

УДК 693.564.3

ББК 38.53

К 93

Кургин Константин Васильевич, аспирант ФГБОУ ВПО «Ростовский государственный строительный университет»;

Маилян Дмитрий Рафаэлович, профессор кафедры железобетонных конструкций ФГБОУ ВПО «Ростовский государственный строительный университет»;

Блягоз Алик Моссович, кандидат технических наук, доцент кафедры строительных и общепрофессиональных дисциплин технологического факультета Майкопского государственного технологического университета, e-mail: alfa-maikop@yandex.ru

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАСЧЕТА ПРОЧНОСТИ
КЕРАМЗИТОФИБРОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СО СМЕШАННЫМ
АРМИРОВАНИЕМ**

(рецензирована)

В статье рассматриваются вопросы, связанные с методикой расчета прочности керамзитовых элементов со смешанным армированием при наиболее полном учете работы преднапряженной и ненапрягаемой арматуры за условным пределом текучести, а также влияния преднапряжения на свойства керамзитового бетона.

Ключевые слова: сечение трубобетонной колонны, коэффициент упрочнения бетона, предел прочности трубобетонного элемента, несущая способность.

Kurgin Konstantin Vasilyevich, post graduate student of FSBEI HPE "Rostov State University of Civil Engineering";

Mailyan Dmitry Rafaelovich, professor of the Department of Metal -concrete Structures FSBEI HPE "Rostov State University of Civil Engineering";

Blyagoz Alec Mossovich, Candidate of Technical Sciences, assistant professor of the Department of Construction and General Professional Disciplines of the Technological Faculty of Maikop State Technological University, e-mail: alfa-maikop@yandex.ru.

**IMPROVING THE CALCULATION OF THE STRENGTH OF CERAMSYT-
FIBRECONCRETE ELEMENTS WITH MIXED REINFORCEMENT**

(reviewed)

The article discusses issues related to the procedure of calculating the strength of ceramsyt-fibreconcrete elements with mixed reinforcement in the most full account of the pre-stressed and un-straining reinforcement beyond the conventional fluidity limit and the effect of pre-stressing on the properties of fibreconcrete.

Keywords: tube-concrete column cutting, the coefficient of concrete hardening, strength limit of the tube-concrete element, bearing capacity.

В основу разработанного метода расчета положен полный учет работы преднапряженной и ненапрягаемой арматуры за условным пределом текучести, а также влияние преднапряжения на свойства керамзитобетона.

Для этого необходимо использовать аналитические зависимости, описывающие полные фактические диаграммы растяжения высокопрочной арматуры и влияния на них предварительного напряжения. Отмеченное позволяет при расчете отказаться от определения случая расчета и коэффициента, учитывающего работу арматуры за условным пределом текучести.

В настоящее время существует много предложений по аналитическому описанию диаграмм деформирования сталей [1-5], из которых были выбраны зависимости, полученные в РГСУ [4,5].

Эти зависимости отличаются универсальностью, т.к. пригодны для любых видов стали, простотой и высокой точностью.

Согласно [5] диаграмма деформирования стали разбивается на два участка – упругой (от 0 до σ_{el}) и неупругой (от σ_{el} до σ_u) работы. На участке от предела упругости σ_{el} до временного сопротивления σ_u стали аналитическое описание диаграммы деформирования имеет вид:

$$\sigma_s = S - K \frac{l_n 10(\varepsilon_s 10^3 + L)}{\varepsilon_s 10^3 + L}, \quad (1)$$

где $S = \sigma_{0.2} (1,475 \sigma_u / \sigma_{0.2} - 0,475) - 30$; (2)

$$K = 3700 \left[\frac{\sigma_{0.2}(\sigma_u / \sigma_{0.2} - 1) + 150}{1000} \right]^2 - 96, \quad (3)$$

$$L = \sigma_{0.2} \left[\frac{12.5(\sigma_u / \sigma_{0.2} - 1)}{1000} - \frac{1000}{E_s} \right] + 0.96, \quad (4)$$

Зависимость между деформациями и напряжениями на участке предела упругости стали до развития в ней деформаций до 1,5% может быть представлена в виде:

$$\varepsilon_s \cdot 10^3 = \frac{K_0}{A - \sigma_s} - D + \frac{\sigma_s(1.9 \cdot 10^5 - E_s)}{190 \cdot E_s}, \quad (5)$$

где $K_0 = 2.931 \cdot 10^{-2} (\sigma_u / \sigma_{0.2} - 1)^2 \sigma_{0.2}^2 + 84$, (6)

$$A = (1.186\sigma_{0.2} - 231) \cdot (\sigma_u / \sigma_{0.2} - 0.5)^2 + 0.675 \cdot \sigma_{0.2}^2 + 70, \quad (7)$$

$$D = 0.01 \cdot \sigma_{0.2} (1.6 \cdot \sigma_u / \sigma_{0.2} - 2.126) + 0.813, \quad (8)$$

В формулы (1)-(8) значения напряжений и модуля упругости подставляются в МПа.

Из выражений (1)-(8) видно, что параметры S, K, L, K_0, A, D зависят от известных характеристик стали $\sigma_{0.2}; \sigma_u; E_s$ поэтому для каждого вида стали могут быть легко определены. После подстановки численных значений характеристик стали в выражения (2)-(4) и (6)-(8) параметры S, K, L, K_0, A, D для каждого вида стали получают определенные численные значения, а формула (1) и (5) существенно упрощаются.

При предварительном напряжении или повторном нагружении арматуры вследствие выбора пластических деформаций значения условных пределов упругости и текучести повышаются. В предельно растянутой до напряжения σ_{sp} арматуре напряжения с течением времени снижаются за счет потерь от релаксации напряжений σ_1 и остальных видов потерь, суммарное значение которых обозначим σ_{los} . В состоянии установившихся преднапряжений σ_{sp2} в арматуре A_{sp} выбранные пластические деформации составят $\varepsilon_{sp,pl} + \sigma_1 / E_s$, где $\varepsilon_{sp,pl}$ - пластическая деформация стали при ее напряжении до уровня, превышающего предел упругости σ_{el} . При приложении внешнего растягивающего усилия диаграмма может быть принята линейной до точки пересечения с исходной кривой. Эта точка соответствует новому повышенному значению предела упругости σ'_{el} . Деформация, соответствующая этому напряжению:

$$\varepsilon'_{el} = \varepsilon_{sp} + \Delta\varepsilon_s, \quad (9)$$

или согласно [5]

$$\varepsilon'_{el} = \varepsilon_{sp} + 7.7 \cdot 10^{-7} \sigma_{0.2}, \quad (10)$$

Новое значение предела упругости можно определить по формуле (1) при $\varepsilon_s = \varepsilon'_{el}$, а новое значение условного предела текучести по формуле [5]:

$$\sigma'_{0.2} / \sigma_{0.2} = 1 + (\sigma_u / \sigma_{0.2} - 1) \cdot \left(\frac{0.127}{1.2214 - \sigma_{0.2}} - 0.157 \right). \quad (11)$$

Определим напряжения в арматуре при воздействии внешней нагрузки на элемент, содержащий предварительно растянутую A_{sp} , и ненапрягаемую A_s арматуру. Исходным условием является равенство приращений деформаций от внешней нагрузки во всей арматуре, расположенной на одинаковом расстоянии от наиболее сжатой грани. При разном расстоянии арматуры от указанной грани (не однорядном армировании) взаимосвязь между приращениями деформаций предварительно растянутой (ε_{sp}^N), и ненапрягаемой (ε_s^N) арматуры выражается следующим образом:

$$\frac{\varepsilon_b + \varepsilon_{sp}^N}{h_{op}} = \frac{\varepsilon_b + \varepsilon_s^N}{h_{os}}, \quad (12)$$

где h_{op} и h_{os} - расстояния от наиболее сжатой грани элемента до равнодействующих усилий в указанных видах арматуры.

В арматуре, расположенной в зоне, растянутой от внешней нагрузки перед приложением внешней нагрузки напряжения будут равны: в предварительно растянутой арматуре - σ_{sp2} (точка A_1 на рис. 1), а в ненапрягаемой - σ_{so} (точка B_1).

Если принять приращение деформаций от внешней нагрузки во всей арматуре одинаковым и равным ε_s^N , то суммарные деформации составят:

$$\text{в арматуре } A_{sp} \text{ (точка } A \text{ на рис. 1) - } \varepsilon_s = \varepsilon_{sp2} + \varepsilon_s^N; \quad (13)$$

$$\text{в арматуре } A_s \text{ (точка } B) \text{ - } \varepsilon_{sp} = \varepsilon_s^N - \varepsilon_{so}; \quad (14)$$

Соответствующие этим деформациям напряжения σ_s и σ_{sd} .

Приращение деформаций в арматуре при разрушении сжатой зоны элемента выражается известной зависимостью:

$$\varepsilon_s^N = \frac{\varepsilon_{bu}}{1 - \omega/1.1} \left(\frac{\omega}{\xi} - 1 \right), \quad (15)$$

а напряжения при упругой работе и учете преднапряжения σ_{s2} - по формуле норм

$$\bar{R}_s = \sigma_{sc,u} / (1 - \omega / 1.1), \quad (17)$$

Входящая в выражение (13) деформация

$$\varepsilon_{sp2} = \varepsilon_{sp} - (\sigma_{los} - \sigma_1) / E_s, \quad (18)$$

где ε_{sp} при $\sigma_{sp} > \sigma_{el}$ определяется по формуле (5) принимая $\sigma_s = \sigma_{sp}$, а при $\sigma_{sp} \leq \sigma_{el}$ деформация $\varepsilon_{sp} = \sigma_{sp} / E_s$.

Деформации ненапрягаемой арматуры $\varepsilon_{so} = \sigma_{so} / E_s$, где σ_{so} - численно равно потерям преднапряжений.

Напряжения в арматуре A_{sp} после приложения внешней нагрузки при $\sigma_s \leq \sigma'_{el}$ составляет

$$\sigma_s = (\varepsilon_{sp2} - \varepsilon_{sp,pl} - \sigma_1 / E_s + \varepsilon_s^N) E_s = [\varepsilon_{sp} - (\sigma_{los} - \sigma_1) / E_s - \varepsilon_{sp} + \sigma_{sp} / E_s - \sigma_1 / E_s + \varepsilon_s^N] E_s,$$

или

$$\sigma_s = \bar{R}_s (\omega / \xi - 1) + \sigma_{sp2}, \quad (19)$$

получена известная формула норм.

При $\sigma_s > \sigma'_{el}$ суммарная деформация арматуры A_{sp} согласно (13), (17) и (18)

составит

$$\varepsilon_s = \bar{R}_s (\omega / \xi - 1) / E_s + \varepsilon_{sp} - (\sigma_{los} - \sigma_1) / E_s, \quad (20)$$

где ε_{sp} определяется по формуле (5) $\sigma_s = \sigma_{sp}$.

Напряжение, соответствующее деформации ε_s определяется по формуле (1).

В ненапрягаемой арматуре A_s суммарная деформация согласно (14), (15), (17) равна

$$\varepsilon_{sd} = \bar{R}_s (\omega / \xi - 1) / E_s - \sigma_{so} / E_s, \quad (21)$$

Соответствующие напряжения при $\sigma_{sp} \leq \sigma_{el}$ равны

$$\sigma_{sd} = \bar{R}_s (\omega / \xi - 1) - \sigma_{so}, \quad (22)$$

При неупругой работе ($\sigma_{sd} > \sigma_{el}$) они определяются по формуле (1), при деформациях по (21).

В арматуре, расположенной в сжатой от внешней нагрузки зоне (рис. 2), к установившимся напряжениям σ'_{sp2} (точка А₁) и σ'_{so} (точка Б₁) добавляются сжимающие напряжения от внешней нагрузки, соответствующие деформациям ε_s^N .

В арматуре A'_{sp} к растягивающим напряжениям добавляются сжимающие напряжения, поэтому она работает упруго и суммарные напряжения (точка А) определяются по формуле (19). При этом следует учесть, что для арматуры, расположенной в сжатой зоне, первый член правой части этого выражения отрицателен и его наибольшее значение равно $\sigma_{sc} = -\sigma_{sc,u} + \sigma_{sp2}$.

В ненапрягаемой арматуре A'_s деформации ε'_{sd} (точка Б) определяются по формуле (21), а напряжения при $\sigma'_{sp} \leq \sigma_{el}$ - по формуле (22). При $\sigma'_{sp} \leq \sigma_{el}$ напряжения σ'_{sp} определяются по формуле (1).

В арматуре сжатой зоны сечения напряжения при разрушении элемента достигает расчетного сопротивления при $x/a' \geq 2$, где a' - расстояние от сжатой грани до оси продольной арматуры. Это условие в сжатых элементах, как правило, всегда выполняется.

В случае же его нарушения в интервалах $1 < x/a' < 2$ деформации в арматуре изменяются по линейному закону

$$\varepsilon_{sc} = \varepsilon_{bu} (\xi h_0 / a' - 1) \leq \varepsilon_{bu}, \quad (23)$$

Напряжения в указанном интервале составят:

$$\text{в арматуре } A'_{sp} \quad \sigma_{sc} = \sigma_{sp2} - \sigma_{sc,u} (\xi h_0 / a_p' - 1) \quad (24)$$

в арматуре A'_s напряжения равны

$$\sigma'_{sd} = -\sigma'_{su} - \sigma_{sc,u} (\xi h_0 / a_s' - 1) \quad (25)$$

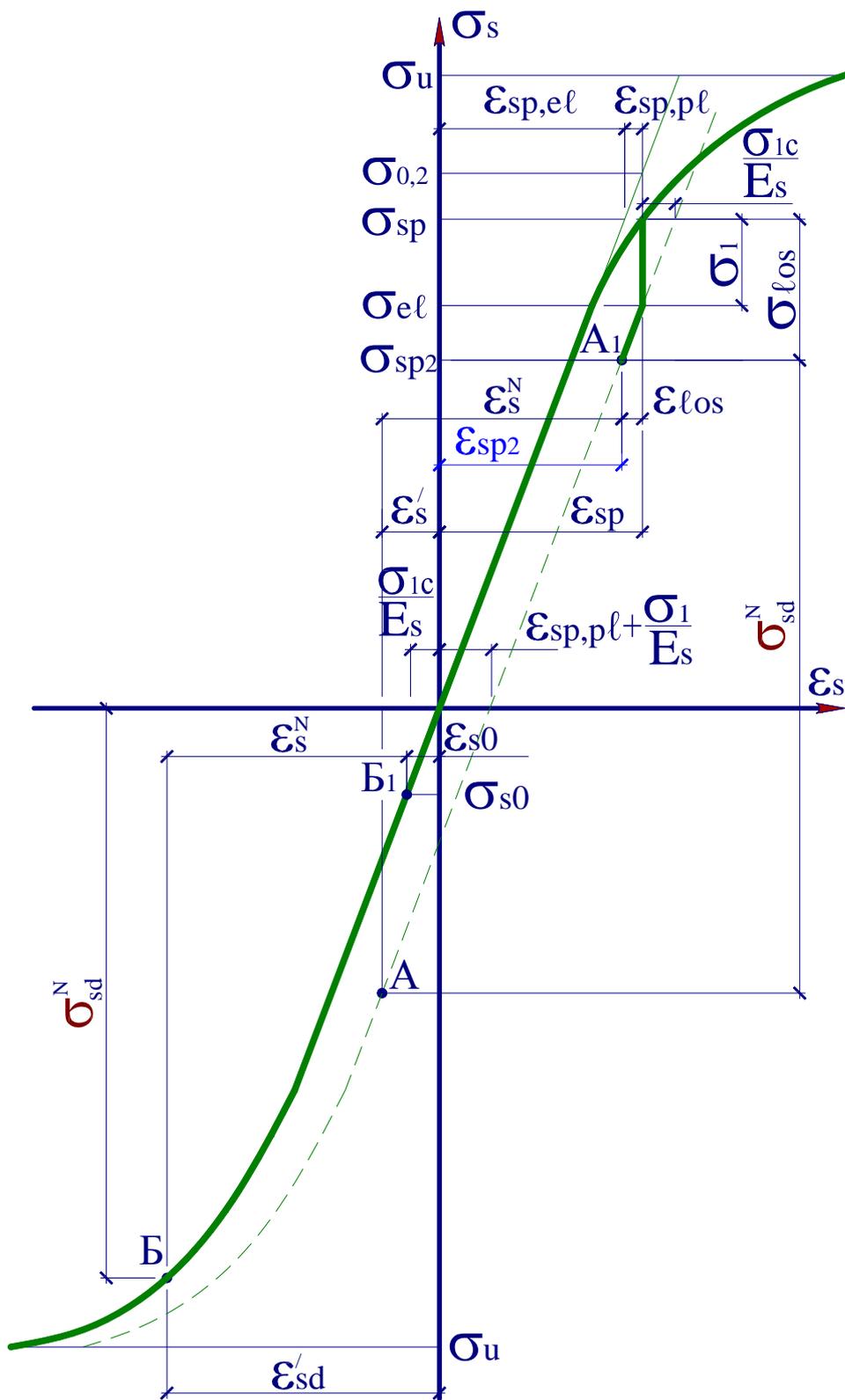


Рис.2 Напряжения в предварительно напряженной и ненапрягаемой арматуре при ее расположении в сжатой от внешней нагрузки зоне сечения

В формулах (24)-(25) a'_p и a'_s - расстояние от продольных осей арматуры A'_{sp} и A'_s до наиболее сжатой грани.

Приведенные выражения для определения напряжения в арматуре используются в уравнениях равновесия. Первое из них – уравнение моментов относительно линии действия равнодействующей внешних сил служит для определения высоты сжатой зоны сечения и напряжений в арматуре растянутой (или менее сжатой) зоны сечения. Второе – уравнение моментов относительно оси, проходящей через точку приложения равнодействующей усилия в арматуре растянутой зоны применяют для определения несущей способности элемента.

При разрушении сжатого элемента напряжения в арматуре наиболее сжатой зоны при достаточно большом значении ее высоты ($x \geq 2a'$) получают максимальное приращение $\sigma_{sc,u}$ и составят:

в предварительно растянутой $A_{s(2)}$ -

$$\sigma_{s(2)} = \sigma_{sc,u} - \sigma_{s2(2)} \quad (26)$$

в ненапрягаемой $A_{s(4)}$ -

$$\sigma_{s(4)} = \sigma_{sc,u} - \sigma_{s2(4)} \quad (27)$$

В выражении (27) напряжения $\sigma_{s2(4)}$ являются сжимающими и вводятся со знаком (-), поэтому суммарные напряжения $\sigma_{s(4)}$ увеличиваются.

Уравнение моментов относительно линии действия внешней силы примет вид:

$$\sigma_{s(1)}S_{(1)} + \sigma_{s(3)}S_{(3)} = \gamma_{Rb} R_b b x (e + 0.5x - h_{oz}) + (\sigma_{sc,u} - \sigma_{s2(4)})S_{(4)} + (\sigma_{sc,u} - \sigma_{s2(2)})S_{(2)}, \quad (28)$$

где $S_{(i)} = A_{s(i)}(e + a_z - a_{(i)})$ при $i = 1; 3.$

$S_{(i)} = A_{s(i)}(e_2 + a_{(i)})$ при $i = 2; 4.$

γ_{Rb} - коэффициент условия работы бетона, учитывающий предысторию нагружения.

При упругой работе арматуры растянутой зоны выражения для напряжений согласно (16) и (17) представим в виде:

$$\sigma_{s(1)} = \left[\overline{R}_s \omega h_{0(1)} + x(\sigma_{s2(1)} - \overline{R}_s) \right] / x, \quad (29)$$

$$\sigma_{s(3)} = [\bar{R}_s \omega h_{0(3)} + x(\sigma_{s2(3)} - \bar{R}_s)] / x, \quad (30)$$

Подставляя (29)-(30) в (28), после преобразований получаем кубическое уравнение

$$Ax^3 + Bx^2 + Cx + D = 0, \quad (31)$$

$$\text{где } A = 0.5R_b b \quad (32)$$

$$B = \gamma_{Rb} R_b b (e - h_{oz}) \quad (33)$$

$$C = SL - SK$$

$$SL = \sigma_{sc,u} (S_{(4)} + S_{(2)}) - \sigma_{s2(4)} S_{(4)} - \sigma_{s2(2)} S_{(2)}, \quad (34)$$

$$SK = \sigma_{s2(1)} S_{(1)} + \sigma_{s2(3)} S_{(3)} - \bar{R}_s (S_{(1)} + S_{(3)}), \quad (35)$$

$$D = -\bar{R}_s \omega (S_{(1)} h_{0(1)} + S_{(3)} h_{0(3)}), \quad (36)$$

Определив из (28) значение x , а из (29)-(30) $\sigma_{s(1)}$, $\sigma_{s(3)}$, последние сравниваются с новыми значениями пределов упругости стали σ'_{el} . Если хотя бы одно из напряжений превышает σ'_{el} , то производится определение нового значения напряжений. Для этого по формуле (20) определяется деформация $\varepsilon_{s(i)}$, а по ней согласно формуле (1) напряжение $\sigma_{s(i)}$. После определения напряжений $\sigma_{s(1)}$ и $\sigma_{s(3)}$ и их подстановки в уравнение (28) последнее приводится к квадратному уравнению

$$Ax^2 + Bx + C = 0, \quad (37)$$

из которого определяется новое значение x , после чего вновь определяются значения $\sigma_{s(1)}$ и $\sigma_{s(3)}$.

Несущая способность элемента определяется при $x \geq 2a'$ и $x \leq 0$ (с подстановкой $x=0$) по формуле

$$N = 1/e [R_b \gamma_{Rb} x b (h_{oz} - 0.5x) + A_{s(2)} (\sigma_{sc,u} - \sigma_{s2(2)}) (h_{oz} - a_{(2)}) + A_{s(4)} (\sigma_{sc,u} - \sigma_{s2(4)}) (h_{oz} - a_{(4)})], \quad (38)$$

а при $0 > x > 2a'$ - по формуле

$$N = 1/e (R_b \gamma_{Rb} x b (h_{oz} - 0.5x) + A_{s(2)} [\sigma_{sc,u} (x/a_{(2)} - 1) - \sigma_{s2(2)}] (h_{oz} - a_{(2)}) + A_{s(4)} [\sigma_{sc,u} (x/a_{(4)} - 1) - \sigma_{s2(4)}] (h_{oz} - a_{(4)})), \quad (39)$$

Приведенная методика расчета прочности сжатых элементов со смешанным армированием реализована по программе расчета на ЭВМ.

Литература:

1. Байков В.Н. Напряженно-деформированное состояние железобетонных элементов на базе обобщенных экспериментальных зависимостей физико-механических характеристик бетона и арматуры // Вопросы прочности, деформативности и трещиностойкости железобетона. Ростов н/Д, 1980. Вып.8.
2. Гуца Ю.П. Об учете неупругих деформаций бетона и арматуры в расчете железобетонных конструкций // Совершенствование конструктивных форм, методов расчета и проектирования железобетонных конструкций. М.: НИИЖБ, 1983. С. 11-18.
3. Мадатян С.А. Технология натяжения арматуры и несущая способность железобетонных конструкций. М.: Стройиздат, 1980. 196с.
4. Маилян Р.Л., Мекеров Б.А. Методика учета эффекта преднапряжения при расчете прочности железобетонных элементов // Бетон и железобетон. 1983. №9. С.28-30.
5. Мекеров Б.А., Маилян Р.Л. Аналитические описания для диаграммы растяжения высокопрочной арматурной стали // Новые виды арматуры и ее сварка: сб. докл. Всесоюз. совещания в Волгограде. 1982. С.166-171.

6. References:

1. Baikov V.N. *Strained -deformed state of reinforced concrete elements on the basis of generalized experimental dependences of physical and mechanical properties of concrete and reinforcement // Issues of strength, deformability, and crack resistance of reinforced concrete, Issue 8. Rostov n / D, 1980. Iss.8.*
2. Guscha Y.P. *On the inclusion of inelastic deformation of concrete and reinforcement in the calculation of reinforced concrete structures // Improved design of forms, methods of calculation and design of concrete structures. M.: SRIMC. 1983. P. 11-18.*
3. Madatyan S.A. *Reinforcement tension technology and bearing capacity of metal-concrete structures. M.: Stroiiizdat. 1980. 196 p.*
4. Mailyan R.L., Mekerov B.A. *Regarding the effect of pre-stressing in the calculation of the strength of metal-concrete elements // Concrete and metal concrete. 1983. № 9. P.28-30*
5. Mekerov B.A., Mailyan R.L. *Analytical description for a chart of tension of high-solid reinforcement steel // New types of reinforcement and its welding: collection of reports of All-Union Conference in Volgograd. 1982. P.166-171*