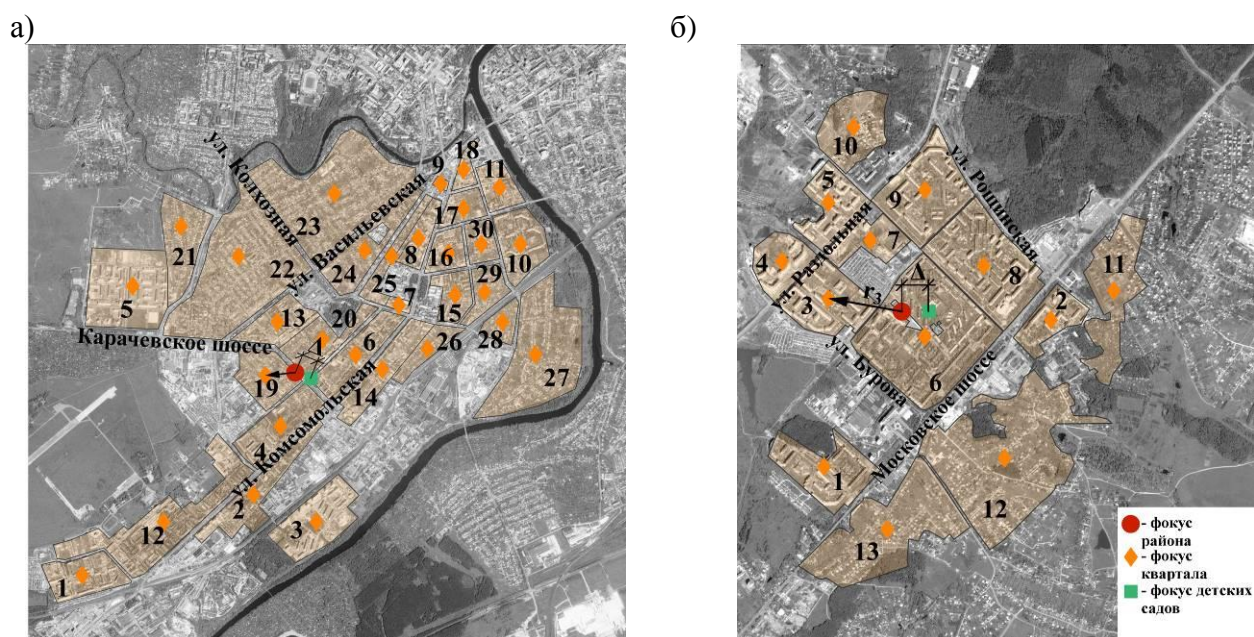


Рисунок 4 - Определение фокусов тяготения для Заводского (а) и Северного (б) районов города Орла

Это вызвано тем, что, как видно из рисунка 3, ДОУ в обоих районах размещены повсеместно (за редким исключением) в зонах застройки с высокой плотностью населения и практически отсутствуют в зонах застройки с низкой плотностью населения. Таким образом, можно сделать вывод о том, что территориальная доступность объектов ДОУ выше в кварталах с высокой плотностью населения.

Выполним расчет показателей доступности D_3 , $\xi_{3,j}$, ξ_3 и показателей удаленности территории r для каждого участка жилой зоны рассматриваемых районов. При этом определение средних значений территориально-персональной доступности ξ_3 для района в целом ограничим вместимостью ДООУ.

Интерес представляет сопоставление рассчитываемых показателей D_3 и ξ_3 для участков жилой застройки двух районов, отражающих доступность ДООУ во взаимосвязи с параметрами вместимости учреждения и удаленностью проживания населения (рисунок 5). Для анализа этих зависимостей немаловажным является назначение критериальных значений D_{3cr} и ξ_{3cr} . В первом приближении в качестве таких критериев можно принять значения показателей, определенных для района в целом: $D_{3cr} = \bar{D}_3$ и $\xi_{3cr} = \bar{\xi}_3$. Средние значения показателей доступности ДООУ Заводского района города Орла составили: $\bar{D}_3 = 0,86$, $\bar{\xi}_3 = 0,72$; Северного района - $\bar{D}_3 = 0,90$, $\bar{\xi}_3 = 0,82$.

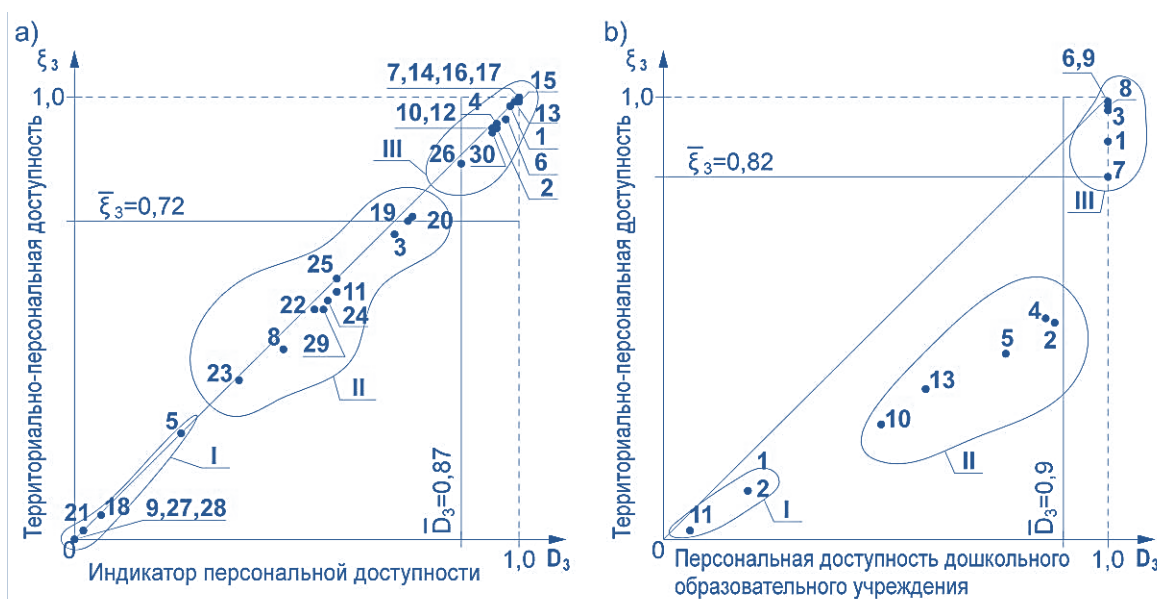


Рисунок 5 – Распределение участков жилых зон Заводского (а) и Северного (б) районов в теоретическом пространстве $R^{D_3 \xi_3}$ (номера участков соответствуют принятой нумерации на рисунке 3)

В принятой системе относительных координат рисунка 5 по уровню доступности ДООУ условно выделены три однородные группы участков (таблица 3). Так, для **группы I** характерны низкие значения показателей D_3 и ξ_3 , свидетельствующие о том, что значительная часть населения не имеет доступа к ДООУ как на своем, так и на смежных участках. Ситуация имеет кризисный характер и требует первоочередного решения. Участки **II группы** имеют более широкие интервалы значений D_3 и ξ_3 и существенно превосходят уровень доступности, характерный для группы I. **III группа** выделяется высокими (выше средних по району) значениями рассматриваемых показателей.

Сопоставляя анализируемые показатели двух районов, можно видеть, что в Заводском районе прослеживается близкая к линейной зависимости между показателями D_3 и ξ_3 , свидетельствующая о том, что мощность ДООУ обеспечивает предоставление услуг, значительно не превышая нормативный радиус доступности $R_f \approx R_n$. Для ДООУ Северного района характерна большая вместимость ДООУ, в которых производится обслуживание населения за пределами нормативного радиуса доступности $R_f > R_n$.

Таблица 3 – Сопоставительный анализ показателей доступности для групп однородных участков территории Заводского и Северного районов города Орла

№ группы участков	Значения показателей D_3 и ξ_3		Характеристика группы
	Заводской район	Северный район	
Группа I	$D_3 \leq 0,24$ $\xi_3 \leq 0,24$	$D_3 \leq 0,19$ $\xi_3 \leq 0,11$	Общий дефицит мест ДООУ в районе
Группа II	$D_3=0,37..0,76$ $\xi_3=0,36..0,73$	$D_3=0,47..0,88$ $\xi_3=0,26..0,5$	Значения показателей D_3 и ξ_3 для участков не превышают средних значений по району
Группа III	$D_3=0,87..1,0$ $\xi_3=0,85..1,0$	$D_3=1,0$ $\xi_3=0,82..0,99$	Все участки группы III расположены предельно близко к нормативному фокусу тяготения района.

С использованием описанной методики рассмотрим варианты размещения новых ДООУ в Заводском и Северном районах с позиций определения и количественного обоснования их оптимального местоположения (рисунок 6).

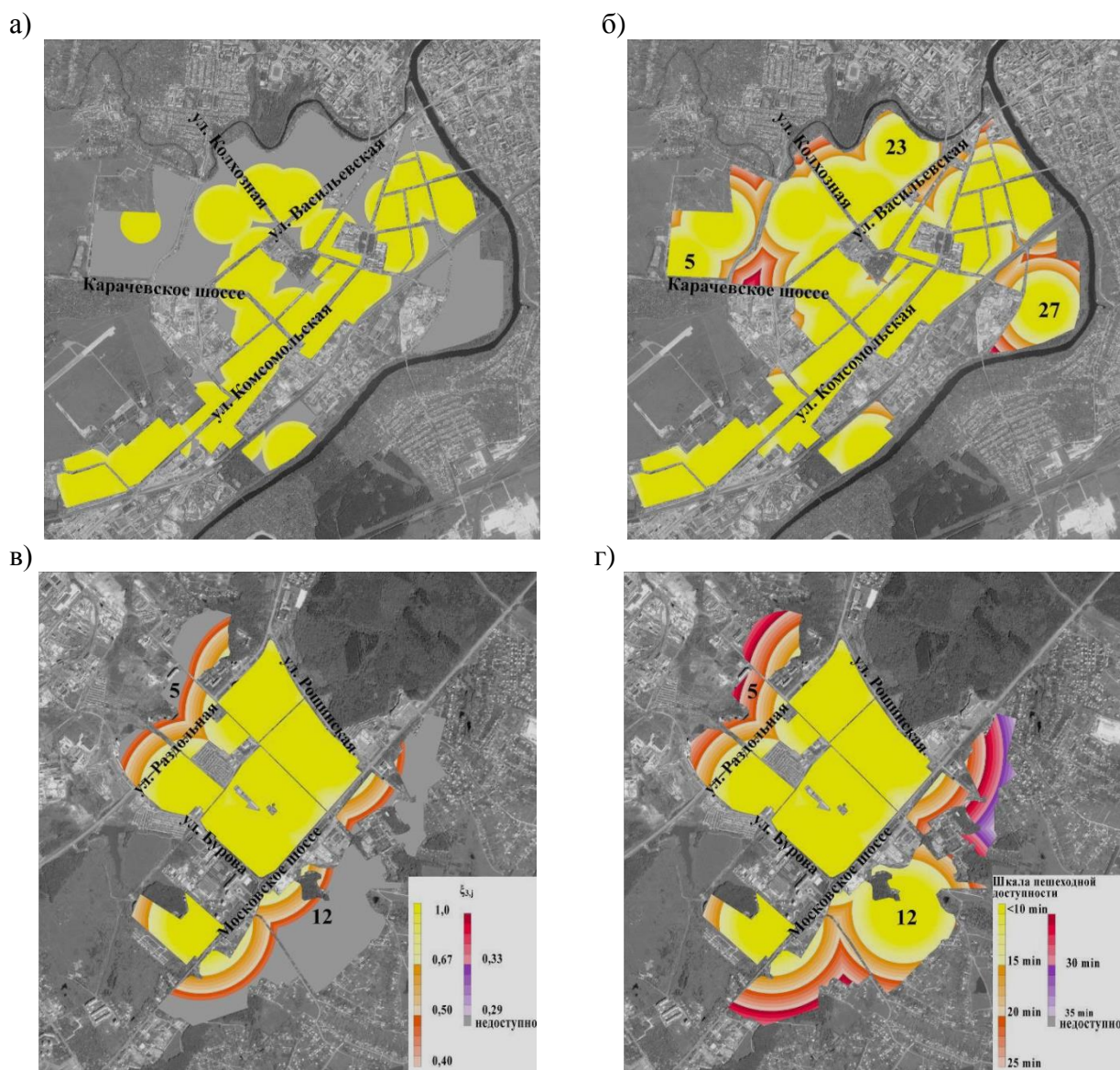


Рисунок 6 – Схема зонирования территориальных образований города Орла по фактически затрачиваемому времени на получение услуг в дошкольных образовательных учреждениях до (а, б) и после (в, г) строительства новых ДООУ в Заводском и Северном районах соответственно

Согласно сложившейся ситуации с охватом обслуживания в ДООУ жителей Заводского района (рисунок 6, а) население трети территории района не может получать услуги в ДООУ в пределах рассматриваемого территориального образования. В настоящее время планируется строительство здания дошкольного учреждения вместимостью 320 мест на участке 5 (см. рисунок 3, а). Этот этап строительства является оптимальным, необходимым, первоочередным, но, учитывая острый дефицит мест в учреждениях рассматриваемого типа, недостаточным: $\bar{D}_3 = 0,90$, $\bar{\xi}_3 = 0,84$. В этой связи предлагается для обеспечения 100%-го покрытия рассматриваемой территории жилой застройки радиусами обслуживания ДООУ ($\bar{D}_3 = 1,0$) разместить такие объекты вместимостью по 280 мест дополнительно на участках 23 и 27 (см. рисунок 6, а). Это позволит не только решить вопрос с дефицитом мест на этих участках, но и за счет перераспределения зон обслуживания существующих ДООУ значительно повысить показатели доступности этих объектов. В этом случае площадь территории, для которой характерно $\xi_3=0$, будет стремиться к нулю. При этом в целом по району значение показателя территориально-персональной доступности ДООУ и, соответственно, уровень реализации функции города в получении дошкольного образования жителями рассматриваемого территориального образования составят $\bar{\xi}_3 = 0,87$ при $\bar{D}_3 = 1,0$.

В Северном районе решение проблемы повышения обеспеченности населения местами в дошкольных образовательных учреждениях властями города планируется выполнить за счет строительства здания ДООУ вместимостью 320 мест на пятом участке (см. рисунок 3, б). Этот район характеризуется высокой плотностью населения, поэтому при строительстве на его территории здания ДООУ уровень реализации функции города в обеспечении дошкольного образования на рассматриваемом территориальном образовании повысится до $\bar{\xi}_3 = 0,88$. Минимальное значение показателя пешеходной доступности при этом составит $\xi_{3,j,min} = 0,25$, что соответствует 40 минутам фактически затрачиваемого времени на получение услуг в ДООУ для части жителей, проживающих на участках 2, 11-13 (см. рисунок 3, б). Повысить этот показатель можно при условии строительства в первую очередь здания ДООУ на участке 12, в этом случае $\bar{D}_3 = 1,0$, $\xi_{3,j,min} = 0,33$ (30 минут), $\bar{\xi}_3 = 0,84$.

Выводы

Предложенная методика оценки и анализа доступности социально значимых объектов биосферно-совместимого города позволит количественно оценить уровень реализуемости рассматриваемой функции города и обосновать расчетом целесообразность и эффективность развития сети объектов соответствующего назначения, территориальное расположение и мощность.

Методика может быть использована для более расширенного анализа эффективности градостроительных решений при проектировании различных объектов городской инфраструктуры, направленных на обеспечение реализуемости функций биосферно-совместимого города с целью удовлетворения общественных интересов его населения, и, соответственно, повышения уровня человеческого потенциала каждого жителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузьмин А.В., Юсин Г.С. Качество жизни и качество пространственной среды - социальные стандарты и нормативы в градостроительстве, архитектуре, строительстве // Градостроительство. 2011. №4. С. 16-19.
2. Ильичев В.А., Каримов А.М., Колчунов В.И. [и др.] Предложения к проекту доктрины градостроительства и расселения (стратегического планирования городов – city-planning) // Жилищное строительство, 2012. № 1. С. 2-11.
3. Klopp JM, Petretta DL. The urban sustainable development goal: indicators, complexity and the politics of measuring cities // Cities. 2017. 63. 92–7. doi.org/10.1016/j.cities.2016.12.019.

4. Ильичев В.А., Емельянов С.В., Колчунов В.И., Гордон В.А., Бакаева Н.В. Принципы преобразования города в биосферосовместимый и развивающий человека. М.: АСВ, 2015. – 184 с.
5. Ильичев В.А., Колчунов В.И., Берсенев А.В., Поздняков А.Л. Некоторые вопросы проектирования поселений с позиции концепции биосферной совместимости // Academia. Архитектура и строительство. 2009. № 1. С. 74-80.
6. Ильичев В.А., Колчунов В.И., Скобелева Е.А., Ключева Н.В. Методика расчета показателя уровня реализации функций биосферосовместимого поселения для удовлетворения рациональных потребностей человека // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. ЮЗГУ, 2013. №2. С. 40-45
7. Пилипенко О.В., Бакаева Н.В., Матюшин Д.В. Численные исследования показателя биосферной совместимости объектов городского транспортного строительства (на примере улично-дорожной сети) // Строительство и реконструкция. 2014. №1. С. 59-67.
8. Бакаева Н.В., Шишкина И.В. Оценка вклада транспортной инфраструктуры в реализацию функций биосферосовместимого города // Градостроительство. 2012. №1. С. 51-59.
9. Колчунов В.И., Скобелева Е.А., Брума Е.В. Методика расчета показателя доступности общественных зданий и сооружений маломобильным группам населения // Строительство и реконструкция. 2013. №4. С. 60-68.
10. Колчунов В.И., Брума Е.В. Предложения по количественной оценке соответствия элементов городской среды потребностям маломобильных групп // Строительство и реконструкция. 2012. №5(43). С. 35-38.
11. Barton, H. and Tsourou C. Healthy Urban Planning. London & New York: Spon Press, 2000.
12. Global strategy for health for all by the year 2000. Geneva, World Health Organization (Health for All Series, No. 3).
13. Barton, H. and Grant, M. (2011). Urban Planning for Healthy Cities. A Review of the Progress of the European Healthy Cities Programme. Journal of Urban Health: Bulletin of the New York Academy of Medicine, Vol. 90 , Suppl. 1
14. Федеральный проект «Формирование комфортной городской среды» на период до 2024 года. URL: <http://government.ru/projects/selection/735/35560/> (дата обращения: 10.08.2019).
15. Bächtold Peter (2013) The Space-Economic Transformation of the City. Towards Sustainability. Springer Dordrecht Heidelberg New York London. ISBN 978-94-007-5251-1. DOI 10.1007/978-94-007-5252-8
16. Andersson D.E., Andersson Å.E. Sustainability and the Built Environment: The Role of Durability // Sustainability. 2019. 11. 4926. doi:10.3390/su11184926
17. San Francisco Indicator Project developed by the SF Department of Public Health and the City and County of San Francisco [Электронный ресурс]. <http://www.sfindicatorproject.org/> accessed 29 Mar 2016 (дата обращения: 03.07.2019).
18. Pineo H., Glonti K., Rutter H. [et al.] Characteristics and use of urban health indicator tools by municipal built environment policy and decision-makers: a systematic review protocol // BioMed Central. 2017. №6. 2
19. Pineo H., Glonti K., Rutter H. [et al.] Use of urban health indicator tools by built environment policy- and decision-makers: a systematic review and narrative synthesis // Urban Health, doi.org/10.1007/s11524-019-00378-w
20. Пилипенко О.В., Скобелева Е.А. К оценке безопасности и комфортности пространственной среды жилых микрорайонов биосферосовместимых городов с позиций повышения человеческого потенциала // Экология урбанизированных территорий. 2016. № 1. С. 73-80
21. Pilipenko O., Skobeleva E., Bulgakov A. Methodology for assessing the comfort of an urban environment in terms of availability analyzing. Proceedings of the Creative Construction Conference (2018). PP. 914-921
22. Степина П.А. Создание методики моделирования дорожно-транспортных происшествий при производстве автотехнических экспертиз // Автотранспортное предприятие. 2009. №10. С. 38 40.
23. Сосновский В.А., Русакова Н.С. Прикладные методы градостроительных исследований. М.: Архитектура-С, 2006. 112 с.
24. Постановление Правительства Орловской области от 1 августа 2011 года № 250 «Об утверждении региональных нормативов градостроительного проектирования Орловской области» [Электронный ресурс] <http://docs.cntd.ru/document/473703049> (дата обращения: 05.07.2019)

REFERENCES

1. Kuz'min A.V., Yusin G.S. Kachestvo zhizni i kachestvo prostranstvennoy sredy - sotsial'nyye stan-darty i normativy v gradostroitel'stve, arkhitekture, stroitel'stve [The quality of life and the quality of the spatial environment - social standards and norms in urban planning, architecture, construction]. *Gradostroitel'stvo*. 2011. No 4. Pp. 16-19.
2. Il'ichev V.A., Karimov A.M., Kolchunov V.I. and etc. Predlozheniya k proyektu doktriny grado-ustroystva i rasseleniya (strategicheskogo planirovaniya gorodov – city-planning) [Proposals for the draft doctrine of urban planning and resettlement (strategic city planning - city-planning)]. *Zhilishchnoye stroitel'stvo*. 2012. No 1. Pp. 2-11.
3. Klopp JM, Petretta DL. The urban sustainable development goal: indicators, complexity and the politics of measuring cities. *Cities*. 2017; 63:92–7. doi.org/10.1016/j.cities.2016.12.019.

4. Il'ichev V.A., Yemel'yanov S.V., Kolchunov V.I., Gordon V.A., Bakayeva N.V. Printsipy preobrazova-niya go-roda v biosferosovmestimyy i razvivayushchiy cheloveka [The principles of the transformation of the city into a bio-sphere-compatible and developing person]. Moscow: ASV, 2015. 184 p.
5. Il'ichev V.A., Kolchunov V.I., Bersenev A.V., Pozdnyakov A.L. Nekotoryye voprosy proyektirovaniya pose-leniy s pozitsii kontseptsii biosfernoy sovmestimosti [Some issues of settlement design from the perspective of the con-cept of biosphere compatibility]. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo*. 2009. No 1. Pp. 74-80.
6. Il'ichev V.A., Kolchunov V.I., Skobeleva Ye.A., Klyuyeva N.V. Metodika rascheta pokazatelya urovnya real-izatsii funktsiy biosferosovmestimogo poseleniya dlya udovletvoreniya ratsional'nykh potrebnostey cheloveka [Method-ology for calculating the indicator of the level of implementation of the functions of a biosphere-compatible settlement to meet the rational needs of a person]. *Biosfer'naya sovmestimost': chelovek, region, tekhnologii*. 2013. No 2. Pp. 40-45
7. Pilipenko O.V., Bakayeva N.V., Matyushin D.V. Chislennyye issledovaniya pokazatelya biosfernoy sovmes-timosti ob"yektov gorodskogo transportnogo stroitel'stva (na primere ulichno-dorozhnoy seti) [Numerical studies of the biosphere compatibility indicator of urban transport construction objects (using the example of a street-road network)]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2014. No 1. Pp. 59-67.
8. Bakayeva N.V., Shishkina I.V. Otsenka vklada transportnoy infrastruktury v realizatsiyu funk-tsiy biosferoso-vmestimogo goroda [Assessment of the contribution of transport infrastructure to the implementation of the functions of a biosphere-compatible city]. *Gradostroitel'stvo*. 2012. No 1. Pp. 51-59.
9. Kolchunov V.I., Skobeleva Ye.A., Bruma Ye.V. Metodika rascheta pokazatelya dostupnosti obshche-stvennykh zdaniy i sooruzheniy malomobil'nykh gruppam naseleniya [Methodology for calculating the accessibility indi-cator of public buildings and structures for people with limited mobility]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2013. No 4. Pp. 60-68.
10. Kolchunov V.I., Bruma Ye.V. Predlozheniya po kolichestvennoy otsenke sootvetstviya elementov go-rodskey sredy potrebnostyam malomobil'nykh grupp [Proposals for a quantitative assessment of the correspondence of the elements of the urban environment to the needs of mobility groups]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2012. No 5(43). Pp. 35-38.
11. Barton H. and Tsourou C. Healthy Urban Planning. London & New York: Spon Press, 2000.
12. Global strategy for health for all by the year 2000. Geneva, World Health Organization (Health for All Se-ries, No. 3).
13. Barton H. and Grant M. Urban Planning for Healthy Cities. A Review of the Progress of the European Healthy Cities Programme. Journal of Urban Health: Bulletin of the New York Academy of Medicine. 2011. Vol. 90. Suppl. 1
14. Federal'nyy proyekt "Formirovaniye komfortnoy gorodskoy sredy" na period do 2024 goda [Federal project "Formation of a comfortable urban environment" for the period until 2024]. <http://government.ru/projects/selection/735/35560/> (data obrashcheniya: 10.08.2019).
15. Bächtold Peter (2013) The Space-Economic Transformation of the City. Towards Sustainability. Springer Dordrecht Heidelberg New York London. ISBN 978-94-007-5251-1. DOI 10.1007/978-94-007-5252-8
16. Andersson D.E., Andersson Å.E. Sustainability and the Built Environment: The Role of Durability // *Sustain-ability*. 2019. 11. 4926; doi:10.3390/su11184926
17. San Francisco Indicator Project developed by the SF Department of Public Health and the City and County of San Francisco. <http://www.sfindicatorproject.org/> accessed 29 Mar 2016 (available on: 03.07.2019).
18. Pineo H., Glonti K., Rutter H. [et al.] Characteristics and use of urban health indicator tools by munici-pal built environment policy and decision-makers: a systematic review protocol. *BioMed Central*. 2017. No 6. Pp. 2
19. Pineo H., Glonti K., Rutter H. [et al.] Use of urban health indicator tools by built environment policy- and decision-makers: a systematic review and narrative synthesis. *Urban Health*. doi.org/10.1007/s11524-019-00378-w
20. Pilipenko O.V., Skobeleva Ye.A. K otsenke bezopasnosti i komfortnosti prostranstvennoy sre-dy zhilykh mikrorayonov biosferosovmestimyykh gorodov s pozitsiy povysheniya chelovecheskogo potentsiala [To the assessment of the safety and comfort of the spatial environment of residential microdistricts of biosphere-compatible cities from the standpoint of increasing human potential]. *Ekologiya urbanizirovannykh territoriy*. 2016. No 1. Pp. 73-80
21. Pilipenko O., Skobeleva E., Bulgakov A. Methodology for assessing the comfort of an urban environ-ment in terms of availability analyzing. Proceedings of the Creative Construction Conference. 2018. Pp. 914-921
22. Stepina P.A. Sozdaniye metodiki modelirovaniya dorozhno-transportnykh proisshestviy pri proizvodstve avtotekhnicheskikh ekspertiz [Creation of a methodology for modeling traffic accidents in the production of automotive technical examinations]. *Avtotransportnoye predpriyatiye*. 2009. No 10. Pp. 38 – 40.
23. Sosnovskiy V.A., Rusakova N.S. Prikladnyye metody gradostroitel'nykh issledovaniy [Applied methods of urban research]. Moscow: Arkhitektura-S, 2006. 112 p.
24. Postanovleniye Pravitel'stva Orlovskoy oblasti ot 1 avgusta 2011 goda № 250 «Ob utverzhde-nii region-al'nykh normativov gradostroitel'nogo proyektirovaniya Orlovskoy oblasti» [Decree of the Government of the Oryol Re-gion dated August 1, 2011 No. 250 "On the Approval of Regional Standards for Urban Planning of the Oryol Region"] <http://docs.cntd.ru/document/473703049> (data obrashcheniya: 05.07.2019)

Информация об авторах:

Пилипенко Ольга Васильевна

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орел, Россия,
ректор, д-р техн. наук, профессор,
E-mail: rektor@ostu.ru

Колчунов Виталий Иванович

Юго-западный Государственный университет, г. Курск, Россия,
Академик РААСН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой УЗС
E-mail: asiorel@mail.ru

Скобелева Елена Анатольевна

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орел, Россия,
канд. тех. наук, директор архитектурно-строительного института
E-mail: asi.gu-unpk@mail.ru

Борисов Михаил Владимирович

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орел, Россия,
старший преподаватель кафедры строительных конструкций и материалов
E-mail: wmisher@gmail.com

Information about authors:

Pilipenko Olga Vasilievna

Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia,
Rector, Dr. Tech. sciences, professor,
E-mail: rektor@ostu.ru

Kolchunov Vitaliy Ivanovich

South-West State University, Kursk, Russia,
Academician of RAACS, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Unique Buildings and Structures
E-mail: asiorel@mail.ru

Skobeleva Elena Anatolyevna

Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia,
Cand. Tech. Sciences, Director of the Institute of Architecture and Civil Engineering
E-mail: asi.gu-unpk@mail.ru

Borisov Mikhail Vladimirovich

Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia,
Senior Lecturer, Department of Building Structures and Materials
Email: wmisher@gmail.com

ОБРАЗЦОВЫЕ УСАДЕБНЫЕ ХОЗЯЙСТВА И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОСЁЛКИ В СИСТЕМЕ КРУПНЫХ И КРУПНЕЙШИХ ИМЕНЕЙ КУРСКОГО КРАЯ XVIII – 1-Й ПОЛОВИНЫ XIX ВЕКОВ

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 образную структуру утраченных дворянских и купеческих усадеб в сфере реконструкции их архитектурно-пространственной организации 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 общенациональной и региональной русской культуры, отразившихся на формировании региональных особенностей строительных приёмов и образности архитектурных ансамблей усадеб Курского края.*

***Ключевые слова:** Курский край (губерния), образцовые усадьбы, ландшафт, композиция, планировка, сады, парки, пруды, господские дома, церкви, строительство, реконструкция.*

EXEMPLARY ESTATE FARMS AND TOWNS IN THE ECONOMIC SYSTEM OF LARGE AND VERY LARGE ESTATES KURSK REGION IN THE XVIII – 1ST HALF OF XIX CENTURIES

KHOLODOVA E.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

***Abstract.** The study is based on the identified archival and published sources, field research of the author, which enable to reconstruct a more reasonably shaped structure is lost in the nobility and merchant estates in the reconstruction of their spatial organization in the border region of Russia. The scientific novelty of the research is associated with the author's expeditions to identify signs of existence and full-scale examination of a number of preserved manor complexes, which previously did not attract 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 the gaps in the study of important pages of the history of national and regional Russian culture, which affected the formation of regional features of construction techniques and imagery of architectural ensembles of the estates of the Kursk region.*

***Keywords:** Kursk region (province), model estates, landscape, composition, planning, gardens, parks, ponds, 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 до-революционных 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. Багалая.

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 её 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.

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 – выявление образцовых усадебных комплексов, определение их состава, архитектурно-пространственной организации на одной из значительных территорий чернозёмных областей южного порубежья России – Курского края в XVIII – 1-й половины XIX вв.

Основная часть.

Курский край с плодородными почвами и благоприятным климатом в течение XVIII-XIX вв., в период активации и расцвета загородного усадебного строительства стал плодотворной базой для создания и развития образцовых усадебных хозяйств. Это значительно расширенные в экономическом плане жилые, хозяйственные и промышленные комплексы крупных и крупнейших имений, созданные предприимчивыми и талантливыми хозяйственниками, которые активно развивали свои поместья и смогли достичь внушительных результатов во многих отраслях сельского хозяйства и промышленности, заслужив звание – образцового усадебного хозяйства.

Современники отмечали, что в Курской губернии «...не было недостатка в хозяйствах, которые можно было бы назвать образцовыми по их организации» [1], которые «по применению способов культуры, наиболее соответствующим местным условиям, по разнообразию и удачному выбору возделываемых растений, по содержанию чистокровных пород скота, по промышленному садоводству и проч., значительно выделяются среди общего уровня местной сельскохозяйственной жизни» [2].

Значительного размаха и разнообразия по своим хозяйственным и научно-учебным задачам достигли землевладельцы после Великой реформы – отмены крепостного права. Большинство пореформенных образцовых имений принадлежало дворянам, остальные составляли собственность купцов и мещан. Это были образованные, профессиональные организаторы сельского хозяйства, промышленности и торговли, активные общественные деятели, занимавшие видные государственные посты – благотворители и меценаты, увлечённые ценители искусства и литературы.

Дореволюционные свидетельства – центральные и местные периодические издания по сельскому хозяйству, а так же специальные выпуски с описанием отдельных преуспевающих имений, помогли выявить в Курской губернии более сотни образцовых усадебных хозяйств.

Среди пятнадцати губерний (центрально-земледельческих, средневолжских и нижневолжских) Курская занимала лидирующее место по количеству образцовых усадеб. На рубеже XIX-XX вв. в Курской губернии их было более ста. Эти данные имеют высокий показатель в сравнении с другими губерниями [3, с.49-127].

Так, в предисловии к расширенному изданию «Кратких справочных сведений о некоторых русских хозяйствах» за 1900 г. было отмечено: "Четыреста восемьдесят три хозяйства, зарегистрированных в настоящем выпуске, распределяются по губерниям неодинаково. В Курской губернии сведения о 73 хозяйствах, между тем как в Астраханской губернии зарегистрировано всего 4 хозяйства, а в Оренбургской – всего одно. Число хозяйств в остальных губерниях колеблется от 17 (Казанская губерния) до 51 (Орловская и Тульская губернии)..." [2].

Владельцы имений модернизируют существующие и возводят новые промышленные комплексы: сахарные, винокуренные, пиво-медоваренные, консервные и кирпичные заводы, различные мельницы; восстанавливают и расширяют обветшавшие старинные усадьбы и храмы, или строят новые в соответствии с современными течениями строительной технологии и архитектуры.

Причём образцовые усадебные хозяйства принадлежали ко всем категориям владений – мелким, средним и крупным.

Эти данные важно привести к настоящему исследованию, т.к. большинство образцовых хозяйств пореформенного времени выросли на фундаменте крупных и образцовых дворянских имений XVIII - первой половины XIX вв., опыт и хозяйственная база которых явилась основой

их преемников – почти все из известных нам примеров попадают в круг образцовых усадеб пореформенного времени (рисунок 1).

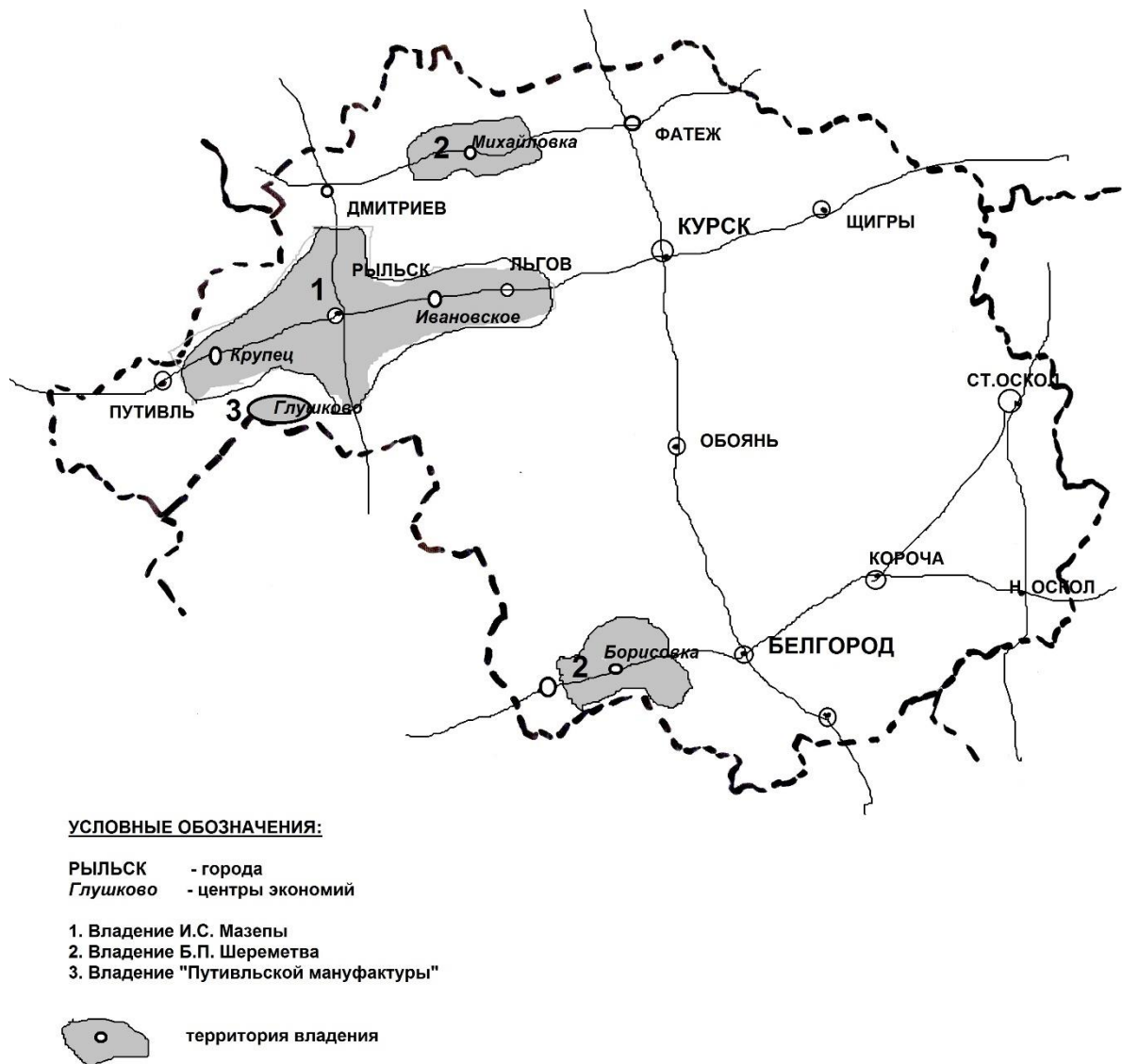


Рисунок 1 - Схема распространения крупнейших владений – образцовых усадебных хозяйств начала XVIII в.

Одним из первых образцовых развитых хозяйств в Курском крае, безусловно является обширное курское имение гетмана Ивана Степановича Мазепы. На рубеже XVII-XVIII вв. земли Рыльского, Лыговского и Путивльского уездов были пожалованы ему Петром I. Причём, в течение нескольких лет амбициозный помещик значительно расширяет своё имение, самостоятельно приобретает значительные соседние территории, и таким образом, к 1708 г. в его имение в 3 587 десятин входило 21 село, 7 деревень, 4 слободы, в них насчитывалось 4117 дворов и более около 28 тыс. человек [4, с.32].

Среди основанных на этих землях деревнях и сёлах - Ивановское, Степановка, Мазеповка (Рыльский район) - до сих пор напоминают нам имя, отчество и фамилию именитого вельможи.

В сёлах Ивановском и Крупец Мазепа основал усадьбы, из которых наибольшее развитие и форму экономического посёлка получает Ивановское.

Для ведения хозяйства, помещения приказчика и для приезда хозяина в его сёлах были устроены «экономические дворы», например, в с. Амони, д. Колодежах и в с. Коренева. «Дворы эти были незначительны: светлица одна, много две, черная изба, сарай один» [4, с.37].

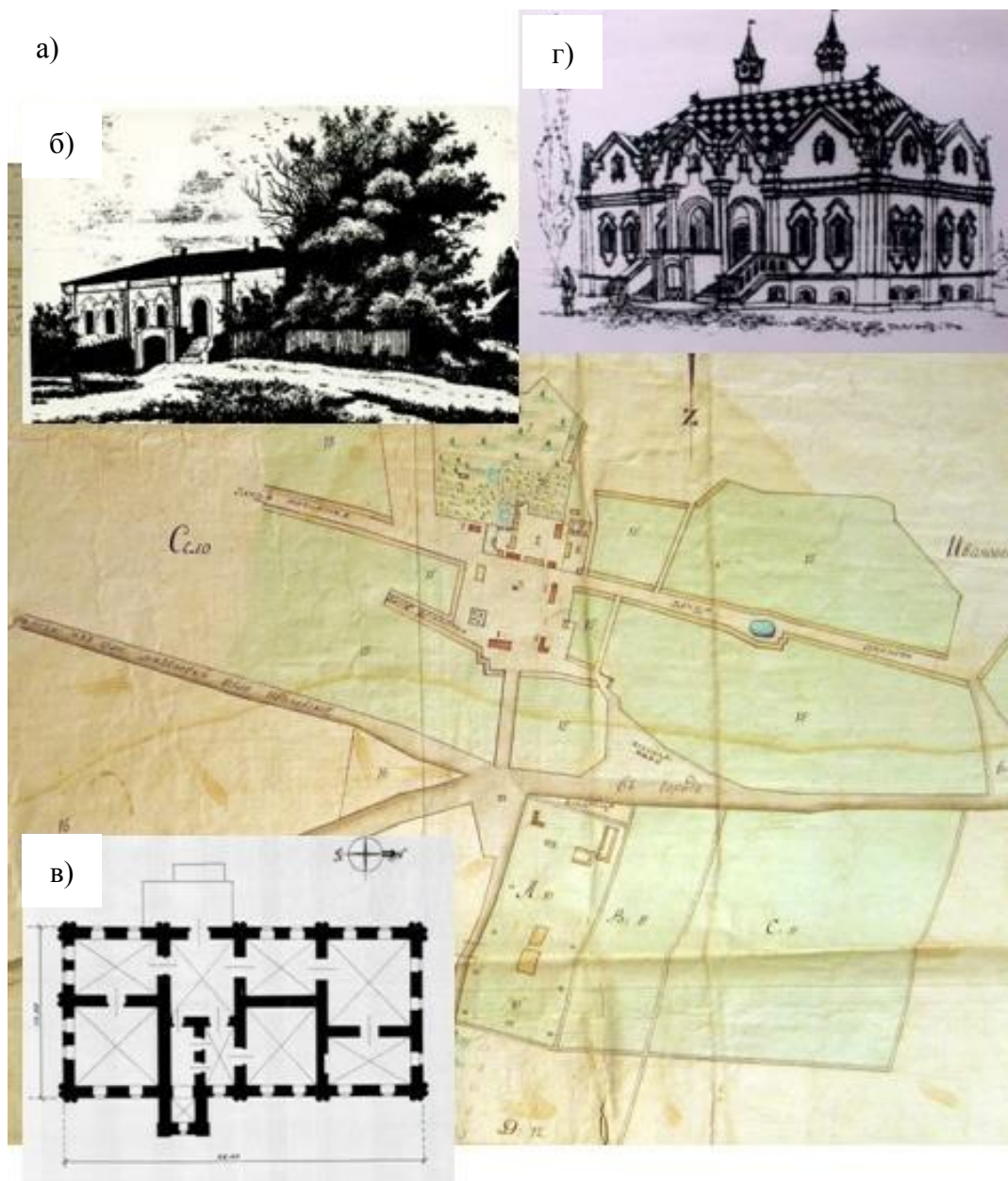


Рисунок 2 – Ивановское: План экономии в Ивановском на рубеже XVIII-XIX вв. (а) и так называемые «Палаты Мазены» (б). План 1-го этажа (в) и графические изображения «Палат Мазены» (г)

В других же сёлах вместе с расширением хозяйства расширялись и дворы, достигая солидных размеров, например, в Ивановском (рисунок 2), в котором по описанию на 1708 г. было три церкви, развитый экономический посёлок и жилая хозяйская усадьба. «Постройки во дворе Мазены расположены по древне-русскому 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» [4,с.37-38].

При этом Ивановское было селом торговым. Здесь было 697 дворов и «каждый недельный день был торг», а по престольным праздникам крупные ярмарки. Для торга в селе было построено 10 лавок, для остановки приезжих людей находилась харчевня. В селе же были две бани торговые, т.е. для приезжего населения, двор шинковый, где продавали «брацкий мед», а так же 6 шинковых дворов, содержимых жителями села [...] Ивановское являлось центром духовного управления и умственной жизни: в нем при церкви Архистратига Михаила находим викария наместника Федора Иванова, а при церквях школу, где живут «прихожие школяры» [4,с.37-38].

Торговыми и экономическим сёлами в имении Мазепы были Нижние Деревеньки и Дроновка, где так же как и в Ивановском, но с меньшим размахом, были обустроены лавки для торгов, а при церквях были школы. Так же школы были в Неплюевке и Алешне [4,с.35].

Кроме того в с. Крупце Мазепа основал укрепленную усадьбу – «острожек городок». Усадебный комплекс, окруженный треугольной в плане деревянной крепостью с башнями «без верха» был расположен на горе над мельничным прудом на реке Крупец. Внутри крепости располагался главный дом-светлица в окружении хозяйственных построек.

Все строения в имении И.С. Мазепы были деревянные.

В экономиях занимались земледелием «в небольших размерах». Выращивали овёс, ячмень, просо, пшеницу, гречиху. Хлеб частично перерабатывался на винокурнях, которых в поместье Мазепы было шесть: по две в Ивановском и Нижних Деревенька, и по одной в Амо-ни и Дроновке [4].

В 1709 г. после Полтавской битвы гетман Мазепа, перешедший на сторону шведов, бежал за границу. Его курские имения были конфискованы и переданы А.Д. Меншикову. Далее в течении XVIII в. они были поочередно в руках, ставших родственниками по женской линии, Головиных, Гольдштейн-Беков, и наконец, Барятинских, которые приумножали это поместье новыми землями, а Ивановское развилось к началу XIX в. в крупнейший экономический посёлок [5] (рисунок 3).

По описанию 1784 г. видно, что торговое село Ивановское превращается в хорошо развитый и известный промышленный центр с фабриками, заводами, активной торговлей, мастерскими и благотворительными заведениями: «Ивановское село селением лежит при болоте Ивановском при дороге, лежащей из Курска в Рыльск. Во оном селе две церкви. Первая деревянная во имя Покрова пресвятыя богородицы. Вторая каменная верховых апостолов Петра и Павла, при которых священно и церковно служительских дворов шесть. Во оных душ семнадцать да принцессы Екатерины Петровны Фон-Гольштейн-Бек дом каменного и деревянного строения, в которых каменных восемь покоев и домовая контора о шести каменных же покоях, при оном доме её светлости конской завод составляющей из английских, дацких, неополитанских и арапских лошадей числом до трёх сот пятидесяти, а от селения в двух верстах на речке Избице её светлости мельница о трёх мучных поставах. Сверх того, в оном селении имеются фабрики суконная, полотняная и ковреная, в которых ткуются скатерти, комчатные салфетки и сукна на четырёх станах. Кузниц деревянных десять, и одна на содержании господском богадельня, устроены так же два хлебных партикулярных магазейны, из которых продажу хлеба производят в Малороссии и в протчих местах, а больше содержится оной для общественной их крестьянской надобности...» [6; Ч.5, Л.79 об.]. Позднее здесь был построен и сахарно-ромовый завод, а Ивановское на рубеже XVIII-XIX вв. «...превратилось в своеобразный центр губернии, где каждый, кому нужно было заказать экипаж, прочную мебель, кто отделявал дом, имея надобность в слесарях, обойщиках, малярах и других мастерах, каждый, кто желал украсить свои комнаты ценными деревьями и кому нужно было приобрести теленка или барана возвышенной породы, ехал в Ивановское, с уверенностью найти там желаемое» [5].

В первой четверти XIX в. Иван Иванович Барятинский значительно развивает курские имение и в версте южнее с. Ивановского строит крупнейший дворцово-парковый комплекс,

связывая аллеей, проходящей по визуально-коммуникативной оси дворца, крупную жилую и промышленную часть усадьбы.

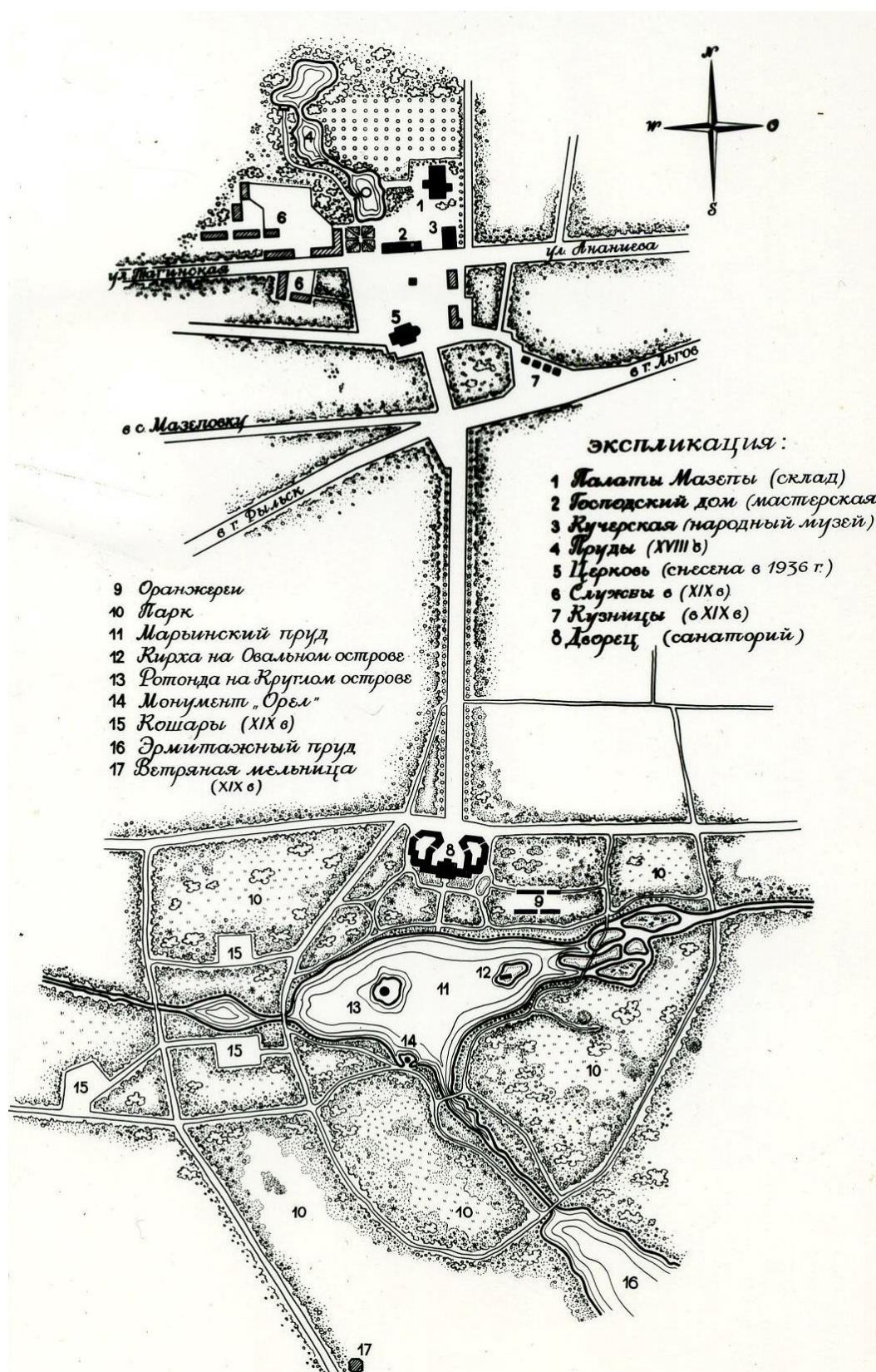


Рисунок 3 - ИВАНОВСКОЕ и МАРЬИНО Барятинских. Связь экономического посёлка нач. XVIII в. в Ивановском с дворцово-парковым комплексом 1-й пол. XIX в.. Организация в западной парадной части усадьбы – дополнительных хозяйственных зон – «кошар». Рисунок арх. С.И. Фёдорова.

Сохранившийся «План господскому дому, состоящему Львовской округи в селе Ивановском» 1790 г., хорошо показывает развитую к этому времени жилую часть экономического посёлка с благоустроенным на прудах садом: большой двор, два здания каменных жилых палат с главными фасадами, выходящими на юг, перед которыми были разбиты цветники, служебные каменные и деревянные постройки, расположенные вдоль окружавшей усадьбу кирпичной стены, обсаженной деревьями. С северной стороны находился обширный фруктовый сад, «пруды копанные», соединенные проточными каналами, горбатые мостики и беседки [7].

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.

Следующая в ряду первых образцовых крупных усадеб – Борисовка, основанная Хотмыжскими полковыми казаками в 1643 г. у рек Ворсклы и Гостеницы. В 1705 г. Борисовка переходит к крупнейшему землевладельцу Борису Петровичу Шереметеву (1652-1719) и становится центром курских поместий графа, скоро увеличенной за счёт покупок земель у мелких служилых людей. Его имение включало не только селения Хотмыжского уезда, но и земли в других уездах Курского края. Борисовское владение более двух веков принадлежащее прославленному роду Шереметевых было значительно ими преумножено. В начале XIX в. Борисовская вотчина составляла 55 822 десятины земли и 30 408 душ крепостных.

Борисовка стала главной конторой управления экономиями развитого крупного центрально-чернозёмного имения и образцового хозяйства Шереметвых. 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 [8]. Сельскохозяйственные промышленные комплексы находились в многочисленных сёлах и хуторах имения.

В первой четверти XIX в. Иван Иванович Барятинский значительно развивает курские имение и в версте южнее с. Ивановского строит крупнейший дворцово-парковый комплекс, связывая аллеей, проходящей по визуально-коммуникативной оси дворца, крупную жилую и промышленную часть усадьбы.

В первой четверти XIX в. Иван Иванович Барятинский значительно развивает курские имение и в версте южнее с. Ивановского строит крупнейший дворцово-парковый комплекс, связывая аллеей, проходящей по визуально-коммуникативной оси дворца, крупную жилую и промышленную часть усадьбы.

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» (Приложение 1-2в). 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, зарисовки 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 Пол-

тавского сражения графу Б.П. Шереметеву, вероятно отбитых у шведов, т.к. они очень повреждены...» [9].

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 [10].

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. [9].

Кроме того, при усадебном комплексе в Борисовке (рисунок 4) находился, основанный Б.П. Шереметевым в 1714 г. на высоком правом берегу реки Ворсклы Тихвинский женский монастырь, основанный в память о Полтавской победе. Откуда открывалась панорама на усадьбу, село и степные окрестности всего имения, границы которого простирались "до самого горизонта".

Таким образом, в отличие от традиционной храмовой части крупных усадеб (церковь-усыпальница, мавзолей, часовня), Борисовский комплекс имел здесь расширенный состав – в виде целого монастыря. Такое соседство жилой, административной, духовной и позднее прикнувшей к ним учебной частей усадьбы было довольно редким и отличительным от других образцовых экономий.

Название Тихвинский монастырь получил в честь, подаренной монастырю Б.П. Шереметевым Чудотворной Тихвинской иконы Божией Матери, которая ранее всегда сопровождала графа в его военных походах и битвах и спасла однажды от верной смерти в бою. Б.П. Шереметевым был написан "Завет", который устанавливал хозяйственное устройство монастыря, строгие нормы поведения насельников, его штаты и др. Владельцы Борисовского имения, потомки Б.П. Шереметева, так же поддерживали монастырь материально. В середине XIX в. монастырское хозяйство в 38 десятин земли включало: комплекс монастыря (два храма и келейные корпуса), усадьбы священников, гостиницу, скотный двор, кладбище, сад, огороды, монастырский лес, пашни и луга. Позднее при монастыре были открыты церковноприходская школа и больница [11] (Приложение 1-2в).

В это время в Борисовке было четыре действующих храма и две кладбищенские часовни. До наших дней дошла только Михайловская церковь.

Далеко за пределами губернии Борисовка снискала славу крупного центра кустарных промыслов, которых насчитывалось более пятидесяти. Основными были: иконописный, кожевенный, шорный, сапожный, овчинный, гончарный, столярный, бондарный, ткацкий, кузнечный, ювелирный и др.

Иконописный промысел был основан ещё в начале XVIII в. Б.П. Шереметевым. Историк Н.А. Добротворский, изучавший Курский край, писал: «Иконное производство свило себе гнездо в слободе Борисовке Грайворонского уезда. Изготавливались здесь иконы и развозились по Южной России и достигали Болгарии и Сербии. Известный по истории церковной живописи В.Л. Боровиковский учился живописи в слободе Борисовке...» [9].

Следующее описание дают современники на 1780-е гг.: «Михайловка Дмитриевской округи населена в 1712 г. "дикие места ея пожалованы Государем Петром Великим фельд-маршалу (графу Борису Петровичу Шереметеву во время Прусского замирения". С тех пор была в руках семьи Шереметевых как промышленное село, весьма богатое природными ресурсами "в состоящих около слободы горах, весьма много находится по примечаниям железной руды, много есть изветсковаго камня, красной и сине глины годной для изразцов, и дикаго имеловаго камней", слобода приносила "земельные и прочие доходы". По описанию 1786 г. слобода это было крупное развитое поселение. "Жителей в ней имеется множество разных, нашедших из других мест платящих с дворов помещику подать двory все хотя деревянные, но хорошо на образец городской отделанныя, коих более 1000 и некоторыя с каменными погребамы, церквей 3 каменные, и у каждой имеется школа обочающая юношество Российской

грамоте и петь по нотам; а в 1751 году заводилось было и Латинское училище... Художеств в слободе сей всяких множество, фабрик и заводов имеется; воскобойной, маслобитной пенько-трепальной, прядильной красильной и кожевенной..." Современники отмечали "сия слобода превосходит многия города, приятным и выгодным положением своим".

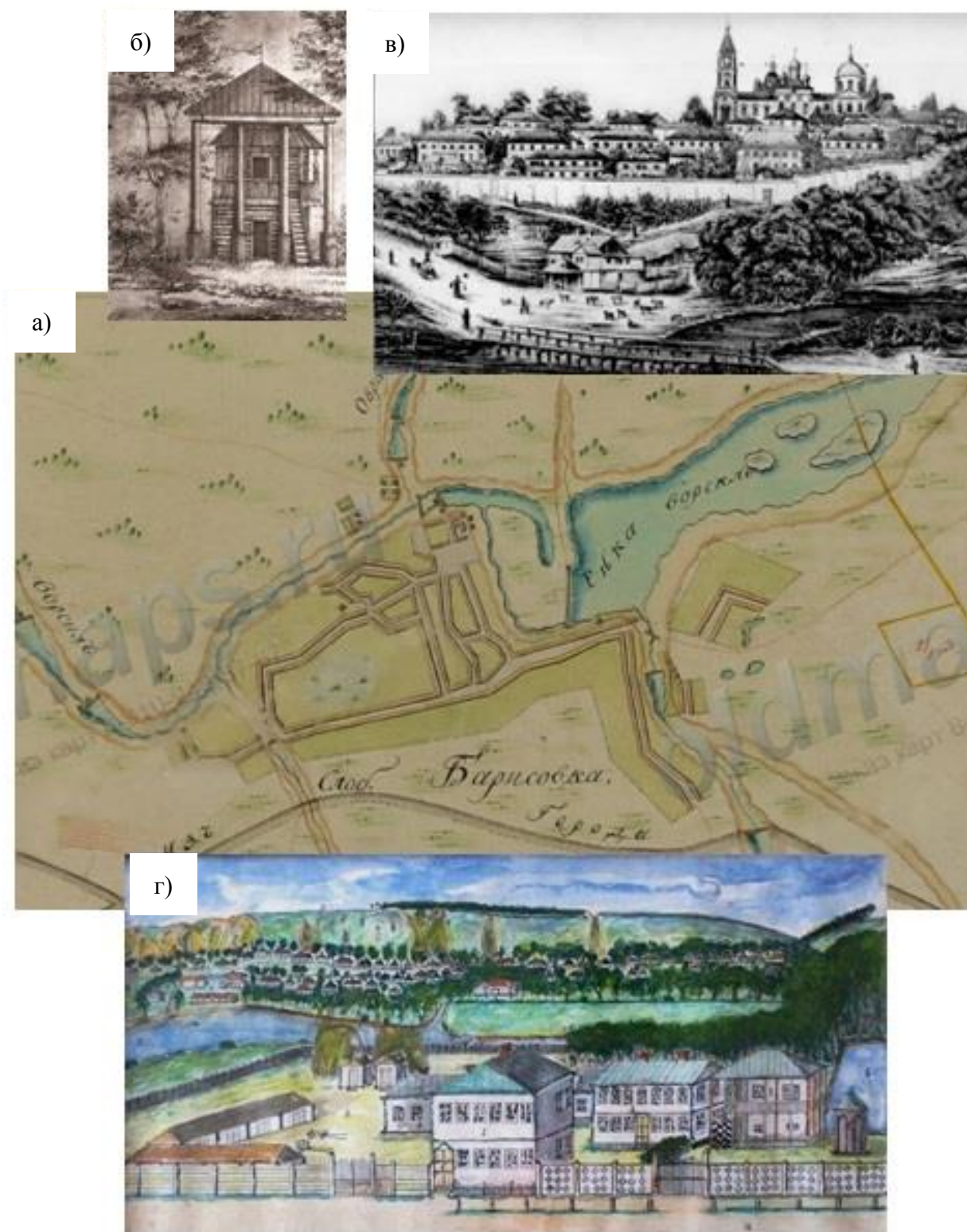


Рисунок 4 - БОРИСОВКА – Шереметевых (а). Т.н. «Домик Петра 1» (б), монастырь (в), усадьба (г).

На 1775 г. в слободе Михайловке "церквей каменных - 1 деревянных - 4. Жителей подданных малороссиян - 1284, их дворов 330, купцов и розвочинцов 170 дворов, за построение которых платят помещику до 500 рублей. Винокуренных заводов - 5 (вино для казенной поставки). В год одна яманка, каждую неделю торги, для которых построено лавок деревянных - 12, ряды рыбные, мясные и протчие, в коих - 66 лавок... господский дом деревянный один» [16, с.172].

Далее продолжает перечень наиболее развитых в экономическом отношении усадеб старейшее промышленное село Курского края – Глушково, основанное в 1647 г. служилыми людьми и ставшее в первой четверти XVIII в., значительным и известным образцовым хозяйством.

По указу Петра I в Глушково была построена суконная фабрика, названная Путивльской мануфактурой. Она была в числе 15 возникших в России в первой четверти XVIII в. суконных фабрик, предназначенных для снабжения армии сукном. Южные границы Среднерусской возвышенности, небольшие гористые массивы в окрестностях Глушково, благоприятствовали для разведения овец. Пётр I говорил: "...Курский край и Бог благословил паче иных краёв Российского государства способным воздухом к размножению овец и доброй шерсти...". К тому же переселенцы Украины принесли с собой ремесло ткача. Они содержали овчарни, из шерсти овец выделывали разнообразные изделия - кушаки, платья, пояса, головные уборы и др. [12].

В Курский край устремляются первые русские промышленники. В 1719 г. московский купец Иван Дубровский покупает Глушково и укрупняет суконную фабрику, совершенствуя экономический посёлок. Большая часть работ по производству сукна выполнялась на самой фабрике, но кроме того ткацкие работы раздавались по домам в соседние сёла, которые были постепенно скуплены владельцем. Две трети прибыли шло государству. В течении XVIII в. фабрика постепенно совершенствовалась и при др. владельцах имения в течении 1730-х – 1790-х гг., которыми были московские купцы: Нееловы, И.М. Полуярославцев, Матвеевы [12].

При Матвеевых мануфактура достигла особенного размаха. Главный корпус был реконструирован, построено несколько складских и производственных зданий, закуплено новое оборудование. По объёму выпускаемого сукна (100 тыс. аршин в год) Глушковская фабрика уступала лишь московским мануфактурам. За успешное ведение хозяйства Матвеевых возвели в дворянское достоинство. В 1783 г. на средства Матвеевых, севернее фабричных корпусов, на берегу реки Сейм построена кирпичная Троицкая церковь. Усадебный комплекс XVIII в. и документальные свидетельства не сохранились и говорить о его составе затруднительно.

В 1791 г. Матвеевы продают фабрику и Глушковское имение генерал-аншефу, писателю и музыканту, скульптору и архитектору графу П.С. Потёмкину. При нём был надстроен второй этаж главного корпуса фабрики, сооружены новые магазины и корпуса, приобретено новейшее оборудование Севернее Глушковской фабрики и храма Троицкого - на просторной площадке полуострова, образованного поворотами реки Сейм и её живописным заливом, с круглым островом "Лужок", П.С. Потёмкин устраивает усадьбу, разбивает парк. У входа в парк стояла небольшая деревянная сторожка "вся в кружевах деревянной резьбы", старожилы говорят, что и господский дом был в таком же стиле. Архитектура усадебных зданий до нас не дошла - постройки сгорели в революционных пожарах 1905 года. К 1822 г. по его проекту была значительно расширена и реконструирована Троицкая церковь. Сам же создатель великолепного храма был похоронен у северной стены храма [13].

После смерти П.С. Потёмкина в 1796 г. владелицей имения стала его жена Прасковья Андреевна (ум. 1816 г.), затем её сын Сергей Павлович Потёмкин (1787-1858), который вложил большой капитал в развитие фабрики и привёл выработку сукна до 500 тысяч аршин в год [13]. «В Рыльском уезде в с. Глушкове есть великая суконная фабрика, на которой делается до 500 000 аршин сукна и несколько каразев, и всё сие отправляется для обмундирования войска в казну» [14, с. 259].

После Потёмкиных владельцами обширного имения Путивльского и Рыльского уездов (около 20 000 душ) становятся Рибопьеры. А в пореформенный период в 1863 г. своё курское имение они продают крупному сахаропромышленнику А.Я. Терещенко (1794 - ок. 1873), который значительно расширяет экономию [12, с.114-116].

Примером наиболее развитого хозяйства XVIII в. является крупное имение дворян Анненковых, ведущих свою историю в Курском крае с XVII в, которые на рубеже XVII-XVIII имели более 700 га земли в Курском и Дмитриевском станах. К 1760-м гг. они создали крепкое хозяйство при усадьбах в Карманово и Жеребцово, которое развивалось на протяжении полувека до 1830-х гг. пока не перешло в руки других владельцев, которые на основе этого имения создали промышленное производство уже в пореформенное время [15].

Одним из ранних документов, дающий представление о курских усадьбах Анненковых в Курском и Дмитриевском уездах при Жеребцове, Полянском, Карманове и др. является оригинал редкого источника XVIII столетия «Дневник курского помещика И.П. Анненкова» (датированный) 1745-1766 гг.) и представляет бесценный материал для изучения усадебной жизни крупного землевладения Русского порубежья середины XVIII в. [15].

Здесь отражены самые разнообразные темы: расходы на строение церкви, помещичьего дома, на покупку земли и крестьян. Здесь же даны сведения об активном обустройстве усадеб в Карманово и Жеребцово - строительстве и перестройке главных усадебных домов, хозяйственных построек, церквей, закладке промышленного сада, устройстве суконной фабрики и др. Круг вопросов, затрагиваемых автором, довольно обширен. Для нас важны сведения истории строительства объектов имений, контракты с подрядчиками, детали о характере стройки, о материалах и приемах работы, сельскохозяйственные данные о ведении хозяйства, приобретении земель (сделки), и многое другое [15].

В описаниях Курской округи даны следующие сведения о Жеребцове: «Селением лежит на реке Курице по течению оной вверх, больших дорог кроме проезжих чрез реку Курицу не имеется. Во оном селении означенного надворного советника Анненкова для приезда деревянной дом, да на реке Курице мельница о двух анбарах, трех мучных поставках, четырех просяных ступах с сукновальнею. Также для его собственной надобности два кирпичных завода и один извесной. Лес состоит при селении селитебной на гористом, а дровяной на буеракистом местах и принадлежит ему Анненкову с прочими других деревень жителями». И далее: «[...] Чрез реку Курицу по примеру на чetyреста сажень также имеется ево надворного советника для домового расхода суконная фабрика...» [6; Ч.1.Л.40 об.,46 об.].

В экономическом описании селений Курской округи 1784 г. можно выявить ряд крупных усадеб с развитым хозяйственно-заводским комплексом, например, Рышково, Колонтаево-Износково, Никольское на Тускари, Жигаева и др.

Приведённые ниже описания дают ценный материал о расположении и устройстве этих 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 которой священно и церковно служительских дворов два. Во оных душ четыре, да господской деревянной дом, при котором суконная фабрика деревянного строения с одним упокоем, в котором один стан. В той фабрике работу производят ткальную и прядильную крепостные люди, а материалы покупаются в Москве, сукна ж для валки и крошения вытканые отправляются Москву ж. Да один постоялой двор. При том же доме на реке Семи мельница о шести мучных поставках и двух толчеях, не доезжая до оной мельницы на солянке мост тритцати двух сажень. Лес состоит около одного дому по лугу и островам принадлежит полковнику Алексею Ивановичу Панину» [6; Ч.1. Л.83об.].

«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, Юрьи (Степанова сына Арсеньева) в два этажа о двадцати покоях. Во оных имеют сами они жительство да ево ж, Юрьи Арсеньева один кирпичный завод. Кузниц устроено деревянных три, а на означенной речки мельница об одном мучном поставе...» [6; Ч.5. Л.81об.].

«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 богородицы 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 одного ограда каменная да для людей связей восемь о шестнадцати покоях на берегу реки Реута каменная солодовня ево ж Изъединова, две мельницы... Заводы его Изъединова в конце селения кирпичной, а внутри одного известной и одна имеется деревянная кузница при речке Бобрике винной в том же селе в год бывает пять ярманков...» [6; 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 богородицы... дом его сиятельства графа Якова Александровича Брюса деревянной, а на речке Жигаевой мельница о трёх мучных поставках и об одной просяной ступе. Заводы имеются его сиятельства кирпичной и конской, для которого устроены две каменные конюшни...» [6; Ч.5. Л.140-141об.].

«В Хотмыжском уезде в сл. Ракитной находятся фабрики: 1 суконная, 1 каразейная, 1 полотняная, 1 коровая и 1 кирпичный завод; в с. Красной Яруге 1 суконная фабрика; сверх сих заведено по разным местам 5 винокуренных заводов» [14, с.253].

Из различных источников выявлены следующие «улучшенной системой хозяйствования» имения 1-й половины XIX в.: *Белгородский у.* – Виргилевка А.В. Головкина; Новая Таволжанка С.Г. Жуковского; Недоступовка И.Ф. Клепацкого; Толоконное фон Розена; Яковлево И.Н. Пузанова; имение И.А. Пфеллера "на юге Курской губ."; *Грайворонский у.* – Красная Яруга С.С. Хлюстина; Головчино - Хорватов; *Дмитриевский у.* – Дерюгино Б.Д. Голицына; *Курский у.*: Рышково А.Н. Карамзиной; Моква А.А. Нелидова; Александровка Н.А. Пузанова; *Новооскольский у.* – Троицкое и Михайловское М.Ф. Дурасова; Чернянка М.П. Щербинина; *Обоянский у.* – Ивня А.Н. Карамзиной, Вознесенское Н.П. Устимовича, Дмитриевское и Переверзевка К.П. Клейнмихеля; *Рыльский у.* – Марьино (Ивановское) Барятинских (Приложение 1-2г); Боброво М.С. Деменкова; *Фатежский у.* – Мирлюбово И.В. Мещерского; *Щигровский у.* – Александровка М.А. Пузанова [16, с.11].

Однако, лидерами по мощности и разнообразию сельскохозяйственного производства на этот период, безусловно, выходили заповедное имение Барятинских с центром в Ивановском-Марьино; имение Шереметевых Борисовка, имение Нелидовых Моква (рисунок 5).

Из исследования видно, что основной тип образцовых усадеб Курской губернии – сельскохозяйственно-промышленный. Как уже отмечалось, плодородная земля и благоприятный климат позволяли землевладельцам заниматься самыми разнообразными видами сельского хозяйства, и добиваться довольно высоких результатов. Поэтому каркас образцового имения чаще всего составляли все основные отрасли: полеводство, плодоводство, животноводство, лесоводство и переработка продуктов сельского хозяйства. Которые были развиты не в равной степени.

Усадебное имение второй половины XVIII в. хлебопашенное, окружённое преимущественно полями. Основное занятие было полеводство. Безусловно к образцовым хозяйствам можно отнести все усадьбы с развитым промышленным комплексом. Изучая статистику промышленности можно представить примерный количественный состав образцовых усадеб.

Во второй половине XVIII в. промышленное производство было развито слабо, самым распространённым было винокурение - 87 заводов, коневодство - 31 завод. Заводов насчитывалось единицы. Создаются примеры имений, включающие в усадебный комплекс (вблизи его) небольшое промышленное производство. Причём, подмечена такая закономерность, про-

мышленность одного направления часто было сосредоточена в границах одного округа. Заводы: воскобойные - 6, кожевенный - 1 в Белгородской округе, селитренные - 2 в Корочанской округе, солодовенный - 1 в Льговской округе, овчарный - 1 в Путивльской округе. Народные промыслы дали толчок организации в имениях фабрик: канатные - 3, прядильные - 10 в Дмитриевской округе, суконные - 2 в Курской округе и 1 в Льговской округе, полоняные - 1 в Льговской округе и 1 в Фатежской округе, ковровые - 1 в Льговской округе и 1 в Старооскольской округе, "трепная" - 1 в Фатежской округе. [16, Л.9].



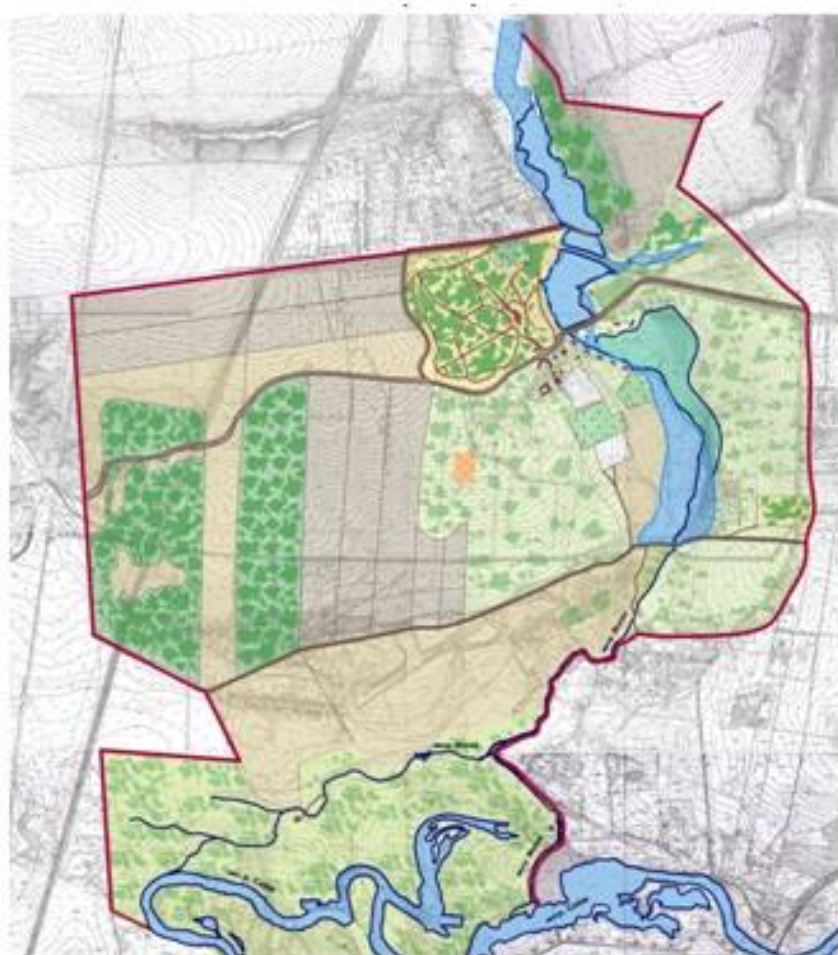
дворец



Спасская церковь



дом управления имение



Условные обозначения:

- восстановление дорог по "Экономическому плану"
- дамба
- дорожки парка по "Экономическому плану"
- границы территории усадьбы Нелидовых по "Экономическому плану"
- здание
- кладбище
- пруды, реки
- пойма реки
- русло р. Моква
- сад
- усадебный парк
- дубрава
- лес
- луга
- пашни
- пески

Рисунок 5 - МОКВА Нелидовых. Реконструкция территории образцовой усадьбы и части имения на сер. XIX в.

Ни одно поселение не обходилось без мельниц, которые были в ведении в основном у помещиков и однодворцев. Причём мукомольные мельницы, нередко с крупорушками и сукновальнями, преимущественно устраивали водные на плотинах рек и лишь единицы муко-

мельных мельниц были ветренными. На 1784 г. - 1573 водяных и всего 78 ветряных мельниц. "...Ходу судового по всем рекам нет и быть не может по причине их мелкости как и потому, что застроены они многими владельческими мельницами, а хотя б и могли по оным суда (ежели б мельниц не было) в полуую воду... но судов никаких за неимением к тому способных лесов делать не изчего..." [16, Л.9].

Статистика начала и сер. XIX в. отмечает следующие показатели по Курской губ. из которых выявляются основные виды сельскохозяйственной деятельности. Так на 1810 г.: «Заводов и фабрик: кожевенных 55, салотопленных 30, воскобойных 23, мыловаренных 15, свечных сальных 3, суконных фабрик 9, всего 135, кирпичных 56, изразцовых 11, селитренных 3, всего 70. Главнейшие и вывозимых товаров: хлеб, пенька, лён, сало, кожи, конопляное масло, мёд, воск, канаты. Из них часть отправляется Черноморским портам, а др. в Санкт-Петербург» [14, с.239].

В середине XIX в. отмечены следующие показатели - виды сельскохозяйственной деятельности и его состояния накануне реформы: «Разведение лучших пород рогатого скота не успешно, по недостатку степей и удобных для скотоводства мест. Однако в некоторых имениях оно улучшается породами тирольскою и холмогорскою. Лошади в губернии составляют 1/3 всего скота. Конных заводов 22. Коннозаводство в последнее время стало упадать. Шесть коннозаводчиков уменьшили свои заводы, а 8 вовсе их упразднили. Лошади из губернии продаются в др. губернии ежегодно до 4000. Из этого количества барышники евреи выгоняют в Киевскую и Могилёвскую губ. до 2000. Овец простых и тонкорунных 850000. Заводов тонкорунных овец испанской породы и мериносов до 40. Лес ценится высоко: мелкий хворост и кустарник от 80 до 100 руб., строевой старый дубовый - до 800 руб. серебром на сруб за десятину. лесопильных мельниц в губернии - 2. Кирпичных заводов в городах - 49, в уездах - 78; кафельных в городах - 7, в уездах - 2. Известковых в городах - 1, в уездах - 16. Садоводство несмотря на обилие садов в губернии не совершенствуется и падает. Лучшие фрукты из Корочанского у. Два важных источника богатства в Курской губ. - хлеб и пенька, которая с давних времён была исключительным предметом деятельности торговых людей. Конопляное семя и белгородский мел отправляется в Одессу на Кавказ, а мел даже в северные губернии» [17, с.15-20].

Представленные выше примеры развитых средних и крупных имений XVIII- 2-й пол. XIX в., где усадьба выступала руководящим и научным центром управления достаточно большого и разнообразного хозяйства, имели развитие и в дальнейшем, став фундаментом, основой для создания образцовых усадебных хозяйств в сложное пореформенное время.

Образцовые хозяйства являлись примером и помощью в развитии соседних имений. Широкое внедрение научного опыта породило множество видов хозяйствования и разнообразие сортовой и племенной палитры во всех его отраслях.

В целом, исследование проявляет не менее полусотни развитых хозяйств этого периода, которые можно назвать образцовыми усадьбами.

К первой четверти XIX в. они равномерно были распределены по территории Курской губернии, и выступали центрами активации и возрождения культурной и хозяйственной жизни провинциальной усадьбы, занимая ведущее место в Российской действительности в различных экономических условиях.

Заключение

Яркой отличительной особенностью Курского края стало его лидирующее положение по количеству и распространению образцовых усадебных хозяйств, являвшихся передовым примером устройства доходного имения.

Дореволюционные документы и исследования помогают выявить в Курской губернии значительное число преуспевающих хозяйств, которые принадлежали ко всем категориям владений - мелким, средним и крупным.

На рубеже XIX-XX вв. в Курской губернии их было более ста. Большинство образцовых хозяйств пореформенного времени выросли на фундаменте крупных и образцовых дворянских имений XVIII - первой половины XIX вв., опыт и хозяйственная база которых явилась основой их преемников – почти все из известных нам примеров попадают в круг образцовых усадеб пореформенного времени.

Из исследования видно, что основной тип образцовых усадеб Курской губернии – сельскохозяйственно-промышленный. Как уже отмечалось, плодородная земля и благоприятный климат позволяли землевладельцам заниматься самыми разнообразными видами сельского хозяйства, и добиваться довольно высоких результатов. Поэтому каркас образцового имения чаще всего составляли все основные отрасли: полеводство, плодоводство, животноводство, лесоводство и переработка продуктов сельского хозяйства. Которые были развиты не в равной степени.

Усадебное имение второй половины XVIII в. хлебопашенное, окружённое преимущественно полями. Основное занятие было полеводство. Безусловно к образцовым хозяйствам можно отнести все усадьбы с развитым промышленным комплексом. Изучая статистику промышленности можно представить примерный количественный состав образцовых усадеб.

Образцовые хозяйства являлись примером и помощью в развитии соседних имений. Широкое внедрение научного опыта породило множество видов хозяйствования и разнообразие сортовой и племенной палитры во всех его отраслях.

Примеры развитых средних и крупных имений XVIII- 2-й пол. XIX в., где усадьба выступала руководящим и научным центром управления достаточно большого и разнообразного хозяйства, имели развитие и в дальнейшем, став фундаментом, основой для создания образцовых усадебных хозяйств в сложное пореформенное время.

Образцовые хозяйства являлись примером и помощью в развитии соседних имений. Широкое внедрение научного опыта породило множество видов хозяйствования и разнообразие сортовой и племенной палитры во всех его отраслях.

В целом исследование проявляет не менее полусотни развитых хозяйств этого периода, которые можно назвать образцовыми усадьбами.

К первой четверти XIX в. они равномерно были распределены по территории Курской губернии, и выступали центрами активации и возрождения культурной и хозяйственной жизни провинциальной усадьбы, занимая ведущее место в Российской действительности в различных экономических условиях.

Благодарности

Исследование выполнено за счет средств Государственной программы Российской Федерации «Развитие науки и технологий» на 2013-2020 годы в рамках Плана фундаментальных научных исследований Минстроя России и РААСН, тема 1.2.2.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Борисов В. Хозяйство при с. Ивня Троицкое тож: Имение В.Н. Карамзина, Курской губернии, Обоянского уезда // Сельское хозяйство и лесоводство. 1878. июль. С.219-240.
2. Краткие справочные сведения о некоторых русских хозяйствах. Центральные земледельческие губернии. СПб.: Тип. В. Киршбаума, 1900. Изд. 2. В.1. [1], VIII. 476с.
3. Холодова Е.В. Порекорформенные усадьбы Курской губернии 1861-1917 годов. Орёл: ООО «Новое время». 392 с.
4. Плохинский М. Гетман Мазепа в роли великорусского помещика: Сборник Харьковского историко-филологического общества. Харьков: Типография К.Счастни, 1892. 53 с.
5. Фёдоров С.И. Марьино князей Барятинских. Курск: Крона, 1994. – 224 с.
6. РГВИА (Российский государственный Военно-исторический архив) Ф.ВУА. Д.18800. «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.

7. ГНИМА. Государственный научно-исторический музей архитектуры им. А.Щусева, г. Москва. Р-5931. План усадьбы в селе Ивановском. 1790 г.
8. Охрименко, И.Г.. Очерки истории Борисовского района / И.Г. Охрименко. [Машинописный текст на правах рукописи]. Фонды МБУК «Борисовский историко-краеведческий музей».
9. Домик Петра Великого в слободе Борисовке // Труды Курского губернского статистического комитета. Курск: Типография Губернского правления, 1863. С. 579-581.
10. РГИА. Российский государственный исторический архив. Ф.1088, ОП.6, Д.1255. Дело о постройке шатра в сл. Борисовке над домиком, в котором граф Б.П. Шереметев принимал Петра I. 1844-1845 гг.
11. Шереметев С.Д. Богородицкий Тихвинский монастырь Курской губернии, основанный фельдмаршалом гр. Б.П. Шереметевым 1713-1913. М.: Самодельная типография, 1914. С.215-217.
12. Из истории Курского края. Сборник документов и материалов / Сост. Ф.Ф. Лаппо, В.Г. Плющев, С.Г. Поскребышева, А.С. Травина. Воронеж: Центрально-Чернозёмное книжное изд-во, 1965. 408 с.
13. Знаменитые россияне XVIII-XIX веков. Биографии и портреты. СПб., 1996. - С.869-870.
14. Зябловский Е. Землеописание Российской Империи для всех состояний, Санкт-Петербургского Педагогического Института Ординарного Профессора Евдокима Зябловского. СПб.: Тип. Ф. Дрехслера, 1810. - Ч.V. - 509 с.
15. Лаппо Ф.И. Дневник курского помещика И.П. Анненкова как исторический источник // Документы по истории XVIII века. М.: Изд. Академии наук СССР, 1957. Т.5. С.661-676.
16. РГВИА. Ф.ВУА. Д.18801. Описание Курского наместничества вообще и порознь всякого города и уезда, с планами города и картами уезда, сочинённое в 1775 году курским губернским землемером и поручиком Иваном Башиловым. Л.1-173 об.
17. Труды Курского Губернского Статистического Комитета. Курск: Тип. Губ. Правления, 1863. В.I. - 325 с.

REFERENCES

1. Borisov V. Khozyaystvo pri s. Ivnya Troitskoye tozh: Imeniye V.N. Karamzina, Kurskoy gubernii, Oboyanskogo uyezda [Economy in Ivnya the identity Trinity: the Estate of V. N. Karamzin, the province of Kursk, Oboyan district]. *Sel'skoye khozyaystvo i lesovodstvo*. 1878. July. Pp.219-240.
2. Kratiye spravochnyye svedeniya o nekotorykh russkikh khozyaystvakh. Tsentral'nyye zemledel'cheskiye gubernii [Brief reference information about some Russian farms. Central agricultural provinces]. Saint Peterburg: Publishing V. Kirshbaum, 1900. Izd. 2. V.1. [1], VIII. - 476 p.
3. Kholodova E.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.
4. 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 the Kharkov Historical and Philological Society]. Khar'kov: Publishing K.Schastni, 1892. 53 p.
5. Fedorov S.I. Mar'ino knyazey Baryatinskikh [Maryino of the princes Baryatinsky]. Kursk: Krona, 1994. - 224 p.
6. RGVIA (Rossiyskiy gosudarstvennyy Voenno-istoricheskiy arkhiv) F.VUA. D.18800. "Topograficheskoye opisaniye Kurskogo namestnichestva po minuvshy 3-y i nyneshney 4-y revizii, sochineno tschchaniyem seya pravi-telem gospodinom Zubovym v 1784-m godu". D.18800. [RGVIA (Russian State Military Historical Archive) F.VUA. D.18800. "The topographical description of Kursk governorship in the past 3rd and current 4th revisions was composed by the careful sowing of the governor by Mr. Zubov in 1784." - D.18800]
7. ГНИМА. Gosudarstvennyy nauchno-istoricheskiy muzey arkhitektury im. A.Shchuseva, g. Moskva. R-5931. Plan usad'by v sele Ivanovskom. 1790 g. [GNIMA. State Scientific and Historical Museum of Architecture named after A. Shchuseva, Moscow. P-5931. The plan of the estate in the village of Ivanovsky. 1790]
8. Okhrimenko, I.G.. Ocherki istorii Borisovskogo rayona [Essays on the history of the Borisov district]. [Type-written text as manuscript]. Funds MБУК "Borisov Museum of History and Local Lore".
9. 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: Printing house of the Provincial Government]. Kursk: Publ. Gubernskogo pravleniya, 1863. Pp. 579-581.
10. RГIA. Rossiyskiy gosudarstvennyy istoricheskiy arkhiv. F.1088, ОП.6, Д.1255. Delo o postroyke shatra v sl. Borisovke nad domikom, v kotorom graf B.P. Sheremetev prinimal Petra I. 1844-1845 gg [RGIA. Russian State Historical Archive. F.1088, ОП.6, Д.1255. The case of the construction of the tent in the village. Borisovka over the house in which Count B.P. Sheremetev took Peter I. 1844-1845].
11. Sheremetev S.D. Bogoroditskiy Tikhvinskiy monastyr' Kurskoy gubernii, osnovanny fel'dmarsha-lom gr. B.P. Sheremetevym 1713-1913 [Bogoroditsky Tikhvin monastery of the Kursk province, founded by field marshal-scrap gr. B.P. Sheremetev 1713-1913]. Moscow: Samodel'naya tipografiya, 1914. Pp. 215-217.

12. Iz istorii Kurskogo kraia. Sbornik dokumentov i materialov [From the history of the Kursk region. Collection of documents and materials]. Compiled by F.F. Lappo, V.G. Plyushcheyev, S.G. Poskrebysheva, A.S. Travina. Voronezh: Tsentral'no-Chernozomnoye knizhnoye izd-vo, 1965. 408 p.

13. Znamenityye rossiyanе XVIII-XIX vekov. Biografii i portrety [Famous Russians of the XVIII-XIX centuries. Biographies and portraits]. Saint Petersburg, 1996. Pp. 869-870.

14. Zyablovskiy Ye. Zemleopisaniye Rossiyskoy Imperii dlya vsekh sostoyaniy, Sankt-Peterburgskogo Pedagogicheskogo Instituta Ordinarnogo Professora Yevdokima Zyablovskogo [Geography of the Russian Empire for all states, St. Petersburg Pedagogical Institute of the Ordinary Professor Evdokim Zyablovsky]. Saint Petersburg: Publ. F. Drekhslera, 1810. CH.V. 509 p

15. Lappo F.I. Dnevnik kurskogo pomeshchika I.P. Annenkova kak istoricheskiy istochnik [Diary of the Kursk landowner I.P. Annenkova as a historical source]. Dokumenty po istorii XVIII veka. [Documents on the history of the XVIII century]. Moscow: Publ. Akademii nauk SSSR, 1957. T.5. Pp. 661-676.

16. RGVIA. F.VUA. D.18801. Opisanіye Kurskogo namestnichestva voobshche i porozn' vsyakogo goroda i uyezda, s planami goroda i kartami uyezda, sochinonnoye v 1775 godu kurskim gubernskim zemlemerom i poruchikom Ivanom Bashilovym. L.1-173 ob. [RGVIA. F.WUA. D.18801. Description of Kursk governorship in general and separately of any city and county, with city plans and county maps, composed in 1775 by the Kursk provincial surveyor and lieutenant Ivan Bashilov. L.1-173].

17. Trudy Kurskogo Gubernskogo Statisticheskogo Komiteta [Proceedings of the Kursk Provincial Statistical Committee]. Kursk: Publ. Gub. Pravleniya, 1863. V.I. 325 p.

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 РААСН; 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 сверху – 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 прислать в редакцию повторно, приложив письмо с ответами на замечания рецензента. Доработанный вариант статьи рецензируется и рассматривается редакционной коллегией вновь. Датой представления материала считается дата поступления в редакцию окончательного варианта исправленной статьи.
- Аннотации всех публикуемых материалов, ключевые слова, информация об авторах, списки литературы будут находиться в свободном доступе на сайте соответствующего журнала и на сайте Российской научной электронной библиотеки – РУНЭБ (Российский индекс научного цитирования).

В тексте статьи не рекомендуется применять:

- обороты разговорной речи, техницизмы, профессионализмы;
- для одного и того же понятия различные научные термины, близкие по смыслу (синонимы), а также иностранные слова и термины при наличии равнозначных слов и терминов в русском языке;
- произвольные словообразования;
- сокращения слов, кроме установленных правилами русской орфографии, соответствующими стандартами.
- Сокращения и аббревиатуры должны расшифровываться по месту первого упоминания (вхождения) в тексте статьи.

Обязательные элементы:

- **заглавие (на русском и английском языке)** публикуемого материала должно быть точным и емким, слова, входящие в заглавие, должны быть ясными сами по себе, а не только в контексте; следует избегать сложных синтаксических конструкций, новых словообразований и терминов, а также слов узкопрофессионального и местного значения;
- **аннотация (на русском и английском языке)** 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 (920) 812-59-09

<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 С.Ю. Савин
Компьютерная верстка С.Ю. Савин

Подписано в печать 09.07.2019 г.
Дата выхода в свет 16.07.2019 г.
Формат 70×108 1/16. Печ. л. 8,375.
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.