ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ. ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

УДК 624.012

DOI: 10.22227/1997–0935.2018.3.309-321

ЧИСЛЕННЫЕ И НАТУРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПРЕДНАПРЯЖЕННЫХ СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК

Ф.С. Замалиев

*Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КазГАСУ),
420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1*

Предмет исследования: на основе компьютерного моделирования и натуральных экспериментов исследовано напряженно-деформированное состояние преднапряженных сталежелезобетонных балок.

Исследованы балки с расположением напряженной арматуры вдоль полки двутавра и по огибающей эпюре изгибающего момента. Приведены методика и результаты компьютерного моделирования работы сталежелезобетонных балок, состоящих из стального двутавра, анкеров, преднапряженной арматуры и бетона. Рассмотрены два варианта расположения преднапряженной арматуры. По данным численных исследований изготовлены натурные образцы моделей балок, проведены их испытания. Даны аналитические выражения для расчета сталежелезобетонных балок описанного сечения. Приводятся результаты расчетов, сравнения результатов численного и натурального экспериментов.

Цель исследования: выявление напряженно-деформированного состояния балок, эффективности расположения преднапряженной арматуры.

Материалы и методы: для натуральных экспериментов приняты стальные двутавры с заполнением боковых полостей бетоном, в качестве преднапряженной арматуры принята стержневая арматура, для преднапряжения использован динамометрический ключ. Для компьютерного моделирования использован пакет программ ANSYS.

Результаты: получены данные напряженно-деформированного состояния балок на основе компьютерного моделирования. Результаты использованы для изготовления натуральных образцов. Полученные результаты компьютерного моделирования сопоставлены с данными натуральных экспериментов.

Выводы: изучены особенности работы преднапряженных сталежелезобетонных балок по численному моделированию, натурным экспериментам и аналитическим расчетам. Предлагаемый метод расчета дает хорошую сходимость с экспериментальными данными.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сталежелезобетонная балка, преднапряжение, компьютерное моделирование, натурные эксперименты, напряжения, прогибы

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Замалиев Ф.С. Численные и натурные эксперименты преднапряженных сталежелезобетонных балок // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. Вып. 3 (114). С. 309–321.

NUMERICAL AND FULL-SCALE EXPERIMENTS OF PRESTRESSED HYBRID REINFORCED CONCRETE-STEEL BEAMS

F.S. Zamaliev

*Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE),
1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation*

Recently, civil buildings are increasingly using composite reinforced concrete and steel (RCS) structures (beams, slabs, columns). Prestress in RCS structures has not yet found such a spread as, for example, in reinforced concrete and metal structures, although its use is known from technical sources. The present article is devoted to the evaluation of the stress-strain state of prestressed RCS beams. The procedure and results of computer modeling of the response of composite RCS beams consisting of steel I-beam, anchors, prestressed reinforcement and concrete are given. Two variants of arrangement of prestressed reinforcement are considered. According to the data of numerical studies, full-scale samples of beam models were made and their tests were carried out. The article presents the test procedure, the results of experimental studies in the form of graphs, diagrams. At the end of the article, analytical expressions are given for analysis of composite RCS beams of the described cross-section. Results of calculations, comparison of the results of numerical and full-scale experiments are presented.

Subject: based on computer simulation and full-scale experiments, the stress-strain state of prestressed composite beams was investigated. Beams were studied with the arrangement of prestressed reinforcement along the I-beam flanges and along the envelope of the bending moment diagram.

Research objectives: analyze the stress-strain state of beams, identify effectiveness of the arrangement of prestressed reinforcement.

Materials and methods: for full-scale experiments, steel I-beams with lateral cavities filled with concrete were adopted, rod reinforcement was used as a prestressed reinforcement, and a dynamometric key was used for prestress (preload). ANSYS software package was used for computer modeling.

Results: the computer simulation data of the stress-strain state of beams is obtained. The results are used for making full-scale samples. The obtained results of computer simulation are compared with the data of full-scale experiments.

Conclusions: essential features of the response of prestressed composite beams are studied from numerical modeling, in-situ experiments and analytical calculations. The proposed calculation method gives a good match with the experimental data.

KEY WORDS: reinforced concrete and steel (RCS) beam, prestressing, computer simulation, full-scale experiments, stresses, deflections

FOR CITATION: Zamaliev F.S. Chislennyye i naturnyye eksperimenty prednapryazhennykh stalezhelezobetonnykh balok [Numerical and full-scale experiments of prestressed hybrid reinforced concrete-steel beams]. Vestnik MGSU [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2018, vol. 13, issue 3 (114), pp. 309–321.

ВВЕДЕНИЕ

Преднапряжение нашло применение в железобетонных и металлических конструкциях, его используют как в балках, плитах, так и в фермах. В России применение предварительно напряженной арматуры в железобетоне было принято в 1928 г., впервые индустриально такие конструкции были использованы в 1936 г. при изготовлении опор канатной сети закавказских железных дорог. В металлических конструкциях преднапряжение уменьшает деформативность и позволяет экономить металл, в железобетоне позволяет избавиться от ряда основных его недостатков: обеспечивает жесткость, трещиностойкость, снижает вес и, как следствие, повышает экономичность, возможность рационального использования высокопрочной арматуры.

Расчет предварительно напряженных конструкций на эксплуатационные нагрузки требует определения напряженно-деформированного состояния от внешних воздействий. При выявлении действительного напряженно-деформированного состояния необходимо учитывать изменения свойств бетона во времени (ползучесть и длительный характер усадки).

Умение правильно учитывать деформативность применяемых материалов при проектировании, особенно — составных конструкций, необходимо для создания экономичных и надежных в эксплуатации конструкций.

При изготовлении преднапряженных железобетонных балок в основном применяют натяжение арматуры на упоры или на бетон. В сталежелезобетонных конструкциях благодаря наличию в составе сечения жесткого стального профиля натяжение арматуры производят на сам профиль, т.е. образуется стальная преднапряженная балка, затем бетонируются боковые полости, после приобретения бетоном гостированной прочности, отпуская натяжение арматуры, обжимается бетон.

Оценке напряженно-деформированного состояния преднапряженных сталежелезобетонных балок от действия эксплуатационных нагрузок посвящена данная статья.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В сталежелезобетонных конструкциях преднапряжение пока не столь распространенное явление, в отличие от металлических и железобетонных конструкций [1, 2], хотя известно использование преднапряженных балок сталежелезобетонного сечения в Великобритании при строительстве виадуков и пешеходных мостов. Применение преднапряжения в сталежелезобетонных конструкциях по сравнению с известными преднапряженными металлическими и железобетонными балками дает ряд преимуществ: исчезают «висячие» часто за пределами сечения металлической балки затяжки, а по сравнению с железобетонными балками упрощаются анкерующие узлы затяжек в торцах балки, так как они размещаются в опорных элементах самой металлической балки. Труды исследователей в основном посвящены выявлению напряженно-деформированного состояния сталежелезобетонных конструкций без преднапряжения и использованию работы материалов (бетона и стали) в упругой и упругопластической стадиях [3–15]¹. У нас в стране имеются новые технические решения в виде патентов на преднапряженные сталежелезобетонные балки [16–18].

КОНСТРУКЦИИ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для наиболее быстрого выявления напряженно-деформированного состояния сталежелезобетонных конструкций многие исследователи используют численные эксперименты на основе пакета программ. Однако, несмотря на временные и материальные затраты, экспериментальные исследования дают результаты в условиях, наиболее близких к эксплуатационным условиям поведения конструкций под нагрузкой.

При численных исследованиях сталежелезобетонные балки моделировались на ПК ANSYS по схеме свободно опертой балки, нагруженной двумя

¹ BSI (2010) BS 5950-3.1.A1. Structural use of steelwork in buildings. Design in composite construction. Code of practice for design of simple and continuous composite beams.

сосредоточенными силами, как и в экспериментальных исследованиях.

Решение задачи программным комплексом осуществлялось в три этапа: на первом этапе создавалась конечно-элементная модель балки, на втором этапе осуществляется наложение на модель необходимых физических условий, которое состоит из таких шагов:

- задаются граничные условия;
- выбор типа анализа (статический, динамический и т.д.), выбор способа решения системы уравнений методом конечных элементов (МКЭ);
- решение системы уравнений методом МКЭ.

Третий этап (постпроцессинг) — анализ результатов расчета. Рассчитанные параметры (деформации, напряжения, перемещения и т.д.) представляются в виде картин, таблиц, анимации.

Построение геометрической модели реализуется элементом Geometry, геометрическая модель создается в модуле Space Claim или Design Modeler. При моделировании геометрии тела сталежелезобетонных балок использовались модели из AutoCAD.

Балки имели параметры, использованные в экспериментальных исследованиях: стальная часть из двутавра № 18 длиной 200 см, поперечная арматура Ø6 A240 с шагом 100 мм у опор и 200 мм в середине балки, анкера приваренные к стенкам двутавра Ø10, преднапряженная арматура Ø10, бетон класса B20.

Преднапряжение в балках создавалось методом Bolt Pretention (рис. 1). Картина напряжений в бетоне по результатам численных исследований дана на рис. 2.

Рис. 1. Преднапряжения балки с арматурой по огибающей эпюре моментов

Рис. 2. Мозаика напряжений сталежелезобетонной балки

Используя результаты численных исследований изготовили модели сталежелезобетонных преднапряженных балок. Для моделей использованы: двутавр из стали С245, арматура из А500С и В500, класс бетона по расчету В20. Предварительное напряжение создавалось с помощью динамометрического ключа, значение преднапряжения принималось по расчету.

Геометрические размеры диктовались возможностями испытательного пресса лаборатории, приняты двутавры № 18 длиной 2000 мм, боковые полости которых заполнены бетоном. Были изготовлены две балки с прямой преднапряженной арматурой и две — с арматурой по огибающей эпюре моментов (рис. 3, 4).

Для исключения влияния усадки на начальное напряженно-деформированное состояние опытных образцов испытания моделей балок были начаты после их хранения более 28 сут в лаборатории при нормальной влажности и температуре.

Балки испытывались свободно опертыми двумя сосредоточенными силами в средней части пролета, приложенными на расстоянии 400 мм от вертикальной оси балки. Расчетный пролет балки 1900 мм. Нагрузка передавалась посредством гидравлической системы пресса ИПС-200 на изгибаемую сталежелезобетонную балку с помощью

металлической траверсы в двух точках: в одной — через подвижный стальной каток диаметром 20 мм, а в другой — через неподвижный стальной каток того же диаметра. Для исключения закручивания балки во время испытания между металлической траверсой и рычагом испытательной установки был установлен стальной каток диаметром 50 мм.

Равномерное распределение усилия по ширине сечения, что особенно важно в составных конструкциях, обеспечивалось постановкой жестких металлических прокладок.

В процессе испытания измерялись продольные деформации бетона и стали балки, а также прогибы и ширина раскрытия трещин. Деформации (бетон) и (сталь) фиксировались тензодатчиками сопротивления с базами 50 и 20 мм соответственно через электронную аппаратуру АИД-4 с магазином переключателей. Измерение прогибов в зоне чистого изгиба на каждой ступени нагружения производилось штангенциркулем ценой деления 0,02 мм, снабженным специальной пятой для его установки в вертикальное положение. Осадки опор измерялись при помощи индикаторов часового типа с ценой деления 0,01 мм.

Общий вид и схема испытания сталежелезобетонных балок, схема размещения тензодатчиков сопротивления и измерительных приборов приведены на рис. 5 и 6.

Рис. 3. Сталежелезобетонная балка с прямолинейной преднапряженной арматурой

Рис. 4. Сталежелезобетонная балка с арматурой по огибающей эпюре моментов

Рис. 5. Общий вид испытаний балок

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Опытные образцы балок испытывали однократной кратковременной статической нагрузкой до физического разрушения с целью установления характера разрушения и закономерностей развития

прогибов, деформаций бетона и стали при их совместном деформировании в составе единой конструкции.

Во всех случаях опытные образцы сталежелезобетонных балок разрушались по нормальному сечению в зоне чистого изгиба из-за местного раз-

Рис. 6. Схема расположения тензорезисторов и приборов

Рис. 7. Общий вид балок с характером разрушения Б-1, Б-2, Б-3, Б-4

дробления бетона сжатой зоны плиты вследствие развития пластических деформаций в средней части стальной балки (рис. 8).

Первые трещины бокового бетона, которым были защищены стальные двутавровые балки, появились при нагрузке $0,85P_{\text{раз}}$, где $P_{\text{раз}}$ — разрушающая нагрузка, как правило, в сечениях под точками приложения нагрузки и имели незначительные раскрытия.

Развитие нормальных трещин (около 1 мм) в теле бокового бетона главным образом наблюдалось перед разрушением образца. Общий вид, характер разрушения и трещинообразование балок приведен на рис. 8.

На рис. 8–13 приведены эпюры распределения средних напряжений по высоте сечения балок на различных этапах нагружения.

На начальных этапах нагружения характер распределения напряжений в нижнем поясе двутавровой балки подчиняется линейному закону. Такое распределение продолжается вплоть до нагрузки $0,9P_{\text{раз}}$.

В зоне чистого изгиба до нагрузки $0,9P_{\text{раз}}$ наблюдается прямолинейный характер развития прогибов. При нагрузках больших чем $0,9P_{\text{раз}}$, эпюра прогибов принимает криволинейный вид, в дальнейшем рост развития прогибов наблюдается при неизменной нагрузке.

По данным натурных испытаний в балке с криволинейной арматурой по сравнению с балкой с прямолинейной арматурой несущая способность больше на 5...8 %, также при аналогичных нагружениях ее прогибы меньше на 4...9 %.

Рис. 8. Развитие напряжений в нормальном сечении балки с прямолинейной арматурой в бетонной части

Рис. 9. Развитие напряжений в нормальном сечении балки с криволинейной арматурой в бетонной части

Рис. 10. Развитие напряжений в середине пролета балки с прямолинейной арматурой в двухтавровой части

Рис. 11. Развитие напряжений в середине пролета балки с криволинейной арматурой в двухтавровой части

Рис. 12. Сравнение напряжений в нижнем поясе двутавра в балке с прямолинейной арматурой

Рис. 13. Сравнение прогибов (А-балка с прямолинейной арматурой, Б-балка с криволинейной арматурой)

Проведено сравнение результатов численного эксперимента с данными натурных экспериментов. Расхождение результатов численных экспериментов от натурных составляет:

- по напряжениям — до 15 %;
- по прогибам составляет — до 15 %;
- по несущей способности — 10...15 %.

Для аналитического расчета преднапряженных сталежелезобетонных балок использован метод расчета железобетонных преднапряженных балок [19], приспособленный к геометрическим и физическим параметрам сталежелезобетонного сечения.

Если арматура натягивается на упоры, равнодействующая сил натяжения указанной арматуры после проявления первых потерь равна

$$N = N_0 + N'_0 = \sigma_0 A_a + \sigma'_0 A'_a. \quad (1)$$

Сила N приложена на расстоянии e_n от центра тяжести приведенного сечения

$$e_n = \frac{N_0 y'_n - N'_0 y'_n}{N}. \quad (2)$$

Отпуск арматуры после бетонирования и приобретения бетоном требуемой прочности сопрово-

ждается внецентренным обжатием сечения. Напряжения в бетоне на любом уровне определяются по формуле

$$\sigma_b^* = -\frac{N}{A_n} \left(1 \pm \frac{e_n y_n^*}{r_n^2} \right), \quad (3)$$

где $r_n^2 = I_n / A_n$; A_n и I_n — площадь приведенного сечения стержня и момент инерции указанного сечения относительно его центра тяжести; y_n — расстояние от центра тяжести приведенного сечения до рассматриваемого уровня.

Если волокна бетона, в которых определяются напряжения, расположены ниже центра тяжести приведенного сечения, в скобках формулы ставится знак «плюс», если выше — «минус».

Начальные напряжения в нижней и верхней арматуре после упругого обжатия сечения равны

$$\sigma_H = \sigma_0 + n\sigma_b; \quad \sigma'_H = \sigma'_0 + n\sigma_b. \quad (4)$$

При натяжении арматуры на бетон контролируемые напряжения в арматуре A и A' принимаются равными соответственно σ_H и σ'_H . В этом случае получим

$$N = N_H + N'_H = \sigma_H A_a + \sigma'_H A'_a. \quad (5)$$

Сила N приложена на расстоянии e_b от центра тяжести бетонного сечения:

$$e_b = \frac{N_H y_b - N'_H y'_b}{N}. \quad (6)$$

Напряжения в бетоне на любом уровне определяются по формуле

$$\sigma_b^* = -\frac{N}{A_b} \left(1 \pm \frac{e_b y_b^*}{r_b^2} \right). \quad (7)$$

Предварительное обжатие армированного стержня сопровождается уменьшением напряжений в бетоне и арматуре вследствие ползучести бетона.

Эффект влияния ползучести на рассматриваемом среднем участке стержня будет одинаков как для случая натяжения на упоры, так и для случая натяжения на бетон (независимо от того, восстанавливается сцепление между арматурой и бетоном путем инъекции раствора или нет). Следовательно, напряжения, вызываемые ползучестью бетона, для случаев натяжения на упоры и на бетон определяются по одним и тем же формулам.

Обозначим напряжения в нижней и верхней арматуре, вызываемые ползучестью бетона, через σ_{an} и σ'_{an} , в бетоне на уровне арматуры — через σ_{bn} и σ'_{bn} , бетон будет находиться под действием изменяющихся во времени внутренних сил:

$$N_{bn} = (\sigma_{bn} y'_b + \sigma'_{bn} y_b) \frac{A_b}{h}, \quad (8)$$

$$N_{an} = \sigma_{an} A_a;$$

$$M_{bn} = (\sigma'_{bn} - \sigma_{bn}) \frac{I_b}{h};$$

$$N'_{an} = \sigma'_{an} A'_a. \quad (9)$$

Рассматривая эти силы как некоторые дополнительные, нетрудно доказать, что они должны взаимно уравновешиваться и удовлетворять следующим условиям:

$$N_{an} + N_{an} + N'_{an} = 0;$$

$$\frac{\sigma_{an}}{E_a} = \frac{\sigma_b}{E_b} \varphi_t + \frac{\sigma_{bn}}{E_b} \gamma, \quad (10)$$

$$M_{bn} - N_{an} y_b + N'_{an} y'_b = 0;$$

$$\frac{\sigma'_{an}}{E_a} = \frac{\sigma'_b}{E_b} \varphi_t + \frac{\sigma'_{bn}}{E_b} \gamma. \quad (11)$$

Совместное решение уравнений приводит к следующим выражениям:

в нижней и верхней арматуре

$$\sigma_{an} = n(\sigma_b a_1 - \sigma'_b a_2) \frac{\varphi_t}{a_s};$$

$$\sigma'_{an} = n(\sigma'_b a_1 - \sigma_b a_2) \frac{\varphi_t}{a_s}, \quad (12)$$

в бетоне на любом уровне

$$\sigma_{bn}^* = -\left(1 \pm \frac{y_b y_b^*}{r_b^2} \right) - \sigma'_{an} \mu' \left(1 \mp \frac{y'_b y_b^*}{r_b^2} \right). \quad (13)$$

В целях автоматизации расчетов исследуемые балки рассчитывались при помощи созданной программы в среде Microsoft Excel. Сначала исследуемые балки рассчитывались без бетонной части, как стальная двутавровая балка с затяжкой. На этой стадии подбираются исходя из нагрузок необходимые двутавр, арматура. Затем ведется расчет по определению усилия самонапряжения, усилий в затяжке, напряжений в верхней и нижней поясах двутавра, деформаций от обратного выгиба. Потом ведется учет бетона в балке. Расчет по этой стадии ведется по формулам, приведенным выше.

Результаты аналитического расчета с данными, полученными в программном комплексе ANSYS, расходятся:

- прогибы в стадии предварительного напряжения балки — до 8 %;
- напряжения в стадии предварительного напряжения балки — до 5 %;
- прогибы в стадии нагружения — до 20 %;
- напряжения в стадии нагружения — до 10 %.

Предлагаемые методы расчета дают достаточно хорошую сходимость с экспериментальными данными в сравнении с существующими методами расчета сталежелезобетонных изгибаемых элементов.

ВЫВОДЫ

1. Изучены особенности напряженно-деформированного состояния преднапряженных сталежелезобетонных изгибаемых элементов при действии кратковременной статической нагрузки с учетом физической нелинейности бетона и стали.

2. Выполнено сопоставление результатов оценки прочности по численным исследованиям, проверка точности предложенных методов расчета прочности нормальных сечений путем сравнения результатов с данными экспериментов на крупномасштабных моделях.

3. Выполнен расчет на программном комплексе ANSYS Workbench преднапряженных сталежелезобетонных балок двух видов, позволивший выявить напряженно-деформированное состояние, этапы развития пластических деформаций в стальной балке, железобетонной части, а также арматуре.

4. Натурные эксперименты показали, что напряжения в бетоне прорабатываются в растянутой зоне до $0,4P_{\text{раз}}$. Затем напряжения в бетоне прорабатываются в сжатой зоне до $0,85P_{\text{раз}}$, до этого значения бетон и стальная часть работают совместно.

5. Проведено сравнение результатов по аналитическим формулам, данными численных экспериментов.

Результаты аналитического расчета с данными, полученными в программном комплексе ANSYS, расходятся:

- прогибы в стадии предварительного напряжения балки — до 8 %.
- напряжения в стадии предварительного напряжения балки — до 5 %.
- прогибы в стадии нагружения — до 20 %.
- напряжения в стадии нагружения — до 10 %.

6. Проведено сравнение результатов численного эксперимента с данными натурных экспериментов. Расхождение результатов численных экспериментов и натурных составило:

- по напряжениям — до 15 %.
- по прогибам — до 15 %.
- по несущей способности — 10...15 %.

Предлагаемые методы расчета дают достаточно хорошую сходимость с экспериментальными данными в сравнении с существующими методами расчета сталежелезобетонных изгибаемых элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кудинин Ю.И. Металлические конструкции. М. : Академия, 2011. С. 228–230.
2. Железобетонные и каменные конструкции / под ред. В.М. Бондаренко. М. : Высш. шк., 2011. 876 с.
3. Jonson R.P. Designers' guide to Eurocode 4: design of composite buildings, 2 ed. ICE Publishing; 2011.
4. Замалиев Ф.С. Учет нелинейных свойств материалов и податливости слоев при расчете прочности сталежелезобетонных перекрытий // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 5. С. 38–41.
5. Замалиев Ф.С. К расчету малоциклового выносливости сталежелезобетонных ребристых конструкций // Транспортное строительство. 2013. № 9. С. 8–10.
6. Замалиев Ф.С., Каюмов Р.А. К расчету сталежелезобетонного перекрытия как ортотропной плиты // Известия КазГАСУ. 2014. № 1 (27). С. 94–99.
7. Hadzalic E., Barucija K. Concrete shrinkage effects in composite beam // Construction of unique buildings and structures. 2014. No. 11 (26). Pp. 85–93.
8. Замалиев Ф.С., Мирсаянов И.Т. Расчет прочности сталежелезобетонных изгибаемых конструкций на основе аналитических диаграмм // Разработка и исследование металлических и деревянных конструкций: сб. науч. тр. 1999. С. 142–149.
9. Туснин А.Р. Перекрытия многоэтажных зданий со стальным каркасом // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 8. С. 10–14.
10. Айрумян Э.Л., Каменников Н.И., Румянцев И.А. особенности расчета монолитных плит сталежелезобетонных покрытий по профилированному стальному настилу // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 9. С. 21–26.
11. Туснин А.Р., Коляго А.А. Конструкция и работа сталежелезобетонного перекрытия с использованием сборных пустотных железобетонных плит // Современная наука и инновации. 2016. № 3. С. 141–147.
12. Champenoy D., Corfdir A., Corfdir P. Calculating the critical buckling force in compressed bottom flanges of steel-concrete composite bridges // European Journal of Environmental and Civil Engineering. 2014. No. 18 (3). Pp. 271–292.
13. Gholamhoseini A., Khanlou A., MacRae G. et al. An experimental study on strength and serviceability of reinforced and steel fibre reinforced concrete (SFRC) continuous composite slabs // Engineering Structures. 2016. No. 114 (1). Pp. 171–180.
14. Vasdravellis G., Uy B., Tan E.L., Kirkland B. Behaviour and design of composite beams subjected to sagging bending and axial compression. Original Research // Journal of Constructional Steel Research. 2015. No. 110. Pp. 29–39.

15. Астахов И.В., Кузнецов А.Ю., Морозова Д.В. Исследование работы сталежелезобетонных конструкций // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 3 (62). С. 15–20.

16. Описание полезной модели к пат. РФ 155488 МПК E04G 23/02 (2006.01). Преднапряженная сталебетонная балка / Ф.С. Замалиев, Э.Ф. Замалиев, Э.Ф. Замалиев; патентообл. Казанский государственный архитектурно-строительный университет, Ф.С. Замалиев; заявл. № 2015102306 26.01.2015; опубл. 10.10.2015. Бюл. № 28.

17. Описание полезной модели к пат. РФ 155802 МПК E04C 3/294 (2006.01). Сталебетонная преднапряженная балка / Ф.С. Замалиев, Э.Ф. Замалиев, Э.Ф. Замалиев; патентообл. Казанский госу-

дарственный архитектурно-строительный университет, Ф.С. Замалиев. Заявл. № 2014152337 23.12.2014; опубл. 20.10.15. Бюл. № 29.

18. Описание полезной модели к пат. РФ 165473 МПК E04C 3/294 (2006.01) Сталежелезобетонная преднапряженная балка / Ф.С. Замалиев, Э.Ф. Замалиев, А.Э. Замалиев; патентообл. Казанский государственный архитектурно-строительный университет, Ф.С. Замалиев, А.Э. Замалиев. Заявл. № 2016114023 11.04.2016; опубл. 20.10.2016. Бюл. № 29.

19. Голышев А.Б. Расчет предварительно напряженных железобетонных конструкций с учетом длительных процессов. М.: Стройиздат, 1964. 151 с.

Поступила в редакцию 27 октября 2017 г.

Принята в доработанном виде 6 февраля 2018 г.

Одобрена для публикации 27 февраля 2018 г.

ОБ АВТОРЕ: Замалиев Фарит Сахапович — кандидат технических наук, профессор, доцент кафедры металлических конструкций и испытания сооружений, Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КазГАСУ), 420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1, zamaliev49@mail.ru.

REFERENCES

1. Kudishin Yu.I. *Metallicheskie konstruksii* [Metal constructions]. Moscow, Akademiya, 2011, pp. 228–230. (In Russian)

2. Bondarenko V.M. ed. *Zhelezobetonnye i kamennye konstruksii* [Reinforced concrete and stone structures]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2011. 876 p. (In Russian)

3. Jonson R.P. *Designers' guide to Eurocode 4: design of composite buildings*, 2 ed. ICE Publishing; 2011.

4. Zamaliev F.S. Uchet nelineynykh svoystv materialov i podatlivosti sloev pri raschete prochnosti stalezhelezobetonnykh perekrytiy [Accounting for non-linear properties of the materials and pliability of the layers in the calculation of the strength of composite steel-concrete slabs]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering]. 2013, no. 5, pp. 38–41. (In Russian)

5. Zamaliev F.S. K raschetu malotsiklovoy vynoslivosti stalezhelezobetonnykh rebristyykh konstruksiy [Calculation of low-cycle endurance of composite ribbed structures]. *Transportnoe stroitel'stvo* [Transport construction]. 2013, no. 9, pp. 8–10. (In Russian)

6. Zamaliev F.S., Kayumov R.A. K raschetu stalezhelezobetonного perekrytiya kak ortotropnoy plity [On the calculation of the steel-concrete slab as orthotropic plate]. *Izvestiya KazGASU* [News of the Kazan State University of Architecture and Engineering]. 2014, no. 1 (27), pp. 94–99. (In Russian)

7. Hadzalic E., Barucija K. Concrete shrinkage effects in composite beam. *Construction of unique buildings and structures*. 2014, no. 11 (26), pp. 85–93.

8. Zamaliev F.S., Mirsayapov I.T. Raschet prochnosti stalezhelezobetonnykh izgibaemykh konstruksiy na osnove analiticheskikh diagramm [Strength calculation of steel reinforced concrete bent designs on the basis of analytical charts]. *Razrabotka i issledovanie metallicheskikh i derevyannykh konstruksiy: sb. nauch. tr.* [Development and research of metal and wooden structures: collection of scientific papers]. 1999, pp. 142–149. (In Russian)

9. Tusnin A.R. Perekrytiya mnogoetazhnykh zdaniy so stal'nyim karkasom [Overlapping multi-storey buildings with a steel frame]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering]. 2015, no. 8, pp. 10–14. (In Russian)

10. Ayrumyan E.L., Kamenshchikov N.I., Rumyantseva I.A. Osobennosti rascheta monolitnykh plit stalezhelezo-betonnykh pokrytiy po profilirovannomu stal'nomu nastilu [Features of calculation of monolithic slabs of steel-concrete-concrete coatings on profiled steel flooring]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering]. 2015, no. 9, pp. 21–26. (In Russian)

11. Tusnin A.R., Kolyago A.A. Konstruksiya i rabota stalezhelezobetonного perekrytiya s ispol'zovaniem sbornykh pustotnykh zhelezobeton-

nykh plit [Construction and work of steel-reinforced concrete overlap using prefabricated hollow reinforced concrete slabs]. *Sovremennaya nauka i innovatsii* [Modern science and innovations]. 2016, no. 3, pp. 141–147. (In Russian)

12. Champenoy D., Corfdir A., Corfdir P. Calculating the critical buckling force in compressed bottom flanges of steel-concrete composite bridges. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2014, no. 18 (3), pp. 271–292.

13. Gholamhoseini A., Khanlou A., MacRae G. et al. An experimental study on strength and serviceability of re-inforced and steel fibre reinforced concrete (SFRC) continuous composite slabs. *Engineering Structures*. 2016, no. 114 (1), pp. 171–180.

14. Vasdravellis G., Uy B., Tan E.L., Kirkland B. Behaviour and design of composite beams subjected to sagging bending and axial compression Original Research. *Journal of Constructional Steel Research*. 2015, no. 110, pp. 29–39.

15. Astakhov I.V., Kuznetsov A.Yu., Morozova D.V. Issledovanie raboty stalezhelezobetonnykh konstruktsey [Investigation of the work of steel-reinforced concrete structures]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [Bulletin of Civil Engineers]. 2017, no. 3 (62), pp. 15–20. (In Russian)

16. Zamaliev F.S., Zamaliev E.F., Zamaliev E.F. Description of useful model RF 155488 IPC E04G 23/02 (2006.01). *Prednapryazhennaya stalebetonnaya balka* [Prestressed reinforced concrete beam]; patentobl. Kazan State University of Architecture and Civil Engineering, Zamaliev F.S.; claim no. 2015102306 26.01.15; published 10.10.15, bul. no. 28. (In Russian)

17. Zamaliev F.S., Zamaliev E.F., Zamaliev E.F. Description of useful model RF 155802 IPC E04C 3/294 (2006.01) *Stalebetonnaya prednapryazhennaya balka* [Prestressed reinforced concrete beam]; patentobl. Kazan State University of Architecture and Civil Engineering, Zamaliev F.S.; claim no. 2014152337 23.12.14; published 20.10.15, bul. no. 29. (In Russian)

18. Zamaliev F.S., Zamaliev E.F., Zamaliev A.E. Description of useful model RF 165473 IPC E04C 3/294 (2006.01) *Stalezhelezobetonnyaya prednapryazhennaya balka* [Prestressed steel-concrete beam]; patentobl. Kazan State University of Architecture and Civil Engineering, Zamaliev F.S., Zamaliev A.E.; claim no. 2016114023 11.04.16; published 20.10.16, bul. no. 29.

19. Golyshev A.B. *Raschet predvaritel'no napryazhennykh zhelezobetonnykh konstruktsey s uchetom dlitel'nykh protsessov* [Calculation of prestressed reinforced concrete structures with consideration of long processes]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1964. 151 p. (In Russian)

Received October 27, 2017.

Adopted in revised form on February 6, 2018.

Approved for publication on February 27, 2018.

ABOUT THE AUTHOR: **Zamaliev Farit Sakhapovich** — Candidate of Technical Sciences, Professor, Associate Professor, Department of Metal Structures and Testing of Structures, **Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)**, 1 Zelenaya st., Kazan, 420043, Russian Federation, zamaliev49@mail.ru.