

УДК: 624.012
DOI: 10.48612/NewsKSUAE/70.11
EDN: IBALUY



Сталежелезобетонные перекрытия, новые методы их расчета

А.Г. Тамразян¹, Ф.С. Замалиев²

¹Московский государственный строительный университет,
Москва, Российская Федерация

²Казанский государственный архитектурно – строительный университет,
Казань, Российская Федерация

Аннотация: В перекрытиях зданий в последние годы достаточно широко применяют сталежелезобетонные конструкции. Проектирование сталежелезобетонных перекрытий в нашей стране сегодня ведется по требованиям действующих нормативов. При этом расчетные модели основаны на диаграммах напряжений нормального сечения треугольного и прямоугольного очертания, что приводит к искаженным результатам расчетов от фактической несущей способности. *Целью исследования* является развитие теории расчета, разработка новых методов расчета прочности. Были поставлены следующие задачи: анализ конструктивных решений сталежелезобетонных перекрытий, разработка новых методов расчета отражающих действительное напряженно-деформированное состояние нормального сечения главных несущих элементов перекрытия.

Проанализированы конструктивные решения сталежелезобетонных перекрытий. Рассмотрены перекрытия и анкерные связи в них по патентам авторов с анализом их работы.

Многочисленные наши испытания показывают, что в нормальном сечении изгибаемого элемента возникают напряжения криволинейного очертания. Предлагается расчет прочности сталежелезобетонных элементов вести на основе диаграмм напряжений, приближенных к фактическому напряженно – деформированному состоянию сечений.

Приведены аналитические зависимости оценки прочности сталежелезобетонный перекрытий на основе диаграмм напряжений близких к фактическому напряженно – деформированному состоянию сечений: трапециевидных диаграмм, основанных на предельных относительных деформациях сжатия бетона и криволинейных диаграмм бетона сжатой зоны изгибаемого элемента.

Даны аналитические зависимости напряженно деформированного состояния контакта верхнего пояса стальной балки и бетонной плиты. На контакте возникает усилие сдвига, что приводит к сложному напряженно-деформированному состоянию бетона и анкерного стержня. Рассмотрены изгиб анкера и изгиб с растяжением анкерного стержня, приведены новые зависимости для определения напряжений в бетоне и анкерном стержне. Расчет по предложенным зависимостям позволяет повысить надежность работы конструкций и получить экономичные решения перекрытий.

Ключевые слова: сталежелезобетонные перекрытия, расчетные модели, диаграммы нагружений, изгибаемый элемент, аналитические зависимости, анкерные стержни

Для цитирования: Тамразян А.Г., Замалиев Ф.С. Сталежелезобетонные перекрытия, новые методы их расчета // Известия КГАСУ, 2024, № 4(70), с. 118-130, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/70.11, EDN: IBALUY

Steel reinforced concrete slabs, new methods of their calculation

A.G. Tamrazyan¹, F.S. Zamaliev²

¹National Research Moscow State University of Civil Engineering,
Moscow, Russian Federation

²Kazan State University of Architecture and Engineering,
Kazan, Russian Federation

Abstract: Steel reinforced concrete structures have been widely used in slabs in recent years. The design of steel reinforced concrete slabs in our country today is carried out in accordance with the requirements of current regulations. In this case, the design models are based on stress diagrams of normal section of triangular and rectangular outline, which leads to distorted calculation results from the actual load-bearing capacity.

The aim of the research is to develop the theory of calculation and new methods of strength calculation. The tasks of the research are the analysis of structural solutions of steel reinforced concrete slabs, development of new methods of calculation reflecting the actual stress-strain state of the normal section of the main bearing elements of the slab.

Structural solutions of steel reinforced concrete slabs are analyzed. Slabs and anchor links in them are considered according to the authors' patents with the analysis of their work.

Numerous tests show that curvilinear outline stresses occur in the normal section of the bending element. It is proposed to calculate the strength of steel reinforced concrete elements on the basis of stress diagrams, approximated to the actual stress-strain state of sections.

Analytical dependences of strength estimation of steel reinforced concrete slabs on the basis of stress diagrams close to the actual stress-strain state of sections are given: trapezoidal diagrams based on limiting relative deformations of concrete compression and curvilinear diagrams of concrete of the compressed zone of the bending element.

Analytical dependences of the stress-strain state of the contact between the top chord of a steel beam and a concrete slab are given. A shear force occurs at the contact, which leads to a complex stress-strain state of concrete and anchor rod. Dependences for determination of stresses in concrete and anchor rod are given, anchor bending and tensile bending of anchor rod are considered.

Calculation according to the proposed dependences will allow increasing the reliability of the structures and obtaining cost effective solutions of slabs.

Keywords: steel reinforced concrete slabs, calculation models, load diagrams, bending element, analytical dependencies, anchor rods

For citation: Tamrazyan A.G., Zamaliev F.S. Steel reinforced concrete slabs, new methods of their calculation // News of KSUAE, 2024, № 4(70), p. 118-130, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/70.11, EDN: IBALUY

1. Введение

Многие исследователи считают, что первые сталебетонные конструкции появились 100лет назад, в 1923г. после землетрясения в Японии – в транспортных сооружениях; чуть позже они нашли применение и в гражданском строительстве [1]. В середине прошлого столетия в Европе и США в перекрытиях при возведении сталежелезобетонных конструкций начали использовать стальной профнастил [2]. Профнастил использовался как несъемная опалубка и внешняя растянутая арматура (рис.1)

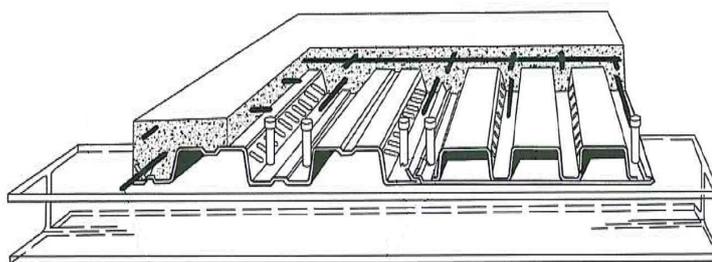


Рис. 1. Конструкция перекрытия по профнастилу [3]

Fig. 1. Construction of corrugated steel floor slabs [3]

Сталежелезобетонные перекрытия представляют монолитную плиту по стальному профнастилу, которые опираются на ряд стальных балок-ребер, которые могут быть обетонированы [3], что увеличивает их огнестойкость. Для совместной работы ребер с бетонной плитой используют разные анкерные связи (петли, упоры, стержни и т.д.) [4,5,6]. В Европе большое распространение нашли вертикальные стержни с головкой – стад болты. Для балок с частым расположением удобны перекрытия с легковесным вкладышем (рис.3). Легковесные вкладыши использованы также в сборно-монолитных перекрытиях с тонколистовым профилем (системы МАРКО) [7].

В Казанском государственном архитектурно – строительном университете КГАСУ по сталежелезобетонным перекрытиям, балкам и плитам получено более полсотни патентов на изобретения и полезную модель.

Сталежелезобетонные перекрытия с профнастилом на которые Роспатентом КГАСУ выданы патенты, например, №2785159 [8], где профнастил с прорезью с одного конца и заглушками с другого, уложен на балки в шахматном порядке, что улучшает пространственную жесткость и несущую способность сталебетонного перекрытия за счет пониженного расположения гофр настила ниже силового потока от верха стальной балки. Также для увеличения несущей способности перекрытия предложен вариант по патенту №2759524 [9], где для задержания вытекания свежееуложенного бетона у профнастила заглушки выполнены с обоих концов.

Актуальным для сталебетонных конструкций является применение гнутых профилей в роли ребер-балок в сборно-монолитном перекрытии (рис.3), патент №171103 [10].

В сталежелезобетонных плитах вместо стального профнастила начали использовать обычный стальной настил замоноличенный бетоном и армированным стальной сеткой [11]. Для обеспечения совместной работы бетона с настилом использованы стад-болты. Однако, несущая способность такой плиты незначительная из-за отсутствия совместности деформаций стад-болта и стальной сетки. Кроме того у многих исследователей отмечен отрыв головки стад болта. Этот недостаток устранен в патенте КГАСУ №2823096 [12].

Одним из главных вопросов при обеспечении высокой несущей способности и жесткости сталебетонных перекрытий является рациональное применение анкерных связей. Испытания широко распространенных в Европе стад-болтов показывают отрыв головки болта и разрыв бетона вдоль стержня болта. КГАСУ предложены анкерные стержни с разветвленной головкой, что улучшает сцепление с бетоном и упрощает сварку к стальной балке контактной сваркой, отпадает необходимость дорогостоящего немецкого автомата, патенты №2755288, 275182 [13,14].

Наряду с разработкой новых технических решений перекрытий и анкерных связей обеспечивающих надежную работу бетонной плиты со стальными балками-ребрами перекрытия, другим важным вопросом является оценка прочности и на основе анализа напряженно-деформированного состояния перекрытия разработка методов расчета основных его несущих элементов.

Целью исследования является развитие теории расчета, разработка новых методов расчета прочности. Были поставлены следующие задачи: анализ конструктивных решений сталежелезобетонных перекрытий, разработка новых методов расчета отражающих действительное напряженно-деформированное состояние нормального сечения главных несущих элементов перекрытия.

2. Материалы и методы

На сегодня основным нормативным документом при проектировании сталежелезобетонных конструкций является СП266.1325800.2016. Расчет прочности сталебетонных балок перекрытия ведется по расчетной модели с треугольными и прямоугольными эпюрами напряжений в нормальном сечении [3]. Сопоставления опытных и расчетных значений по действующим нормам показывает значительные отклонения в сторону завышения и занижения прочности по нормальным сечениям.

Расчет сталебетонных балок в составе перекрытия ведем на основании предельной относительной деформации сжатия бетона (рис.2), расчетная схема сечений приведена ниже.

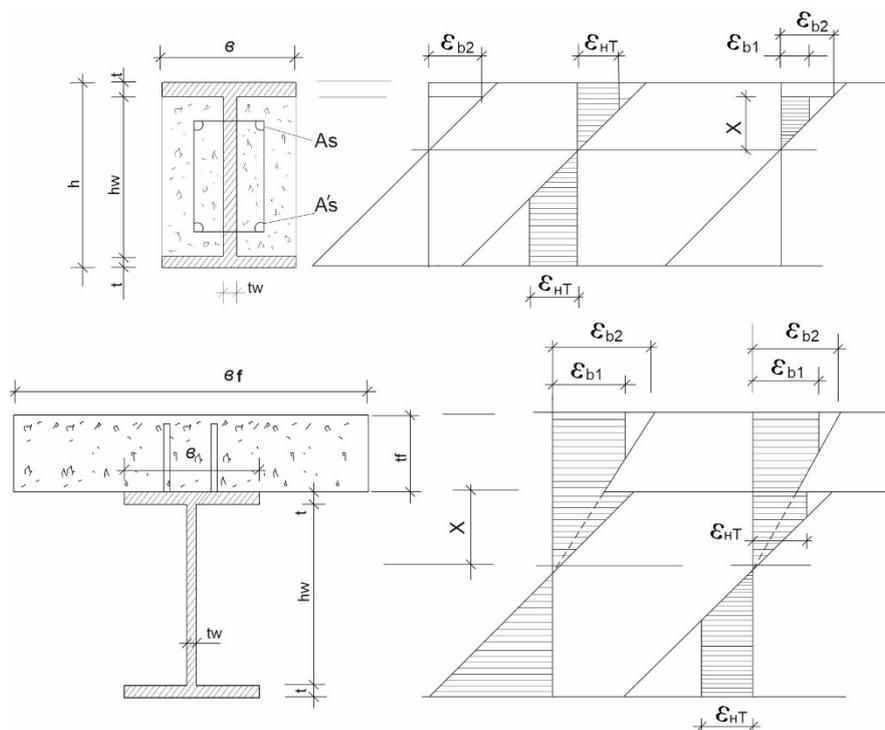


Рис.2 Расчетная схема сечений на основе предельной относительной деформации сжатия бетона:
а) сталебетонная балка на основе двутавра, б) сталежелезобетонное перекрытие
(иллюстрация авторов)

Fig.2 Calculation scheme of sections based on the ultimate relative compression deformation of concrete:
a) a steel-concrete beam based on an I-beam, b) a steel-reinforced concrete floor slab
(illustration by the authors)

Приняты следующие допущения:

- выполняется гипотеза плоских сечений Бернулли;
- сопротивление бетона растяжению равно нулю;
- двух линейная диаграмма состояния сжатой зоны бетона;
- диаграмма Прандтля работы стали;
- относительная деформация начала текучести бетона в сжатой зоне $-\epsilon_{b1} = R_b / E_b$;
- относительная деформация сжатия в верхней кромке балки не превышает предельную $-\epsilon_{b2}$;
- сталь жёсткой арматуры – малоуглеродистая с выраженной площадкой текучести;
- относительная деформация начала площадки текучести стали жёсткой арматуры – $\epsilon_{нт} = 0,002 + R_y / E$.

Положение границы сжатой зоны определяем вычисляя внутренние усилия для каждой зоны. Для сжатой и растянутой зон изгибаемого элемента внутренние усилия определяются как произведение расчетного сопротивления материала на площадь сечения подвергнутого сжатию или растяжению.

Для сжатой зоны бетона (рис.2):

$$\frac{x}{2\varepsilon_{b2}} \varepsilon_{b1} R_b (b_f - t_\omega) + \left(x - \frac{x}{\varepsilon_{b2}} \varepsilon_{b1} \right) R_b (b_f - t_\omega) = x \left(1 - \frac{1}{2\varepsilon_{b2}} \varepsilon_{b1} \right) R_b (b_f - t_\omega) \quad (1)$$

Для сжатой зоны стального профиля

$$\begin{aligned} \frac{x}{2\varepsilon_{b2}} \varepsilon_{HT} R_y t_\omega + b t R_y + \left(x - \frac{x}{\varepsilon_{b2}} \varepsilon_{HT} \right) t_\omega R_y &= b t R_y + x \left(1 - \frac{1}{2\varepsilon_{b2}} \varepsilon_{HT} \right) t_\omega R_y = \\ &= t R_y \left[b + x \left(1 - \frac{1}{2\varepsilon_{b2}} \varepsilon_{HT} \right) \right] \end{aligned} \quad (2)$$

Для растянутой зоны стального профиля

$$b t R_y + \frac{x}{2\varepsilon_{b2}} \varepsilon_{HT} R_y t_\omega + \left(h - x - \frac{x}{\varepsilon_{b2}} \varepsilon_{HT} \right) R_y t_\omega = t R_y \left[b + \left(h - x - \frac{x}{2\varepsilon_{b2}} \varepsilon_{HT} \right) \right] \quad (3)$$

Уравнение равновесия

$$x \left(1 - \frac{1}{2\varepsilon_{b2}} \varepsilon_{b1} \right) R_b (b - t_\omega) + t R_y \left[b + x \left(1 - \frac{1}{2\varepsilon_{b2}} \varepsilon_{HT} \right) \right] = t R_y \left[b + \left(h - x - \frac{x}{2\varepsilon_{b2}} \varepsilon_{HT} \right) \right] \quad (4)$$

$$x \left(1 - \frac{1}{2\varepsilon_{b2}} \varepsilon_{b1} \right) R_b (b - t_\omega) = t R_y [(h - 2x)] \quad (4a)$$

$$x \left(1 - \frac{1}{2\varepsilon_{b2}} \varepsilon_{b1} \right) R_b (b - t_\omega) + t R_y x = t R_y h \quad (4b)$$

$$x = \frac{t R_y h}{\left(1 - \frac{1}{2\varepsilon_{b2}} \varepsilon_{b1} R_b (b - t_\omega) + 2 t R_y \right)} \quad (5)$$

Внутренний момент (относительно границы сжатой зоны).

Для стальной части

$$M_s = t R_y x^2 \left[1 + \frac{1}{3} \left(\frac{1}{\varepsilon_{b2}} \varepsilon_{HT} \right)^2 \right] + 2(b_f - t) t R_y (h + t) + t R_y \left[(h - x)^2 - \left(\frac{x}{\varepsilon_{b2}} \varepsilon_{HT} \right)^2 \right] \quad (6)$$

Для бетонной части

$$M_b = x^2 \frac{b - t_\omega}{2} R_b \left[\frac{5}{3} \left(\frac{1}{\varepsilon_{b2}} \varepsilon_{b1} \right)^2 + 1 \right] \quad (7)$$

Для всего сечения

$$M_{inf} = M_s + M_b \quad (8)$$

Многочисленные испытания [15] показывают криволинейность диаграммы напряжений в нормальном сечении главных изгибаемых элементов сталежелезобетонного перекрытия. В качестве диаграмм работы материалов принимаем аналитические диаграммы [16].

С учетом аналитических диаграмм и криволинейных диаграмм напряжений сжатой зоны бетона для сталебетонного изгибаемого элемента со стальным профнастилом (СПН) получим следующие выражения (рис.3).

Для определения границы сжатой зоны при расположении СПН поперек балки

$$N_x = N_{b1} + N_{b2} + N_a + N'_{pr} - N_{pr2} \quad (9)$$

$$\text{где } N_{b1} = \int_{h_p}^h \sigma'_b(\varepsilon_b) b_n dx; \quad N_{b2} = \int_0^h \sigma_{b2}(\varepsilon_b) b_n dx$$

$$N_a = \sigma_a A_a; \quad N'_{pr} = \sigma'_{pr} A'_{pr}; \quad N_{pr2} = \sigma_{pr}^2 A_{pr}^2$$

Моментное состояние

$$M_z = N_{b1} Z_1 + N_{b2} Z_2 + N_a Z_3 + N'_{pr} Z_4 + N_{pr2} Z_5 \quad (10)$$

где $Z_1 \dots Z_2$ – расстояния от N_i до нейтральной оси

Для сечения при расположении СПН вдоль балки будут аналогичные выражения:

$$N_x = N_{bn} + N_{bp} + N_a + N_{СПН} + N'_{pr} - N_{pr} \quad (11)$$

$$M_z = N_{bn} Z_1 + N_{bp} Z_2 + N_a Z_3 + N_{СПН} Z_4 + N'_{pr} Z_5 + N_{pr2} Z_6 \quad (12)$$

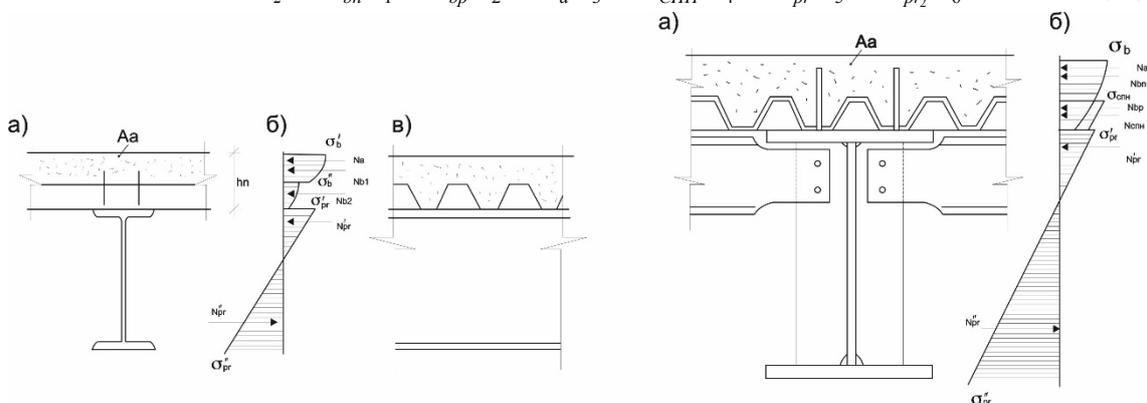


Рис.3 Эпюры напряжений и внутренние усилия для сечения со СПН поперек и вдоль балки: а) сечение поперек балки, б) эпюра напряжений и усилия, в) сечение вдоль балки, г) сечение поперек балки и СПН, д) эпюра напряжений и усилия (иллюстрация авторов)

Fig.3 Stress diagrams and internal forces for the section with corrugated steel floor across and along the beam

a) cross-section beam, b) stress and force diagram, c) section along the beam, d) cross-section beam and corrugated steel floor, f) stress and force diagram (illustration by the authors)

Для более точной оценки напряжённо-деформированного состояния сталежелезобетонного изгибаемого элемента необходимо учитывать податливость контакта «сталь-бетон». В этом случае расчёт сталежелезобетонного изгибаемого элемента на основе аналитических диаграмм деформирования бетона и стали ведётся исходя из следующих предпосылок:

- в качестве расчётных принимаются нормальные напряжения в монолитном бетоне и в стальной балке;
- связь между осевыми напряжениями и относительными деформациями бетона и стали принимаются в виде диаграмм, показанных на рис.б ;
- кривизна, вызываемая от действия внешнего изгибающего момента, имеет одинаковое значение как для бетонной, так и для стальной частей сталежелезобетонных конструкций;
- в пределах железобетонной полки и отдельно стальной балки считается справедливой гипотеза плоских сечений;
- для составного сечения происходит отклонение распределения деформаций по высоте от линейного закона (рис.б);
- связь между усилиями и деформациями сопряжения (соединения) принимается в виде диаграмм, показанных на рис.б.

С учетом податливости шва между бетонной полкой и стальной балкой внутренние усилия определяются по следующим выражениям:

$$N_x = \int_0^{h_n} \sigma_b [\varepsilon_b(x) + \Delta\varepsilon] \cdot b_n d_x + \sigma'_s (\varepsilon'_s - \Delta\varepsilon) \cdot A'_s - \sigma_s (\varepsilon_s + \Delta\varepsilon) \cdot A_s \quad (13)$$

$$M_x = \int_0^{h_n} \sigma_b [\varepsilon_b(x) + \Delta\varepsilon] \cdot b_n Z_1 + \sigma'_s (\varepsilon'_s - \Delta\varepsilon) \cdot A'_s Z_2 + \sigma_s (\varepsilon_s + \Delta\varepsilon) \cdot A_s Z_3 \quad (14)$$

а при наличии гибкой арматуры

$$N_x = \int_0^{h_n} \sigma_b [\varepsilon_b(x) + \Delta\varepsilon] \cdot b_n dx + \sigma'_s (\varepsilon'_s - \Delta\varepsilon) \cdot A'_s - \sigma_s (\varepsilon_s + \Delta\varepsilon) \cdot A_s + \sigma'_{sa} (\varepsilon'_{sa} + \Delta\varepsilon) A'_{sa} + \sigma_{sa} (\varepsilon_{sa} + \Delta\varepsilon) A_{sa} \tag{15}$$

$$M_x = \int_0^{h_n} \sigma_b [\varepsilon_b(x) + \Delta\varepsilon] \cdot b_n Z_1 + \sigma'_s (\varepsilon'_s - \Delta\varepsilon) \cdot A'_s Z_2 + \sigma_s (\varepsilon_s + \Delta\varepsilon) \cdot A_s Z_3 + \sigma'_{sa} (\varepsilon'_{sa} + \Delta\varepsilon) A'_{sa} z_4 + \sigma_{sa} (\varepsilon_{sa} + \Delta\varepsilon) A_{sa} z_5 \tag{16}$$

где $\Delta\varepsilon$ - относительная величина податливости шва.

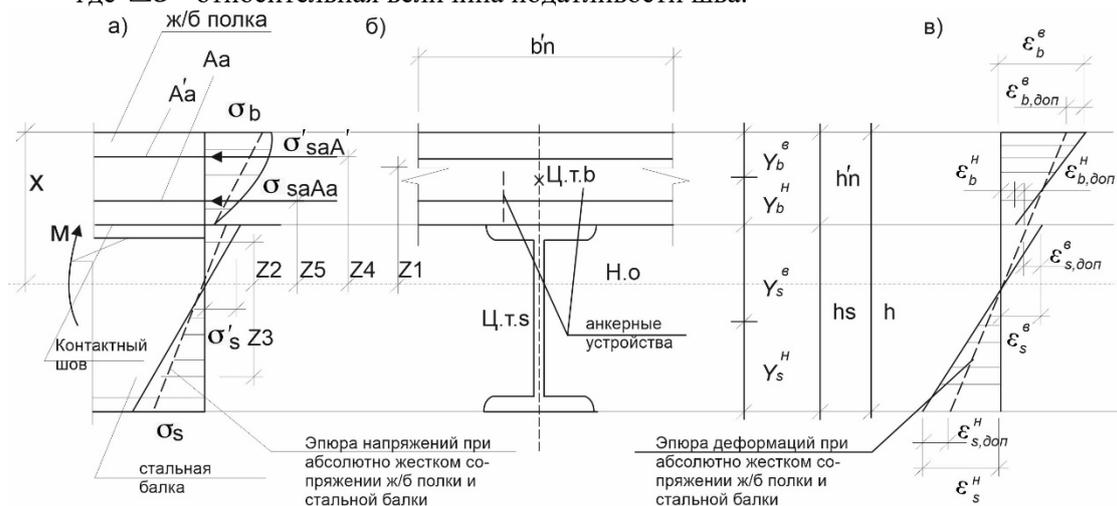


Рис. 4. Напряженно-деформированное состояние в нормальном сечении сталежелезобетонной изгибаемой балки с учетом податливости связей сдвига: а) схема усилий и эпюра напряжений; б) поперечное сечение; в) эпюра деформаций (иллюстрация авторов)

Fig. 4. Stress-strain state in a normal section of a bending steel reinforced concrete beam taking into account the flexibility of shear bonds: a) force diagram and stress diagram; b) cross-section; c) deformation diagram (illustration by the authors)

При изложенных предпосылках сначала определяется величина относительных деформаций сдвига между железобетонной полкой и стальной балкой:

$$\varepsilon_{sh} = y/l \tag{17}$$

где y - перемещение анкерного стержня по плоскости контакта «сталь-бетон», l – расчётная длина зоны чистого изгиба.

Используя рис.4 запишем условие совместности деформаций в уровне контактной плоскости:

$$\varepsilon_{sh} = \varepsilon_{b,дон}^H + \varepsilon_{s,дон}^e \tag{18}$$

где $\varepsilon_{b,дон}^H, \varepsilon_{s,дон}^e$ – соответственно, дополнительные относительные деформации бетона и стали в плоскости контакта «сталь-бетон».

Из равенства кривизны железобетонной полки и стальной балки сталежелезобетонного сечения следует:

$$\varepsilon_{b,дон}^H \cdot y_s^e = \varepsilon_{s,дон}^e \cdot y_b^H \tag{19}$$

что позволяет определять дополнительные относительные деформации нижних волокон железобетонной полки и верхних волокон стальной балки следующим образом:

$$\varepsilon_{s,дон}^e = \frac{\varepsilon_{sh} \cdot y_s^e}{y_s^e + y_b^H} ; \varepsilon_{b,дон}^H = \frac{\varepsilon_{sh} \cdot y_b^H}{y_b^H + y_s^e} \tag{20};$$

С учётом гипотезы плоских сечений дополнительные относительные деформации $\epsilon_{s, \text{don}}^H$ нижних волокон стальной балки и $\epsilon_{b, \text{don}}^6$ верхних волокон железобетонной полки композиционного сечения равны:

$$\epsilon_{s, \text{don}}^H = \frac{\epsilon_{sh} \cdot y_s^H}{y_s^6 + y_b^H} \quad ; \quad \epsilon_{b, \text{don}}^6 = \frac{\epsilon_{sh} \cdot y_b^6}{y_b^H + y_s^6} \quad (21);$$

Тогда, относительные деформации материалов в характерных уровнях высоты СЖБ сечения определяются по формулам (рис.14):

$$\epsilon_b^6 = \epsilon_{bo}(x) + \epsilon_{b, \text{don}}^6 \quad ; \quad \epsilon_b^H = \epsilon_{bo}(x) - \epsilon_{b, \text{don}}^H \quad (22);$$

$$\epsilon_s^6 = \epsilon_{so}(x) + \epsilon_{s, \text{don}}^6 \quad ; \quad \epsilon_s^H = \epsilon_{so}(x) + \epsilon_{s, \text{don}}^H \quad (23);$$

Прочность нормального сечения сталежелезобетонного сечения оценивается исходя из условия:

$$M \leq M_z, \text{ где } M - \text{ момент от эксплуатационных нагрузок.}$$

В составных сталебетонных сечениях вторым важным вопросом является оценка несущей способности контактного шва плиты и стальной балки. В действующих нормах этот вопрос рассматривается на основе полуэмпирических зависимостей.

Предлагается оценить работу контактного шва (бетона и анкерного стержня) по схеме рис. 5. Проведенные испытания подтверждают представленную схему работы анкеров и бетона (рис.5)

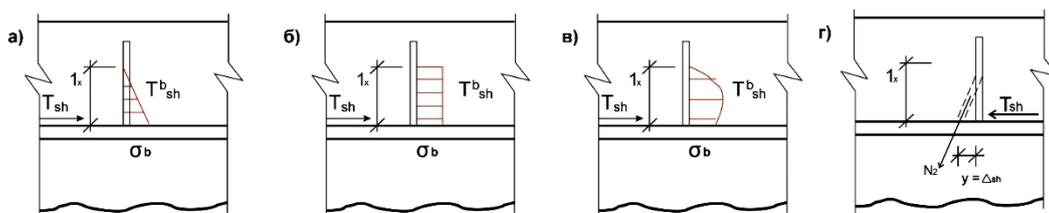


Рис.5 Работа анкерного стержня (иллюстрация авторов)
Fig.5 Operation of the anchor rod (illustration by the authors)

При совместном действии M и N образование шарнира пластичности будет происходить при меньших значениях сил, чем при рассмотрении M и N как отдельных воздействий.

При постепенном увеличении внешней силы (M и N) эпюры напряжений в сечении анкера, достигают предельной эпюры с шарниром пластичности, смещенной относительно оси стержня анкера. Исходя из условия совместного действия M и N , величина предельного момента растянуто-изогнутого стержня анкера круглого сечения (рис.6)

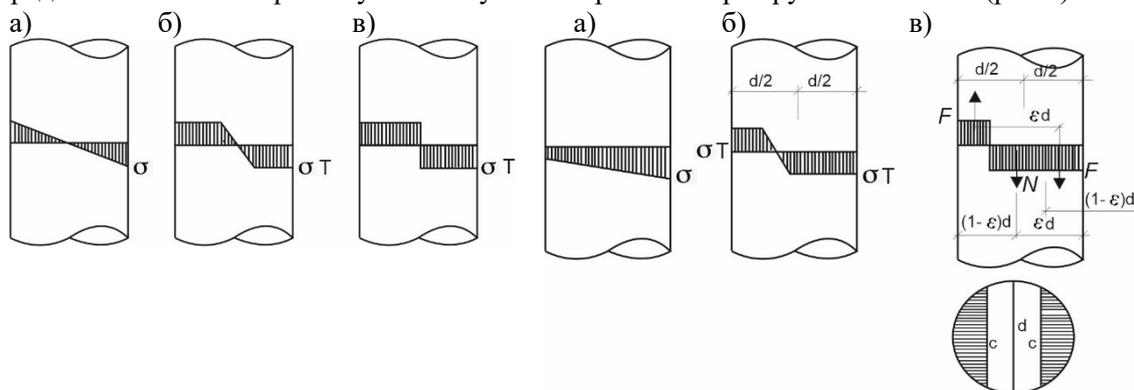


Рис.6 Эпюры напряжений растянуто-изогнутого анкерного стержня:

а) упругое, б) упругопластическое, в) пластическая работа (иллюстрация авторов)

Fig.6 Stress diagrams of a stretched-bent anchor rod: a) elastic, b) elastic-plastic, c) plastic work (illustration by the authors)

$$M_{\text{lim}}^N = F \xi d = \sigma_T A_{\text{seg}} \xi d = \sigma_T \frac{\pi c (1 - \xi) d}{4} \xi d = \sigma_T \frac{\pi c}{4} d^2 \xi (1 - \xi) \quad (24)$$

где $A_{\text{seg}} = \frac{\pi c b}{4}$; $c = 2\sqrt{2br - b^2}$; $b = r - \frac{1}{2}\sqrt{4r^2 - c^2}$; A_{seg} - площади сегментов.

Предельное продольное усилие растянуто-изогнутого анкера круглого сечения записывается в виде:

$$N_{\text{lim}}^M = \sigma_T \left(\frac{\pi d^2}{4} - 2 \frac{\pi c}{4} (1 - \xi) d \right) = \sigma_T \frac{\pi c (1 - \xi) d}{4} \xi d = \sigma_T \frac{\pi d}{4} [d - 2c(1 - \xi)] \quad (25)$$

$$\nu = \frac{N_{\text{lim}}^M}{N_T} = \frac{\sigma_T \pi d / 4 [d - 2c(1 - \xi)]}{\sigma_T \pi d^2 / 4} = \frac{d - 2c(1 - \xi)}{d} = 1 - \frac{2c}{d} (1 - \xi) \quad (26)$$

$$\mu = \frac{M_{\text{lim}}^N}{W_{pl} \sigma_T} = \frac{5 M_{\text{lim}}^N}{\pi d^3 \sigma_T} = 5 / 4 \pi c \frac{\xi (1 - \xi)}{d} \quad (27)$$

где ξd - относительное расстояние нейтральной линии от края сечения анкера.

Уравнение граничной кривой, определяющей область разрушения (достижения шарнира пластичности) от области безопасной работы анкерного стержня при одновременном действии М и N.

$$\nu^2 + \mu = 1; \quad \text{или} \quad \left(\frac{N_{\text{lim}}^M}{N_T} \right)^2 + \left(\frac{M_{\text{lim}}^N}{M_T} \right) = 1 \quad (28)$$

Формула проверки прочности вертикального анкерного стержня:

$$\left(\frac{N}{AR_{an}} \right)^2 + \frac{M}{W_{pl} R_{an}} \leq 1 \quad (29)$$

При смещении бетонной плиты относительно верхнего пояса стальной балки анкерный стержень изгибается в массиве бетона, а из-за значительных перемещений слоев анкерный стержень растягивается. Многие исследователи отмечают отрыв головки шпильки при экстремальных нагрузках. Согласно требованиям норм проектирования стальных и железобетонных конструкций расчет стержней, подвергающихся изгибу с растяжением, производится с учетом изгибающего момента и растягивающих усилий, по известным формулам, учитывающим растягивающие усилия и изгибающий момент.

3. Результаты и обсуждения

Нормы проектирования существующие на сегодня основанные на диаграммах напряжений упругой работы материалов (треугольная диаграмма) или пластической работы (прямоугольная эпюра) приводит к большим отклонениям в ту и другую сторону (рис.7)

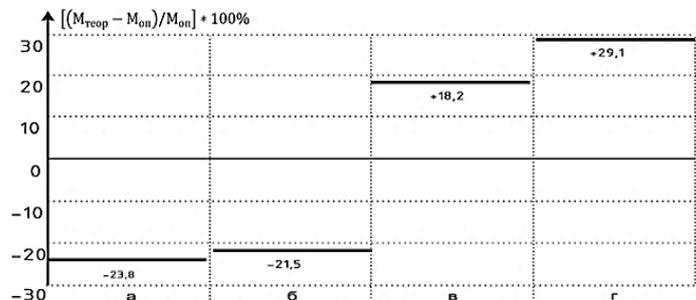


Рис.7. Сопоставление опытных и расчетных значений по действующим нормативным документам
 а) расчет по СП 35.13330.2011 Мосты и трубы; б) расчет по СП 266.1325800.2016;
 в) расчет как ЖБК с жесткой арматурой; г) расчет по EN 1994-1-1-2009 (Е).
 (иллюстрация авторов)

Fig.7. Comparison of experimental and calculated values according to current regulatory documents

- a) calculation according to SP 35.13330.2011 Bridges and pipes; b) calculation according to SP 266.1325800.2016; c) calculation as reinforced concrete structure with rigid reinforcement; d) calculation according to EN 1994-1-1-2009 (E) (illustration by the authors)

Приведенная методика расчета, основанная на предельной относительной деформации сжатого бетона дает лучшие результаты, расхождения результатов численных экспериментов от натуральных составляют [23]:

- по напряжениям до 9-11%;
- по несущей способности в пределах от 2% до 9%.

Сравнение аналитических результатов полученных расчетом по деформационной модели (криволинейная эпюра напряжений бетона в нормальном сечении) с данными экспериментов показало среднее отклонение в пределах от 0,1 до 7,63% или среднее – 3,04% (табл.1)[16].

Таблица 1

Сравнение аналитических результатов с данными экспериментов

Серии СЖБ балок	Значение отклонений теоретических данных от экспериментальных, %										Среднее значение
	СБ-1	СБ-2	СБ-3	СБ-4	СБ-5	СБ-6	СБ-7	СБ-8	СБ-9	СБ-10	
$M_1=2357$ кг*м (23,12кН*м)	0,43	3,75	5,23	1,65	2,0	0,1	7,63	2,76	4,72	2,18	3,04

где M_1 – значение изгибающего момента, рассчитанного аналитическим методом без учета податливости контакта «сталь-бетон».

4. Заключение

1. Показан анализ особенностей существующих конструктивных решений сталежелезобетонных перекрытий и новых конструкций перекрытий со стальным настилом и анкерных устройств защищенных патентами РФ.

2. Численными исследованиями по существующим нормам показаны значительные расхождения результатов по их несущей способности.

3. Разработаны новые методы оценки прочности сталебетонных перекрытий на основе предельной относительной деформации сжатия бетона (трапециевидная диаграмма) и криволинейной диаграммы напряжений бетона.

4. Расчет по предложенным методом расчета сталежелезобетонных конструкций и сравнения с экспериментальными данными показами значительное сближение результатов. Для метода на основе предельных относительных деформаций сжатия бетона результаты улучшились в два раза, т.е. опустились до 9%, для деформационного метода на основе криволинейных эпюр напряжений до 3,07%.

Список литературы/ References

1. Кибирева Ю.А., Астафьева Н.С. Применение конструкций из сталежелезобетона // Экология и строительство. 2018. №2. С. 27-34. DOI: 10.24411/2413-8452-2018-10004
Kibireva I.A., Astafeva N.S. The use of steel reinforced concrete structures. Ecology and Construction. 2018; No. 2. P. 27-34. DOI: 10.24411/2413-8452-2018-10004
2. Замалиев Ф.С., Тамразян А.Г. К расчету сталежелезобетонных ребристых плит для восстанавливаемых перекрытий Строительство и реконструкция. 2021. № 5 (97). С. 3-15.
Zamaliyev F.S., Tamrazyan A.G. To the calculation of steel reinforced concrete ribbed slabs for restored floors Construction and reconstruction. 2021. No. 5 (97). P. 3-15.
3. Travush, V. I., Konin D. V., Krylov A. S. Strength of composite steel and concrete beams of high-performance concrete // Magazine of Civil Engineering. – 2018. – No. 3 (79). – P.36-44. doi: 10.18720/MCE.79.4
4. Крылов С. Б., Семенов В.А., Конин Д.В., Крылов А.С., Рожкова Л.С. О новом

- руководстве по проектированию сталежелезобетонных конструкций (в развитие СП 266.13330.2016 Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования) // Academia. Архитектура и строительство. – 2019. – № 1. – С. 99-106. DOI 10.22337/2077-9038-2019-1-99-106
- Krylov S. B., Semenov V. A., Konin D. V., Krylov A S., Rozhkova L. S. On the new guide for the design of steel reinforced concrete structures (in development of SP 266.13330.2016 Steel reinforced concrete structures. Design rules) // Academia. Architecture and construction. - 2019. - No. 1. - P. 99-106. DOI 10.22337/2077-9038-2019-1-99-106
5. Jurkiewicz B., Braymand S. Experimental study of a pre-cracked steel-concrete composite beam // Journal of Constructional Steel Research. 2007; No. 63(1). P.135-144. DOI: 10.1016/j.jcsr.2006.03.013
 6. Тонких Г.П., Чесноков Д.А. Экспериментальное исследование сдвигового соединения монолитных сталежелезобетонных перекрытий на угловых анкерных упорах // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 2. С. 144–152. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.2.144-152
Tonkih G.P., Chesnokov D.A. Experimental study of a shear connection of steel reinforced concrete slabs with angle shear studs. Bulletin of MGSU. 2021; No. 16 Iss. 2. P. 144-152. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.2.144-152
 7. Теплова Ж.С., Виноградова Н.А. Сборно-монолитные перекрытия системы «МАРКО» // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. №8(35). С. 48–59. DOI: DOI: 10.18720/CUBS.35.4.
Teplova Zh.S., Vinogradova N.A. Precast-monolithic floors of the MARCO system // Construction of unique buildings and structures. 2015. No. 8 (35). P. 48–59.
 8. Сталежелезобетонное перекрытие: пат. 2785159 Рос. Федерация. №2022105225; заявл. 28.02.22 ;опубл. 05.12.22, Бюл. № 34
Steel reinforced concrete slabs: Patent 2785159 Russian Federation. No.2022105225; decl. 28/02/22; publ. 05/12/22, Bull. No 34
 9. Сталежелезобетонное перекрытие: пат. 2759524 Рос. Федерация. №2021100939; заявл. 18.01.21 ;опубл. 15.11.21, Бюл. № 32
Steel reinforced concrete slabs: Patent 2759524 Russian Federation. No.2021100939; decl. 18/01/21; publ. 15/11/21, Bull. No 32
 10. Сборно-монолитное перекрытие : пат. 171103 Рос. Федерация. №2017101737; заявл. 19.01.17 ;опубл. 22.05.17, Бюл. № 15
Prefabricated-monolithic overlap: Patent 171103 Russian Federation. No.2017101737; decl. 01/19/17; publ. 05/22/17, Bull. No. 15
 11. Lili Wu, Lipei An, Jiawei Li Shear Capacity of Open Sandwich Steel Plate-Concrete Composite Slab: Experimental and Analytical Studies. Advances in Civil Engineering. 2019. DOI: 10.1155/2019/4726538
 12. Сталежелезобетонное перекрытие: пат. 2823096 Рос. Федерация. №2024102448; заявл. 31.01.24;опубл. 18.07.24, Бюл. № 20
Steel reinforced concrete slabs: Patent 2823096 Russian Federation. No.2024102448; decl. 31/01/24; publ. 18/07/24, Bull. No 20
 13. Сталежелезобетонная балка : пат. 2755288 Рос. Федерация. № 2021100397; заявл. 11.01.21 ;опубл. 14.09.21, Бюл. № 26
Steel reinforced concrete beam: Patent 2755288 Russian Federation. No.2021100397; decl.11/01/21; publ.14/09/21, Bull. No 26
 14. Сталежелезобетонная балка: пат. 2751182 Рос. Федерация. № 2021100398; заявл. 11.01.21;опубл. 12.07.21, Бюл. № 20
Steel reinforced concrete beam: Patent 2751182 Russian Federation. No.2021100398; decl. 11/01/21; publ. 12/07/21, Bull. No 20
 15. Замалиев Ф. С. Эксперименты на сталежелезобетонных конструкциях по выявлению фактического напряженно-деформированного состояния, вплоть до их разрушения: сб. ст. VIII академических чтений РААСН – Международной научно-технической конференции / КГАСУ. Казань, 2014. С. 88-96.
Zamaliev F. S. Experiments on steel reinforced concrete structures to identify the actual

- stress-strain state, up to their destruction: Proceedings of VIII academic readings of RAACS - International Scientific and Technical Conference // KSUAE. Kazan, 2014. P. 88–96.
16. Замалиев Ф. С. Учет нелинейных свойств материалов и податливости слоев при расчете прочности сталежелезобетонных перекрытий // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 5. С. 38–41.
Zamaliyev F. S. Consideration of nonlinear properties of materials and the compliance of layers in the calculation of the strength of steel reinforced concrete slabs // Industrial and civil construction. 2013. No. 5. P. 38–41.
 17. Colajanni P., Mendola L.L., Monaco A. Review of push-out and shear response of hybrid steel-trussed concrete beams. Buildings. 2018; No. 8(10) P. 134. DOI: 10.3390/buildings8100134
 18. Ling Y., Zheng Z., Yang T.Y., Ma H. Behaviour and modeling of the bearing capacity of shear stud connectors // International Journal of Steel Structures. 2019. Vol. 19(2). P. 650–659. DOI: 10.1007/s13296-018-0154-3
 19. Alsharari, F., El-Sisi, A.E.-D., Mutnbak, M., Salim, H., El-Zohairy, A. Effect of the Progressive Failure of Shear Connectors on the Behavior of Steel-Reinforced Concrete Composite Girders (2022) Buildings, 12 (5), art. no. 596. DOI: 10.3390/buildings12050596
 20. Liu, W., Fang, Q., Chen, L., Li, Z., Zhang, Y., Xiang, H. Blast resistance of prestressed steel-grouting composite beams under close-in explosions: Experiment and numerical analysis (2022) Advances in Structural Engineering, No. 25 (7), P. 1519-1534. DOI: 10.1177/13694332221092676
 21. B.Shi, W.Zhu, H.Yang, W.Liu, H.TaoZ. Ling Experimental and theoretical investigation of prefabricated timber-concrete composite beams with and without prestress // Engineering Structures Vol. 204, 2020, 109901 DOI:10.1016/j.engstruct.2019.109901
 22. Qiang X., Chen, L., Jiang, X. Flexure tests on steel-concrete composite beams strengthened with prestressed CFRP plates by string system (2022) Fuhe Cailiao Xuebao /Acta Materiae Compositae Sinica, No. 39 (11), P. 5135-5147. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20220629.004
 23. Замалиев Ф.С., Тамразян А.Г. Оценка несущей способности сталебетонных балок на основе гнутых профилей // Вестник МГСУ – 2023. – №8 т.18. – С. 1220-1229.
Zamaliyev F.S., Tamrazyan A.G. Assessment of the bearing capacity of steel reinforced concrete beams based on bent sections // Bulletin of MGSU - 2023. – No. 8. Vol. 18. – P. 1220-1229
 24. Мирсаяпов Илшат Т., Гиматдинов И.М. Экспериментальное исследование сцепления стального двутавра с бетоном в сталебетонной балке // Сборник тезисов докладов Международной научной конференции «Железобетонные и каменные конструкции: настоящее и будущее». – Казань: Издательство КГАСУ. – 2024. – 82 с.
Mirsayapov Ilshat T., Gimatdinov I.M Experimental study of adhesion of steel I-beam to concrete in a steel reinforced concrete beam // Collection of abstracts of reports of the World Scientific Conference “Reinforced Concrete and Stone Structures: Present and Future”. – Kazan: KSUAE Publishing House. – 2024. – 82 p.
 25. Мирсаяпов Илшат Т., Трунов А.Н. Конструктивные решения плит перекрытия с цилиндрическими пустотами // Сборник тезисов докладов Международной научной конференции «Железобетонные и каменные конструкции: настоящее и будущее». – Казань: Издательство КГАСУ. – 2024. – 86 с.
Mirsayapov Ilshat T., Trunov A.N. Design solutions for floor plates with cylindrical voids // Collection of abstracts of the International Scientific Conference “Reinforced Concrete and Stone Structures: Present and Future”. – Kazan: KSUAE Publishing House. – 2024. – 86 p.

Информация об авторах

Тамразян Ашот Георгиевич, доктор технических наук, профессор, член корр. РААСН, Московский государственный строительный университет, Москва, Россия,
E-mail: tamrazian@mail.ru, ORCID: 0000-0003-0569-4788

Замалиев Фарит Сахапович, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно – строительный университет, Казань, Россия,
E-mail: zamaliev49@mail.ru, ORCID: 0000-0002-3563-2994

Information about the authors

Ashot G. Tamrazyan, Doctor of Technical Sciences, Professor, Associate Member of RAACS, National Research Moscow State Civil Engineering University, Moscow, Russia

E-mail: tamrazian@mail.ru, ORCID: 0000-0003-0569-4788

Farit S. Zamaliev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russia

E-mail: zamaliev49@mail.ru, ORCID: 0000-0002-3563-2994