

**РАСЧЕТ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ
КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ ТЕКСТИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

**CALCULATION OF STRUCTURAL LOAD CAPACITY
OF TEXTILE INDUSTRY BUILDINGS**

В.Г. МУРАШКИН, Г.В. МУРАШКИН, В.И. ТРАВУШ

V.G. MURASHKIN, G.V. MURASHKIN, V.I. TRAVUSH

**(ООО "Конструкторское бюро "Куйбышев-проект",
Самарский государственный технический университет,
Российская академия архитектуры и строительных наук)**

**(LLC "Design Bureau" Kuibyshev-project",
Samara State Technical University,
Russian Academy of Architecture and Construction Sciences)**

E-mail: ttp@ivgpu.com

Здания и сооружения текстильной промышленности требуют особого подхода к экологической чистоте и формам несущих и ограждающих конструкций. Этим требованиям в наибольшей степени отвечают железобетонные конструкции. Они служат долго, экологичны, имеют простые формы, что позволяет эффективно эксплуатировать их длительное время. Но при обследовании железобетонных сооружений, эксплуатируемых длительное время, прочностные и деформативные характеристики могут не совпадать с нормативными значениями. Такие конструкции называют "не-стандартными", и они требуют принципиально новую деформационную модель для расчета по 1-й и 2-й группе предельных состояний. В статье рассматривается алгоритм определения новой конструкции модели деформирования бетона, работающего на сжатие, и показывается применение этой модели для расчета несущей способности нормально армированных конструкций и перearмированных. Показывается возможность применения модели деформирования для построения эпюры напряжений в сжатой зоне изгибаемого железобетонного элемента.

Buildings and structures of the textile industry require a special approach to environmental cleanliness and forms of supporting and enclosing structures. These requirements are best met by reinforced concrete structures. They serve for a long time, are environmentally friendly, have simple forms that allows to operate them effectively for a long time. But when inspecting reinforced concrete structures operated for a long time strength and deformation characteristics may not coincide with the normative values. Such constructions are called "non-standard" and they require a fundamentally new deformation model for the calculation of the 1st and 2nd groups of limit States. The article discusses the algorithm for determining the new design of the concrete deformation model, working on compression, and shows the application of this model to calculate the load-bearing capacity of normally reinforced structures and re-reinforced. The possibility of applying a deformation model to plot stresses in the compressed zone of a bent reinforced concrete element is shown.

Ключевые слова: деформационная модель, несущая способность, "не-стандартные" и "стандартные" бетоны, высота сжатой зоны, эпюра напряжений, напряжения в арматуре.

Keywords: deformation model, bearing capacity, "non-standard" and "standard" concretes, height of compressed zone, stress diagram, stress in reinforcement.

При расчете несущей способности изгибаемой нормально армированной конструкции от изгибающего момента по СП 63.13330.2012 в сжатой зоне бетона принимается прямоугольная форма эпюры напряжений. Расчетные формулы получаются из условий равновесия очень простыми и для "стандартного" бетона обеспечивают отличную сходимость несущей способности с результатами экспериментов. $M=N_s(h_0-x/2)$ и из $N_s=Db$ $x=R_s A_s/R_b b$ [1], [2].

Для тех бетонов, характеристики которых не укладываются в рамки норм [7], [8], расхождение с экспериментом, если принять также прямоугольную форму эпюры, становится значительным. В этом случае

для определения несущей способности необходимо учитывать форму эпюры в сжатом бетоне и высоту сжатой зоны. Рассмотрим пример железобетонных конструкций сооружения, которое эксплуатировалось более 30 лет. Для изучения работы бетона были выпилены из ригеля цилиндрические образцы. Цилиндрические образцы были испытаны на обычном прессе с добавлением фиксирующего деформации оборудования. Конструкция ригеля в зоне максимального момента без поперечной арматуры показана на рис. 1 (схема напряженного состояния при расчете изгибаемой конструкции с учетом нелинейности деформирования бетона).

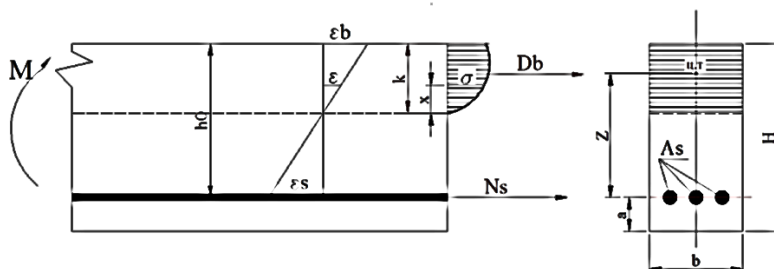


Рис. 1

Размеры ригеля: высота ригеля $H=40$ см, ширина $bb=20$ см, 3 стержня арматуры $\varnothing 28$ мм, $R_s=4000$ кг/см², $E_s=2 \cdot 10^6$ кг/см², $A_s = 18,47$ см², $h_0=32,8$ см.

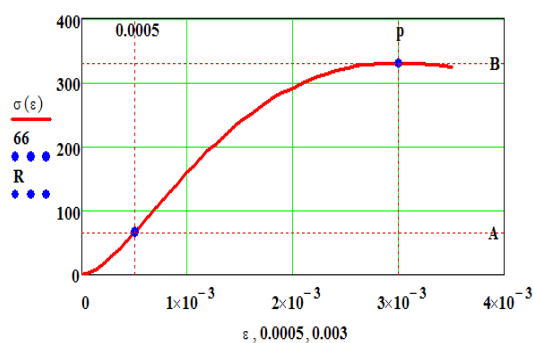


Рис. 2

Испытания цилиндрических образцов показали.

Прочность бетона $R=320$ кг/см² при $p=0,003$, точка А (рис. 2 – модель нелинейного деформирования бетона ригеля с $R=320$ кг/см²) при относительных деформациях $\varepsilon=0,0005$ находилась на уровне $\approx 0,2R=66$ кг/см².

Используя полученные результаты и выражение из [6], получим два уравнения:

для точки А

$$R \cdot 0,2 = a(0,0005)^b \exp \left[\frac{-b(0,0005)}{p} \right],$$

для точки В

$$R = ap^b \exp\left(\frac{-bp}{p}\right).$$

Решая совместно эти уравнения, получаем значения коэффициентов а и b для индивидуальной деформационной модели бетона ригеля: $a=3,05 \cdot 10^7$ кг/см² и $b=1,679$.

Индивидуальная деформационная модель бетона ригеля будет иметь вид:

$$\sigma(\varepsilon) = 3,05 \cdot 10^7 \varepsilon^{1,679} \exp\left(\frac{-1,679\varepsilon}{0,003}\right).$$

Одним из основных параметров в определении несущей способности конструкции является высота сжатой зоны. При чистом изгибе высоту сжатой зоны определяем в сечении с трещиной:

$$Db(\varepsilon) = Ns(\varepsilon), \quad (1)$$

где $Ns(\varepsilon)$ – усилие в арматуре; $D(\varepsilon)$ – усилие в сжатой зоне бетона и

$$Db(\varepsilon) = \int_0^k \sigma x \left(\frac{\varepsilon}{k} x\right) b dx,$$

$$L(\varepsilon) := \text{root} \left[\begin{array}{l} \int_0^k \sigma \left(\frac{\varepsilon}{k} x\right) b dx \\ \frac{\varepsilon}{k} (h_0 - k) Es As \text{ if } \frac{\varepsilon}{k} (h_0 - k) Es Rs \\ (Rs As) \text{ otherwise} \end{array} - 1, k \right]. \quad (2)$$

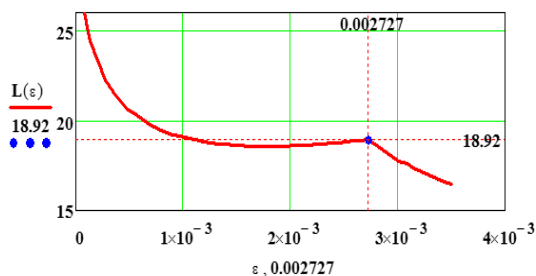


Рис. 3

График зависимости высоты сжатой зоны ригеля от деформаций показан на рис. 3.

$$Ns(\varepsilon) \frac{\varepsilon}{k} (h_0 - k) Es As, \\ \sigma x \leq Rs.$$

Иначе

$$Ns(\varepsilon) = Rs As.$$

Определение из выражения (1) высоты сжатой зоны, необходимой для расчета напряжений в арматуре, можно осуществлять вручную – методом последовательного приближения, составлением специальной программы на ПК, или с использованием соответствующих приложений к ПК. Авторами разработана специальная программа. В этой статье воспользуемся стандартной функцией из программы MathCad:

$$L(\varepsilon) = \text{root} \left(\frac{Db(\varepsilon)}{Ns(\varepsilon)} - 1, k \right),$$

где $L(\varepsilon)$ – высота сжатой зоны в зависимости от деформаций:

Относительные деформации $\varepsilon = 2,727 \cdot 10^{-3}$, отмеченные на рис. 3 символом ●, обозначают начало текучести арматуры. При этих деформациях высота сжатой зоны бетона достигает 18,92 см. С этого момента усилие $Ns = Rs As$ становится постоянным, так же как и усилие в сжатой зоне D . Равнодействующие усилия в сжатом бетоне – $D(\varepsilon)$ и растянутой арматуре – $Ns(\varepsilon)$ показаны на рис. 4 (а) – зависимость $D(\varepsilon)$ и б) – $Ns(\varepsilon)$ при изменении ε от 0 до 0,0035).

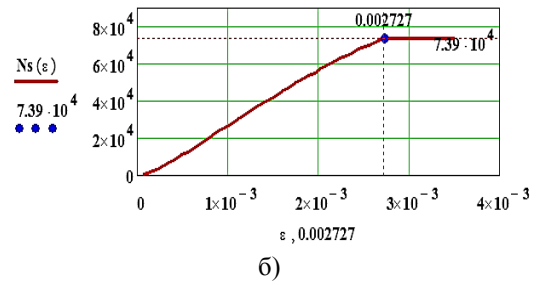
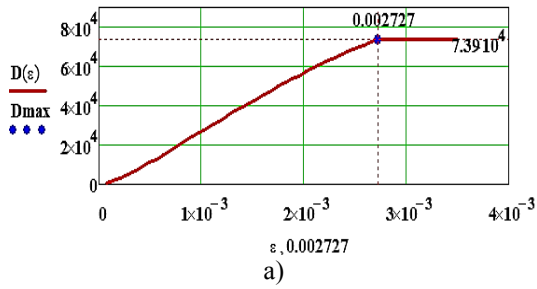


Рис. 4

Используя выражение (1) и полученную индивидуальную деформационную модель для определения центра тяжести эпюры сжатой зоны, установим зависимость плеча внутренней пары сил от относительных деформаций ϵ :

$$Z(\epsilon) := \frac{\int_0^{L(\epsilon)} \sigma \left(\frac{\epsilon}{L(\epsilon)} x \right) b x dx}{\int_0^{L(\epsilon)} \sigma \left(\frac{\epsilon}{L(\epsilon)} x \right) b dx} + (h_0 - L(\epsilon)).$$

Выражение для момента в зависимости от деформаций ϵ :

$$M(\epsilon) = Z(\epsilon) N_s(\epsilon),$$

или

$$M(\epsilon) = Z(\epsilon) D(\epsilon). \quad (3)$$

График, выполненный по этим выражениям показан на рис. 5 (зависимость момента от деформаций).

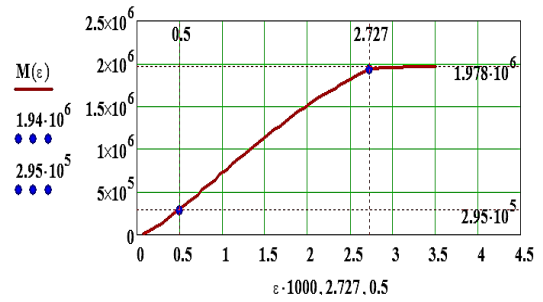


Рис. 5

Максимальный момент $M_{\max} = M(0,0035) = 1,978 \cdot 10^6$ кгсм.

Кроме визуализации $L(\epsilon)$, $D(\epsilon)$, $N_s(\epsilon)$, $Z(\epsilon)$ и $M(\epsilon)$, имея модель деформирования, появляется возможность визуализации напряженного состояния конструкции на любом этапе загрузки. На рис. 6 показаны эпюры напряженного состояния сжатой зоны бетона при значениях $\epsilon_b = 0,002$ и $\epsilon_b = 0,0035$. По оси ординат – сечение балки по высоте, см, по оси абсцисс – напряжение, кг/см².

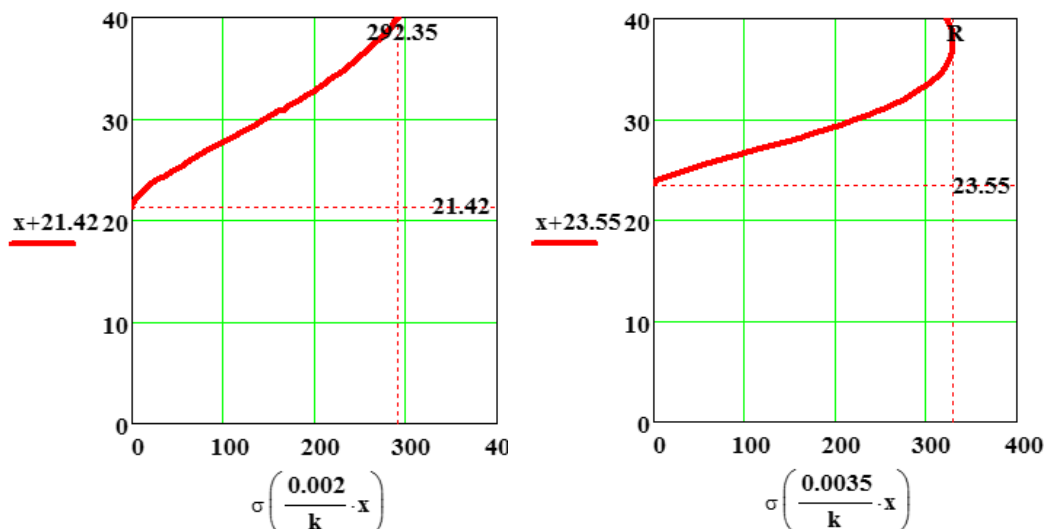


Рис. 6

Сопоставим полученные результаты с упрощенным расчетом по СП 63.13330.2012, когда форма сжатой зоны в предельном состоянии принимается в виде прямоугольника.

Величина сжатой зоны по СП 63.13330.2012:

$$x_{сп} := \frac{R_s A_s}{R b b} \quad x_{сп} = 11,2 \text{ см},$$

относительная высота $\frac{x_{сп}}{h_0} = 0,34$, $\xi < \xi_r$ сечение нормально армировано.

$$M_{norm} := R b b x_{сп} \left(h_0 - \frac{x_{сп}}{2} \right) = 2,01 \cdot 10^6,$$

$$\frac{M_{norm} - M_{max}}{M_{norm}} \cdot 100 = 1,6\%.$$

Расчет по нормам показывает небольшое превышение на 1,6%. Несущая способность ригеля в средней части была признана удовлетворительной. Однако состояние бетона в растянутой зоне у опор ригеля и нарушение сцепления арматуры на некоторых приопорных участках, как показано в [7], [8], привели к необходимости усиления опорных частей ригеля.

Расчеты несущей способности нормально армированных конструкций с применением деформационной модели и по упрощенному расчету по СП 63.13330.2012 с прямоугольной формой эпюры в сжатой зоне дают близкие результаты на всем диапазоне прочностей. Расхождение составляет не более 2,0...2,5%

Для переармированных конструкций различие расчетов по СП 63.13330.2012 и с использованием модели деформирования достигает 20%. Расчеты по СП 63.13330.2012, как правило, завышают несущий момент переармированных конструкций, очевидно, в связи с мало изученным вопросом и нестабильностью свойств бетона.

Использование выражений для определения напряжений в арматуре и анализ нап-

ряженного состояния сжатого бетона позволяют подойти к определению ресурса железобетонных конструкций с разных позиций и оптимизировать результаты [9], [10].

При изменении прочности бетона ригеля с $R=330 \text{ кг/см}^2$ до $R_p=180 \text{ кг/см}^2$, в результате коррозии бетона, ригель перестанет быть нормально армированным и перейдет в разряд переармированных. Без изменения геометрических характеристик и армирования индивидуальная модель бетона ригеля будет иметь вид:

$$\sigma_p(\varepsilon) := a p \varepsilon^{b p} \exp\left(\frac{-b p \varepsilon}{p p}\right),$$

где $a p=1,961 \cdot 10^8$, $b p=1,988$, $p p=0,0025$, а график деформационной модели, в сопоставлении с деформационной моделью бетона с $R=330 \text{ кг/см}^2$ и с $R_p=180 \text{ кг/см}^2$ показан на рис. 7.

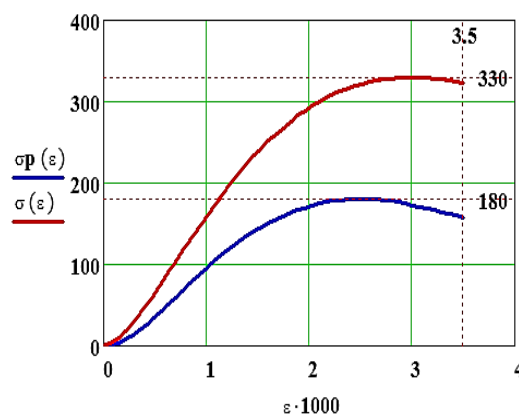


Рис. 7

Напряжения в арматуре ригеля с прочностью бетона $R_p=180 \text{ кг/см}^2$ в предельном состоянии не достигнут предела текучести — рис. 8 (сопоставление изменений напряжений в арматуре ригеля с $R=330 \text{ кг/см}^2$ и $R_p=180 \text{ кг/см}^2$ при одинаковом армировании) и рис. 9 (сопоставление изгибающих моментов в ригеле с прочностью бетона $R=330 \text{ кг/см}^2$ и $R_p=180 \text{ кг/см}^2$ в зависимости от деформаций ε):

$$\sigma_{sp}(\varepsilon) := \begin{cases} \frac{\varepsilon}{L_p(\varepsilon)} (h_0 - L_p(\varepsilon)) E_s \text{ if } \frac{\varepsilon}{L_p(\varepsilon)} (h_0 - L_p(\varepsilon)) E_s \leq R_s, \\ R_s \text{ otherwise,} \end{cases}$$

где $L_p(\varepsilon)$ – высота сжатой зоны при прочности бетона ригеля $R_p=180\text{кг/см}^2$.

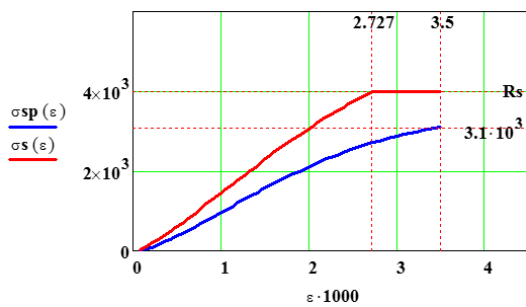


Рис. 8

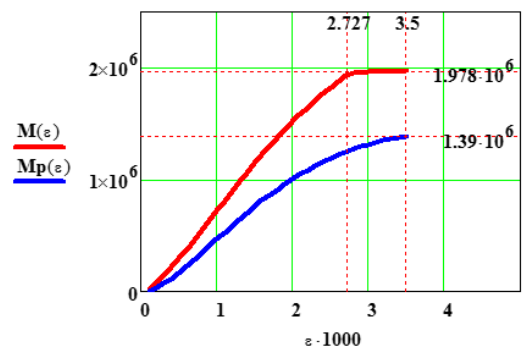


Рис. 9

Сопоставим полученное значение $M_{p\max}=1,39 \cdot 10^6$ с результатом упрощенного расчета по СП 63.13330.2012, когда форма сжатой зоны в предельном состоянии принимается в виде прямоугольника.

Величина сжатой зоны по СП 63.13330.2012:

$$x_{\Gamma} = h_0 \cdot 0,509 = 16,7 \text{ см.}$$

Момент по СП 63.13330.2012:

$$M_{p\text{норм}} := R_p b b x_{\Gamma} \left(h_0 - \frac{x_{\Gamma}}{2} \right) = 1,47 \cdot 10^6.$$

Соотношение моментов $M_{p\text{норм}}=1,47 \cdot 10^6$ кгсм и $M_{p\max}=1,39 \cdot 10^6$ кгсм:

$$\frac{M_{p\text{норм}} - M_{p\max}}{M_{p\text{норм}}} \cdot 100 = 5,57\%.$$

Как видим, расчет несущей способности перearмированных конструкций по СП нес-

колько превышает несущую способность, что надо иметь в виду при разработке проекта усиления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мурашкин Г.В., Мурашкин В.Г. Моделирование диаграммы деформирования бетона и визуализация напряженного состояния // Фундаментальные, поисковые, прикладные, исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации. – М., 2016. С. 535...543.

2. Мурашкин Г.В., Мурашкин В.Г. Особенности деформационных характеристик бетона, твердеющего под давлением в процессе твердения // РААСН, Вестник Приволжского Регионального Отделения №19. – Нижний Новгород, 2016. С. 232...237.

3. Мурашкин Г.В., Мурашкин В.Г. Учет изменения прочности бетона при проектировании железобетонных конструкций. // РААСН, Вестник Приволжского Регионального Отделения №20. – Нижний Новгород, 2017. С. 244...251.

4. Murashkin G.V., Murashkin V.G. Application of concrete deformation model for calculation of bearing capacity of reinforced concrete structures. // МАТЕС Web of Conferences 196, 04008 (2018). XXVII R-S-P Seminar 2018, Theoretical Foundation of Civil Engineering, France.

5. Мурашкин В.Г., Мурашкин Г.В. Расчет прочности проектируемых железобетонных конструкций с учетом нелинейного деформирования бетона // Сб. ст.: Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство. – Самара: СамГТУ, 2018. С. 155...166.

6. Мурашкин В.Г. Особенности нелинейного деформирования бетона // J. RAASN Academia. Архитектура и строительство. – 2019, №1. С. 128-132.

7. Румянцева В.Е., Гоглев И.Н., Логинова С.А., Морохов К.В. Исследование влияния фтористых сред на коррозионные свойства цементных бетонов. // Сб. мат. I науч.-практ. форума "SMARTBUILD". – Иваново 23 – 24 ноября 2018 г. С. 112...117.

8. Федосов С.В., Малбиев С.А. Применение коррозионно стойких строительных материалов в несущих конструкциях покрытий зданий текстильных предприятий // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2017, № 5. С. 204...208.

9. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Красильников И.В., Коновалова В.С., Караваев И.В. Определение ресурса безопасной эксплуатации конструкций из бетона, содержащего гидрофобизирующие добавки // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2017, № 6. С. 268...276.

10. Румянцева В.Е., Хрунов В.А., Шестеркин М.Е. Определение ресурса безопасной эксплуатации зданий и сооружений из бетона // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2015, № 4. С.131...137.

REFERENCES

1. Murashkin G.V., Murashkin V.G. Modelirovanie diagrammy deformirovaniya betona i vizualizatsiya napyazhennogo sostoyaniya // Fundamental'nye, poiskovye, prikladnye, issledovaniya RAASN po nauchnomu obespecheniyu razvitiya arkhitektury, gradostroitel'stva i stroitel'noy otrasli Rossiyskoy Federatsii. – M., 2016. S. 535...543.
2. Murashkin G.V., Murashkin V.G. Osobennosti deformatsionnykh kharakteristik betona, tverdeyushchego pod davleniem v protsesse tverdeniya // RAASN, Vestnik Privolzhskogo Regional'nogo Otdeleniya №19. – Nizhniy Novgorod, 2016. S. 232...237.
3. Murashkin G.V. Murashkin V.G. Uchet izmeneniya prochnosti betona pri proektirovanii zhelezobetonnykh konstruksiy. // RAASN, Vestnik Privolzhskogo Regional'nogo Otdeleniya №20. – Nizhniy Novgorod, 2017. S. 244...251.
4. Murashkin G.V., Murashkin V.G. Application of concrete deformation model for calculation of bearing capacity of reinforced concrete structures. // MATEC Web of Conferences 196, 04008 (2018). XXVII R-S-P Seminar 2018, Theoretical Foundation of Civil Engineering, France.
5. Murashkin V.G., Murashkin G.V. Raschet prochnosti proektiruemykh zhelezobetonnykh konstruksiy s uchetom nelineynogo deformirovaniya betona // Sb. st.: Traditsii i innovatsii v stroitel'stve i arkhitekture. Stroitel'stvo. – Samara: SamGTU, 2018. S. 155...166.
6. Murashkin V.G. Osobennosti nelineynogo deformirovaniya betona // J. RAASN Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo. – 2019, №1. S. 128-132.
7. Rummyantseva V.E., Goglev I.N., Loginova S.A., Morokhov K.V. Issledovanie vliyaniya florigisticheskikh sred na korrozionnye svoystva tsementnykh betonov. // Sb. mat. I nauch.-prakt. foruma "SMART-BUILD". – Ivanovo 23 – 24 noyabrya 2018 g. S. 112...117.
8. Fedosov S.V., Malbiev S.A. Primenenie korrozionno stoykikh stroitel'nykh materialov v nesushchikh konstruksiyakh pokrytiy zdaniy tekstil'nykh predpriyatiy // Izv. vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti. – 2017, № 5. S. 204...208.
9. Fedosov S.V., Rummyantseva V.E., Krasil'nikov I.V., Konovalova V.S., Karavaev I.V. Opredelenie resursa bezopasnoy ekspluatatsii konstruksiy iz betona, sodержashchego gidrofobiziruyushchie dobavki // Izv. vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti. – 2017, № 6. S. 268...276.
10. Rummyantseva V.E., Khrunov V.A., Shesterkin M.E. Opredelenie resursa bezopasnoy ekspluatatsii zdaniy i sooruzheniy iz betona // Izv. vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti. – 2015, № 4. S.131...137.

Рекомендована кафедрой строительных конструкций СГТУ. Поступила 30.10.19.