

УДК 624.012.

Замалиев Фарит Сахапович

кандидат технических наук, доцент

E-mail: zamaliev49@mail.ru

Биккинин Эмиль Гатович

аспирант

E-mail: bekkan91@gmail.com

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

Численные исследования самонапряжения сталежелезобетонной балки

Аннотация

Постановка задачи. Цель исследования – использовать внутреннее напряженно-деформированное состояние сталежелезобетонной балки для ее самонапряжения.

Поставлена задача на основе анализа напряженного состояния балки при усадке бетона путем введения временных опор в пролетной зоне балки создать преднапряженную балку на действие эксплуатационных нагрузок (при снятой временной опоре). Записать выражения внутренних усилий (моментов и других внутренних сил) для составного сечения, а также провести численные эксперименты по анализу процесса самонапряжения балки.

Результаты. Основные результаты исследований состоят в выявлении ряда принципиальных положений напряженно-деформированного состояния самонапряженной сталежелезобетонной балки и оценка численных результатов исследований балки без преднапряжения и самонапряжением.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в выявлении напряженного состояния балки составного сечения от усадки бетона и использование внутренних напряжений для самонапряжения балки. Полученные зависимости могут быть использованы при сооружении балочных конструкций составного сечения в новом строительстве и при восстановлении перекрытий зданий архитектурного наследия.

Ключевые слова: сталежелезобетонная балка, напряженное состояние, самонапряжение, усадка бетона, прогибы и напряжения.

Введение

Преднапряжение в железобетонных и металлических конструкциях нашло достойное применение, а в сталежелезобетонных конструкциях пока не нашло такого распространения, хотя из литературы известны эпизодические использования преднапряжения. Применение предварительного напряжения в металлических конструкциях позволяет уменьшить деформативность и расход металла, в железобетонных конструкциях, улучшает трещиностойкость, повышает эффективность использования высокопрочной арматуры.

Выявление напряженно-деформированного состояния сталежелезобетонной балки от усадки и использование его для самонапряжения является актуальной задачей. В статье приведены методика, модели расчета сталежелезобетонной балки, состоящего из стальных ребер-балок и бетонного верхнего пояса, даются аналитические выражения для расчета сталежелезобетонной балки описанного сечения.

В сталежелезобетонной балке, благодаря наличию жесткой стальной арматуры (двутавра), как основного составляющего сечения при усадке бетона возникает внутреннее напряженное состояние, а при подведении временных опор в пролетной зоне при твердении бетона фиксируется внутреннее напряженно-деформированное состояние, создавая самонапряженную конструкцию.

Обзор литературы

Труды исследователей в основном посвящены исследованиям сталежелезобетонных конструкций со стальным профнастилом или со сборными железобетонными плитами [1-4]. В зарубежных изданиях исследования посвящены

выявлению напряженного состояния и статических сил составных сталежелезобетонных сечений [5-9, 20]. В последние годы появились исследования отражающие поведение сталежелезобетонных преднапряженных конструкций [10-12].

Роспатентом выданы новые патенты на преднапряженные сталежелезобетонные балки [13-17]. В этих патентах реализованы как новые идеи непосредственного преднапряжения балок сталежелезобетонного сечения, так и идеи создания преднапряженных сталежелезобетонных изгибаемых балок через преднапряжение металлических профилей с последующим их обетонированием. Идея создания самонапряженной конструкции реализована в патенте РФ № 177801 путем применения бетона на расширяющемся цементе и неметаллической арматуры [18].

В балочных пролетных строениях мостов искусственное регулирование внутренних усилий для улучшения работоспособности сталежелезобетонных конструкций применяется с 60-х годов XX столетия, нашедшее отражение в диссертационных работах и статьях [19].

Исследования

Анализ теоретическим и экспериментальных исследований преднапряженных сталежелезобетонных балок [10,12], принципы регулирования внутренних усилий в сталежелезобетонных балочных строениях мостов [19] позволили выявить определенные закономерности в оценке их поведения и напряженно-деформированного состояния, а также нацелили на поиск рациональных путей создания самонапряженного сталежелезобетонного изгибаемого элемента. Самонапряженная сталежелезобетонная балка наряду с изолированным ее применением, с тем же успехом может использоваться как ребра сталежелезобетонного перекрытия.

Определяем внутренние силовые факторы в сталежелезобетонной балке, состоящей из бетонной плиты и стальной балки-ребра (рис. 1).

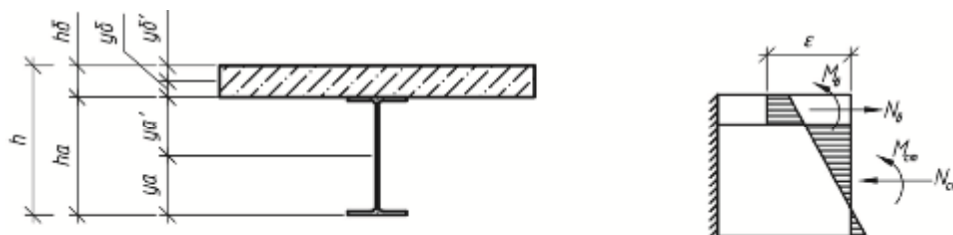


Рис. 1 Поперечное сечение, эпюра напряжений, внутренние усилия

Напряжения от усадки бетона:

$$s_{shr} = e_{shr} \frac{\epsilon_{shr}}{\epsilon_{stb,shr}} \frac{A_{st}}{A_{stb,shr}} + \frac{S_{shr}}{I_{stb,shr}} \times Z - v_{shr} \frac{\ddot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}} \tag{1}$$

Внутренние продольные усилия в бетоне и стальном профиле:

$$N_{\delta} = \int_{\delta} s_{\delta} \cdot y_{\delta} + s_{\delta} \times y_{\delta} \times \frac{\ddot{F}_{\delta}}{h_{\delta}} \tag{2}$$

$$N_a = \int_a s_a \cdot y_a + s_a \times y_a \times \frac{\ddot{F}_a}{h_a} \tag{3}$$

Внутренние моменты в бетонной плите и стальной балке:

$$M_{\delta} = (s_{\delta}' - s_{\delta}) \times \frac{I_{\delta}}{h_{\delta}} \tag{4}$$

$$M_a = (s_a' - s_a) \times \frac{I_a}{h_a} \tag{5}$$

Результирующий момент в составной балке от усадки бетона:

$$m = N_{\delta} \cdot y_{\delta} + M_{\delta} = N_a \cdot y_a + M_a \tag{6}$$

В середине пролета балки ставим временную опору-подпорку, которую снимаем после стабилизации процесса усадки бетона (примерно через две недели).

Решение уравнений при изменении статической схемы балки (превращение ее из однопролетной в двухпролетную) производим методом сил (рис. 2).

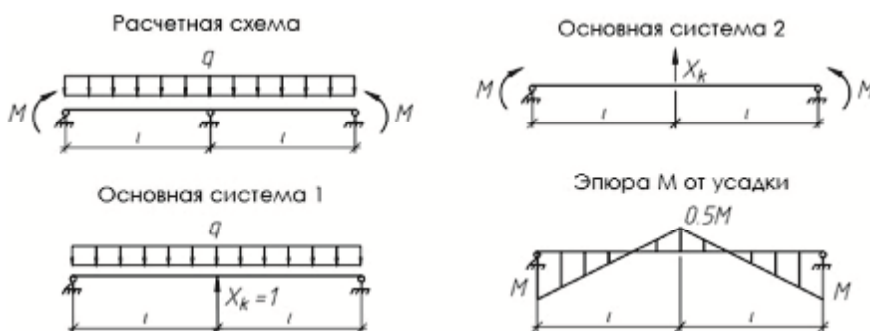


Рис. 2. Расчетные схемы и эпюра моментов

$$D_p^m = \delta \int_0^l \frac{M_i \times (M_p^{t_m} - M_p^{t_{m-1}})}{EI} dl + \delta N_i \times \frac{\partial}{\partial e_y} - \frac{(N_p^{t_m} - N_p^{t_{m-1}}) \delta}{EI} \frac{\partial}{\partial \theta} dl, \tag{7}$$

$$d_{ik}^{t_m} = \delta \int_0^l \frac{M_i \times M_k}{EI} dl, \tag{8}$$

$$\sum_{k=1}^m D X_k^{t_m} \times d_{ik}^{t_m} + D_p^m = 0. \tag{9}$$

Результирующая эпюра моментов от усадки бетона полки представлена на рис. 2 г. Постадийное распределение моментов от стадии монтажа стальной балки, укладки бетонной смеси, процесса усадки до стадии снятия временной опоры представлено на рис. 3.

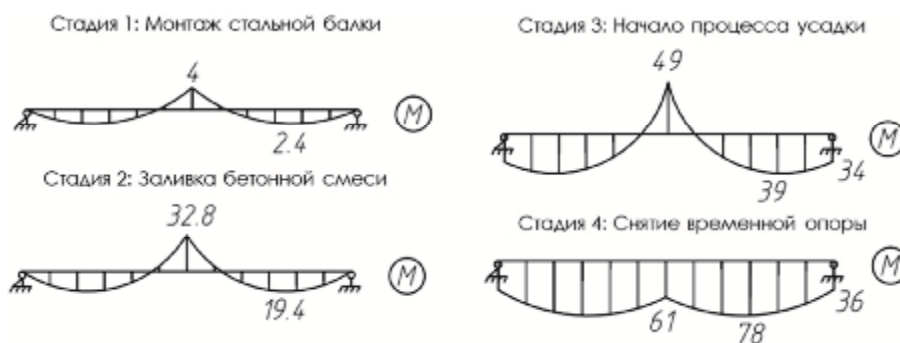


Рис. 3. Постадийное распределение моментов

Для оценки результатов аналитического расчета на основе метода сил выполнены численные исследования в расчетном комплексе Midas Civil 2018, позволяющий моделировать объемные усадочные явления в составе сталежелезобетонных конструкций. Решение поставленной задачи в данной программе осуществляется в несколько этапов: 1) Устанавливается тип решаемой задачи (МДТТ) с настройкой программы под диаграммы деформирования принятых материалов; 2) Задаются типы конечного элемента основной СТЖБ балки и временной средней опоры; 3) Задаются свойства бетона, зависящие от времени (ползучесть, усадка) согласно рекомендациям НИИЖБ Госстроя СССР; 4) Моделируются постадийный монтаж комбинированной балки с включением в работу бетонной части и снятием временной опоры после окончания усадочных процессов.

Выполненные численные исследования на базе программного комплекса Midas Civil 2018 позволили выявить общую картину напряженно-деформированного состояния сталежелезобетонной балки (рис. 4-10).

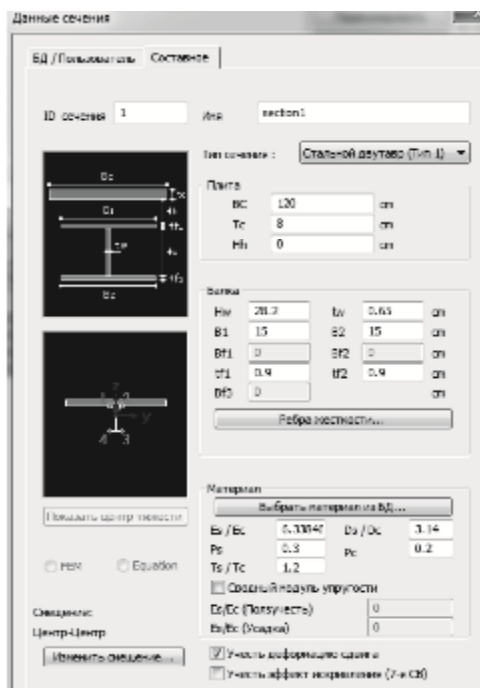


Рис. 4. Создание 3D-модели

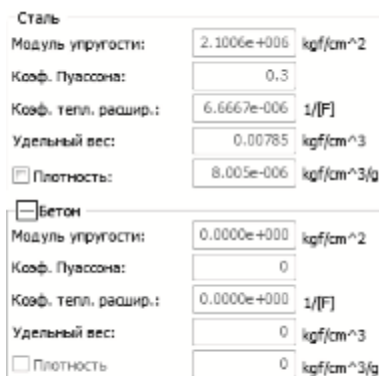


Рис. 5. Задание свойств материалов

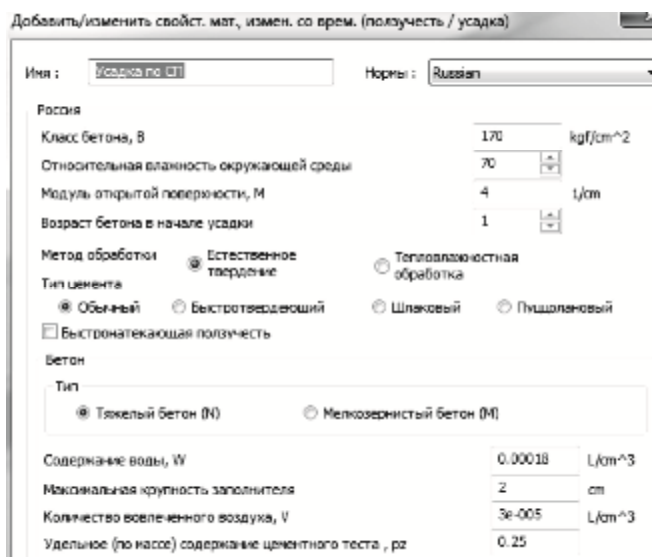


Рис. 6. Задание типа бетона

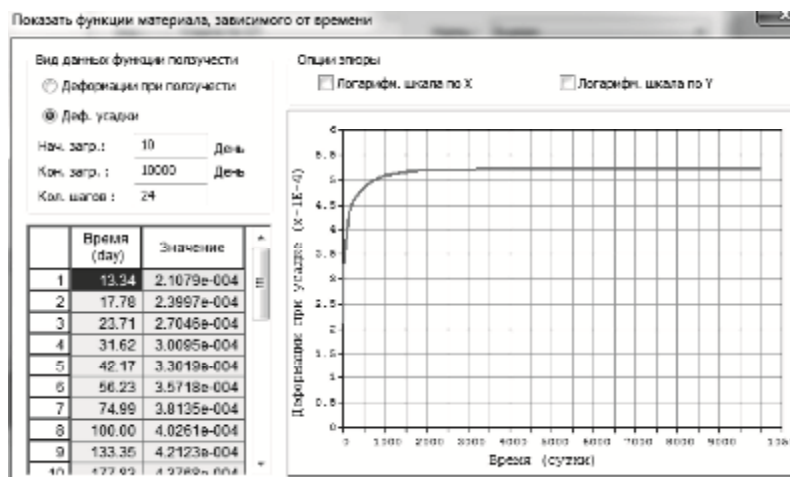


Рис. 7. Задание кривой усадки

Стадия возведения

Название	Продо...	Дата	Шаг
Монтаж стали	0	0	0
Вес жидкого бетона	0	0	0
Включение плиты	14	14	0
Снятие оп. опор	0	14	0

Добавить
 Вставить перед
 Вставить после
 Создать
 Изменить/показать
 Удалить
 Закрыть

Рис. 8. Задание стадий монтажа

Добавить/изменить составное сечение для стадии возведения

Активная стадия: Монтаж стали
 Тип: 1 I: section1
 Составной тип: Нормальный
 Тип сечения: Составное
 Форма сечения: CP_I
 Список: 1to120

Последовательность монтажа

Часть	Тип материала	Материал	Стадия объединения	Возраст	h	w/s	Жестк.	Масштаб жестк.
1	Элемент		Активная с	0	0.76	0
2	Материал	2: В30	Включение	0	7.5	0

Рис. 9. Задание времени включения плиты в работу

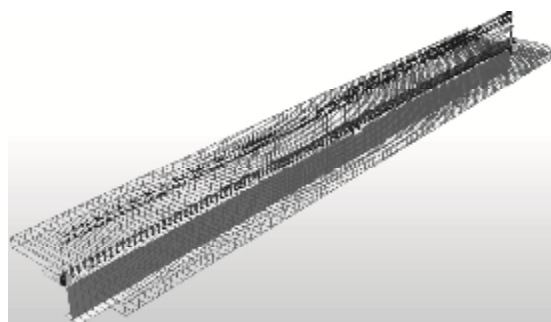


Рис. 10. Задание граничных условий

Постадийное распределение моментов, стадия включения плиты в работу, напряженно-деформированные состояния балки представлены на рис. 11.

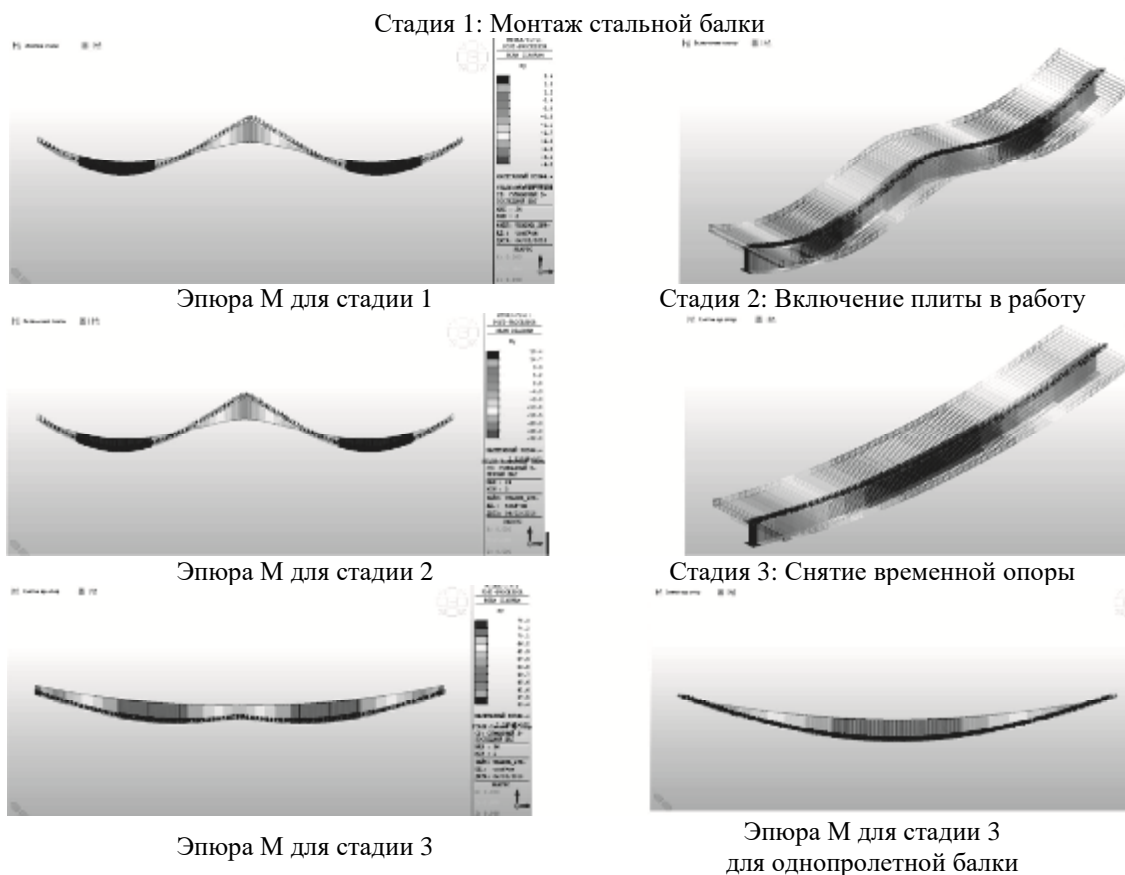


Рис. 11. Результаты численных исследований в Midas Civil

Результаты сопоставительных расчетов приведены в табл., а эпюры напряжений и моментов на рис. 12.

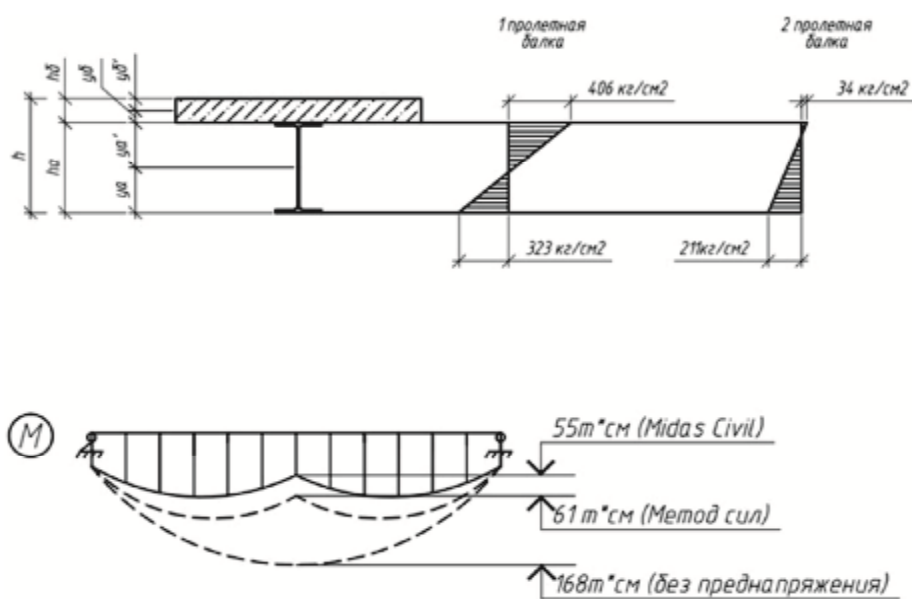


Рис. 12. Поперечное сечение, эпюры напряжений и моментов

Таблица

Сравнение результатов расчетов

Проверки/методы	Метод сил	MidasCivil	Погрешность
Пролетный момент от постоянных нагрузок	32,8	32,9	<1 %
Пролетный момент от усадки	17	17,2	<1 %
Опорный момент от усадки	34	33,8	<1 %
Продольная сила сжатия от усадки	5,6	6,13	9 %
Конечный пролетный момент от комбинации нагрузок	61	55	9,80 %

Заключение

1. Исследовано постадийное напряженно-деформированное состояние (НДС) сталежелезобетонной балки от стадии монтажа с временной подпоркой, укладки и твердения бетона до стадии снятия подпорки.

2. Использовано внутреннее напряженно-деформированное состояние балки бетона для ее самоупрочнения. Записаны аналитические выражения внутренних усилий.

3. Проведены расчеты аналитическим методом на основе метода сил и численными исследованиями на основе ПК MidasCivil. Расхождения в расчетах не превышают 1-9,8 %.

4. Использование самоупрочнения в сталежелезобетонной балке приводит к уменьшению:

- значения доэксплуатационного изгибаемого момента в 2,15 раза ($168:78=2,15$);
- напряжения в растянутом поясе профиля в 1,5 раза ($323:211=1,5$);
- напряжения в сжатом поясе профиля в 11,9 раза ($406:34=11,9$).

Список библиографических ссылок

- Айрумян Э. Л., Каменщиков Н. И., Румянцева И. А. Особенности расчета монолитных плит сталежелезобетонных покрытий по профилированному стальному настилу // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 9. С. 21–26.
- Туснин А. Р. Перекрытия многоэтажных зданий со стальным каркасом // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 8. С. 10–14.
- 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.
- Астахов И. В., Кузнецов А. Ю., Морозова Д. В. Исследование работы сталежелезобетонных конструкций // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 3 (62). С. 15–20.
- Hadzalic E., Barucija K. Concrete shrinkage effects in composite beam // Construction of unique buildings and structures, 2014. № 11 (26). P. 85–93
- Champenois 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. № 18 (3). P. 271–292.
- Gholamhoseini A., Khanlou A., MacRae G., Scott A., Hicks S., Leon R. An experimental study on strength and serviceability of reinforced and steel fibre reinforced concrete (SFRC) continuous composite slabs // Engineering Structures. 2016. № 114 (1). P. 171–180.
- 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. № 110. P. 29–39.
- 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. BSI, London.
- Замалиев Ф. С. К оценке напряженного состояния преднапряженных сталежелезобетонных балок // Известия КГАСУ. 2017. № 3 (41). С. 87–98.

11. Замалиев Ф. С. К оценке прочности сталежелезобетонного перекрытия с преднапряженными балками и плитой // Известия КГАСУ. 2018. № 1 (43). С. 120–129.
12. Замалиев Ф. С. Численные и натурные эксперименты преднапряженных сталежелезобетонных балок // Вестник МГСУ. 2018. Т. 3. № 3 (114). С. 309–321.
13. Сталебетонная преднапряженная балка : пат. 155802 Рос. Федерация. № 2014152337 ; заявл. 23.12.14 ; опубл. 20.10.15, Бюл. № 29. 2 с.
14. Преднапряженная сталебетонная балка : пат. 155488 Рос. Федерация. № 2015102306 ; заявл. 26.01.15 ; опубл. 10.10.15, Бюл. № 28. 2 с.
15. Сталежелезобетонная преднапряженная балка : пат. 165473 Рос. Федерация. № 2016114023 ; заявл. 11.04.16 ; опубл. 20.10.16, Бюл. № 29. 2 с.
16. Преднапряженная стальная обетонированная балка: пат. 172515 Рос. Федерация № 2017112142/03 ; заявл. 10.04.2017 ; опубл. 11.07.17, Бюл. № 20. 2 с.
17. Преднапряженная сталебетонная балка: пат. 174326 Рос. Федерация № 2017101736/03 ; заявл. 19.01.2017 ; опубл. 11.10.17, Бюл. № 29. 2 с.
18. Самонапряженное деревобетонное перекрытие : пат. 177801 Рос. Федерация. № 2017126964 ; заявл. 26.07.17 ; опубл. 13.03.18, Бюл. № 8. 2 с.
19. Белуцкий И. Ю. Совершенствование методов расчета и оценки работоспособности эксплуатируемых сталежелезобетонных пролетных строений. Хабаровск, 2004. 37 с.
20. Kayumov R. A., Muhamedova I. Z., Suleymanov A. M., Tazyukov B. F. Development of film- and fabric- composite materials durability assessing methodology under time-dependent influences of temperature and solar radiation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016 V. 158 010250.

Zamaliyev Farit Sakhapovich

candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: zamaliyev49@mail.ru

Bikinin Emil Gatovich

post-graduate student

E-mail: bekkan91@gmail.com

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Numerical studies of self-stressing of composite beams**Abstract**

Problem statement. The main purpose of the investigation is to use the internal stressed-deformed state of the steel-concrete composite beam for self-stressing.

Solved the problem of prestressing a composite steel beam with the account of shrinkage of concrete and the introduction of a temporary support on the effect of operational loads (temporary support removed). Expressions of internal forces (moments and other internal forces) for the composite section are recorded, and numerical experiments on the analysis of the self-stressing process of the beam are carried out.

Results. The main results of the investigations consist the identification of a number of principal positions of the stress-strain state of the self-stressed steel-concrete composite beam and the evaluation of numerical results of beam research without prestressing and self-stressing.

Conclusions. The significance of the results obtained for the construction industry is to identify the stressed state of the beam of the composite section from the shrinkage of concrete with of internal stresses for self-stressing the beam. The obtained dependences can be used in the construction of beam structures of the composite section in new construction and in the restoration of the floors of architectural heritage buildings.

Keywords: steel-concrete composite beam, stressed state, self-stressed structures, shrinkage, deflection and tension.

References

1. Ayrumyan E. L., Kamenshchikov N. I., Rumiantseva I. A. Features of the calculation of monolithic slabs of steel-reinforced concrete coatings on profiled steel flooring // *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2015. № 9. P. 21–26.
2. Tusnin A. R. Overlapping multi-storey buildings with a steel frame // *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2015. № 8. P. 10–14.
3. Tusnin A. R., Kolyago A. A. Construction and work of composite slabs using precast hollow reinforced concrete slabs // *Sovremennaya nauka i innovatsii*. 2016. № 3. P. 141–147.
4. Astakhov I. V., Kuznetsov A. Y., Morozova D. V. Investigation of the work of steel-reinforced concrete constructions // *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2017. № 3 (62). P. 15–20.
5. Hadzalic E., Barucija K. Concrete shrinkage effects in a composite beam // *Construction of unique buildings and structures*, 2014. № 11 (26). P. 85–93.
6. Champenoy D., Corfdir A., Corfdir P. Calculating the critical buckling force in the bottom flanges of steel-concrete composite bridges // *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2014. № 18 (3). P. 271–292.
7. Gholamhoseini A., Khanlou A., MacRae G., Scott A., Hicks S., Leon R. An experimental study on the strength and serviceability of reinforced and steel fiber reinforced concrete (SFRC) for continuous composite slabs // *Engineering Structures*. 2016. № 114 (1). P. 171–180.
8. Vasdravellis G., Uy B., Tan E. L., Kirkland B. Behavior and design of the composite beams subjected to sagging bending and axial compression Original Research // *Journal of Constructional Steel Research*. 2015. № 110. P. 29–39.
9. 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. BSI, London.
10. Zamaliev F. S., Estimation of the stressed state of prestressed steel-reinforced concrete beams // *Izvestiya KGASU*. 2017. № 3 (41). P. 87–98.
11. Zamaliev F. S., Strength of composite steel slab with prestressed beams and slab // *Izvestiya KGASU*. 2018. № 1 (43). P. 120–129.
12. Zamaliev F. S., Numerical and nuclear experiments of intensified steel – concrete beams // *Vestnik MGSU*. 2018. № 3 (114). P. 309–321.
13. Pre-stressed pre-stressed beam : patent 155802 Ros. Federation. № 2014152337 ; decl. 23.12.14 ; publ. 20.10.15. Bul. № 29. 2 p.
14. Pre-stressed reinforced concrete beam : patent 155488 Ros. Federation. № 2015102306 ; decl. 26.01.15 ; publ. 10.10.15. Bul. № 28. 2 p.
15. Precast concrete pre-stressed beam : patent 165473 Ros. Federation. № 2016114023 ; decl. 11.04.16 ; publ. 20.10.16. Bul. № 29. 2 p.
16. Pre-stressed steel obtonated beam : patent 172515 Ros. Federation № 2017112142/03 ; decl. 10.04.2017; publ. 11.07.17. Bul. № 20. 2 p.
17. Pre-stressed reinforced concrete beam : patent 174326 Ros. Federation. № 2017101736/03 ; decl. 01.19.2017 ; publ. 11.10.17. Bul. № 29. 2 p.
18. Self-stressed wood-concrete roofing : patent 177801 Ros. Federation. № 2017126964 ; decl. 26.07.17; publ. 13.03.18, Bul. № 8. 2 p.
19. Belutsky I. U. Perfection of methods for calculating and assessing the operability of exploited steel-and-concrete span structures: author's abstract. Khabarovsk, 2004. 37 p.
20. Kayumov R. A., Muhamedova I. Z., Suleymanov A. M., Tazyukov B. F. Development of film- and fabric- composite materials durability assessing methodology under time-dependent influences of temperature and solar radiation // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016 V. 158 010250.