

## Совершенствование методики построения расчетной диаграммы сжатия для бетона с косвенным армированием сварными сетками

*И.К. Манаенков*

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет*

**Аннотация:** Установка косвенного армирования поперечными сварными сетками является одним из эффективных способов повышения прочностных и деформационных характеристик сжатого бетона. При выполнении инженерных расчетов конструкций с косвенным армированием для обеспечения требуемой надежности приходится использовать расчетные значения прочности материалов. При этом изначально расчетные формулы выводились и анализировались для экспериментальных средних значений прочности, которые существенно выше расчетных. По результатам выполненных расчетов установлено, что простая подстановка в формулы расчетных значений прочности приводит к получению завышенных значений прочности и предельной сжимаемости бетона с косвенным армированием и построению некорректных диаграмм сжатия.

**Ключевые слова:** косвенное армирование, сварные сетки, объемное напряженное состояние, диаграмма работы на сжатие, тяжелый бетон.

### Введение

На современном этапе развития человечества одним из наиболее широко применяемых строительных материалов является железобетон. В этой связи не теряет своей актуальности задача совершенствования конструктивных решений и методик расчета железобетонных конструкций. Накопленный экспериментальный опыт [1-3] свидетельствует о том, что установка косвенного армирования является одним из конструктивных решений, позволяющих значительно повысить прочностные и деформационные характеристики сжатого бетона в конструкциях (рис. 1). Это происходит за счет того, что косвенное армирование препятствует поперечному расширению бетона при сжатии, тем самым создавая объемное напряженное состояние трехосного обжатия.

Исследователями предлагаются различные варианты косвенного армирования, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки в зависимости от напряженно-деформированного состояния элемента и

условий эксплуатации: поперечные сварные сетки [4,5], трубобетон [6,7], спиральное армирование [8], обойма из композитных материалов [9] и др.

Ввиду большого разнообразия конструктивных решений косвенного армирования, одним из наиболее удобных инструментов расчета, предлагаемых российскими нормами проектирования (СП 63.13330.2012), является нелинейная деформационная модель, которая обеспечивает единый подход к расчетам конструкций по 1 и 2 группам предельных состояний, подходит для различных форм поперечного сечения и распределения армирования в нем. При этом важным этапом является выбор и построение расчетной диаграммы  $\sigma$ - $\epsilon$ , наиболее полно учитывающей действительный характер работы материала в конструкции [10-12].

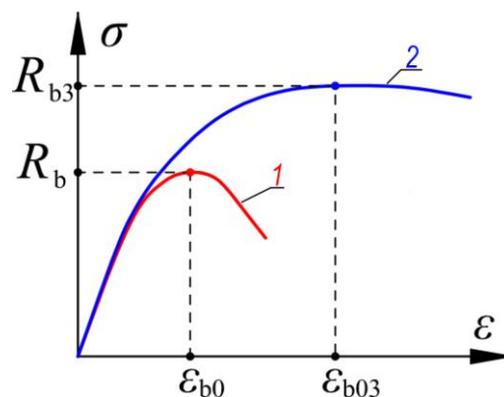


Рис. 1. – Диаграмма работы бетона в условиях бокового обжатия (2) и без (1)

Построение диаграммы требует определения характерных параметрических точек, наиболее важной из которых для бетона является напряжение в вершине диаграммы  $R_b$  и соответствующие ему относительные деформации  $\epsilon_{b0}$ . Но для конструкций с косвенным армированием при выполнении расчетов в рамках теории предельных состояний [13] и определении расчетных значений  $R_{b3}$  и  $\epsilon_{b03}$  возникает ряд сложностей, рассмотрению которых для случая армирования поперечными сварными сетками и посвящена данная статья.

## Материалы и методы

Для определения координат вершины диаграммы сжатия ( $\varepsilon_{b03}$ ;  $R_{b3}$ ) для бетона с косвенным армированием российские нормы проектирования предлагают зависимости:

$$\left. \begin{aligned} R_{b3} &= R_b + \varphi \cdot \mu_{xy} \cdot R_{s,xy}; \\ \varepsilon_{b03} &= \varepsilon_{b0} + 0,02 \cdot \alpha_{red}; \\ \varphi &= 1/(0,23 + \alpha_{red}); \\ \alpha_{red} &= \mu_{xy} \cdot R_{s,xy} / (R_b + 10) \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где  $R_b$  – призменная прочность бетона;  $R_{s,xy}$  – прочность стержней косвенного армирования на растяжение;  $\mu_{xy}$  – коэффициент косвенного армирования.

В работе [4] для этих целей предлагаются зависимости (2):

$$\left. \begin{aligned} R_{b3} &= \left[ \frac{1 - \rho_{xy}}{2} + \sqrt{\left( \frac{1 - \rho_{xy}}{2} \right)^2 + 9\rho_{xy}} \right] R_b; \\ \rho_{xy} &= \psi_b \mu_{xy} R_{s,xy} / R_b; \\ \varepsilon_{b03} &= \varepsilon_{b0} e^n; \\ n &= (2,9224 - 0,00408 R_b) (0,9 \sigma_{b,xy} / R_b)^{(0,3124 + 0,0022 R_b)} \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где  $\psi_b$  – коэффициент неравномерности бокового обжатия бетонного ядра (для косвенного армирования сварными сетками  $\psi_b = 0,375$ ).

Также в статье показано лучшее соответствие экспериментальным данным результатов расчета по формулам (2) (относительно формул из СП 63.13330.2012) на большинстве рассмотренных диапазонов конструктивных параметров.

Нужно отметить, что экспериментальные данные [1,4,5] свидетельствуют о том, что для бетонов с более низкой прочностью косвенное армирование эффективнее повышает прочность на сжатие и предельную сжимаемость при одном и том же коэффициенте армирования. Это соответствует результатам расчетов по формулам (1) и (2), полученным в

работе [14]. При этом СП 63.13330.2012 для расчетов по 1 группе предельных состояний предписывает использовать расчетные значения прочности  $R_b$  и  $R_s$ , которые существенно меньше, чем средние экспериментальные значения прочности  $R_{bm}$  и  $R_{sm}$ , на основании которых изначально выводились и анализировались зависимости. Ввиду вышесказанного возникает противоречие, которое может приводить к тому, что простая подстановка в формулы (1) и (2) расчетных значений прочности может привести к получению завышенных значений несущей способности и предельной сжимаемости бетона с косвенным армированием. Ранее в исследовании [15] отмечалось, что переход от средних экспериментальных значений к расчетным значениям прочности и подстановка их в формулы для бетона с косвенным армированием приводит к существенному превышению расчетной предельной сжимаемости относительно реально зафиксированной в экспериментах.

Расчетные значения прочности  $R_b$  вычисляют в результате деления нормативных значений  $R_{bn}$  на коэффициент надежности по материалу  $\gamma_m$ :

$$R_b = R_{bn} / \gamma_m. \quad (3)$$

Переход от экспериментальных средних значений прочности бетона для достаточно большой выборки образцов производят через коэффициент вариаций  $\nu$ , который в расчетах часто принимается равным 13,5% (по результатам статистической обработки результатов контроля качества на заводах ЖБИ):

$$R_{bn} = R_{bm} (1 - 1,64\nu). \quad (4)$$

Были произведены расчеты прочностных и деформационных параметров для бетонов классов по прочности на сжатие В20...В60 при коэффициентах косвенного армирования  $\mu_{xy}=0,5...5\%$ . При этом значения  $R_{b3}$  и  $\epsilon_{b03}$  по формулам (1) и (2) для последующего сравнения вычислялись как по расчетным значениям прочности  $R_b$ , так и по средним значениям  $R_{bm}$ . Для

---

случая вычисления прочности бетона с косвенным армированием  $R_{b3m}$  по средним значениям прочности исходного бетона в дальнейшем выполнялся переход к расчетным расчет  $R_{b3}$  через коэффициент вариаций  $\nu=13,5\%$  и коэффициент надежности по бетону  $\gamma_m=1,3$  по формулам (4) и (3). Косвенное армирование поперечными сварными сетками принято из арматуры класса В500 ( $R_{sn}=500$  МПа;  $R_s=435$  МПа). Результаты расчетов в формате графиков представлены на рис. 2 и рис. 3.

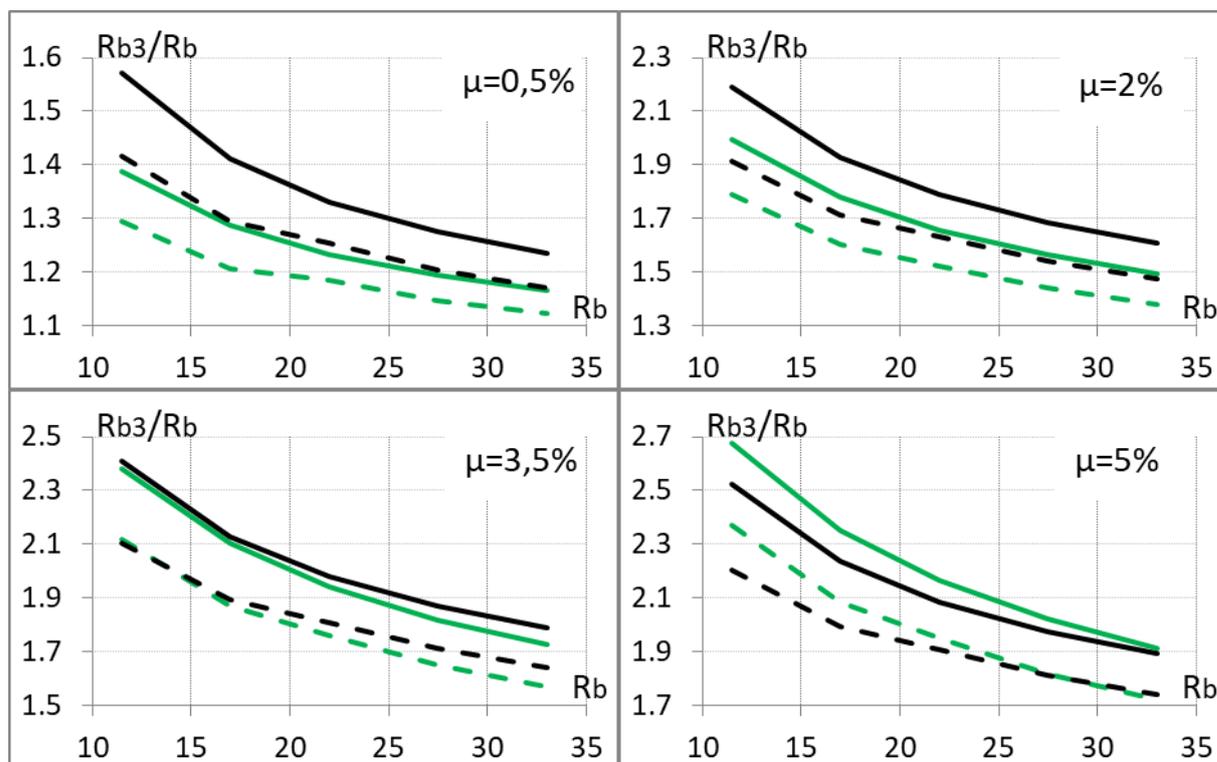


Рис. 2. – Зависимость роста несущей способности от расчетного значения призмной прочности  $R_b$ :

- —  $R_{b3}/R_b = f(R_b)$  по формулам (1); — — — —  $R_{b3}/R_b = f(R_{bm})$  по формулам (1);
- — — —  $R_{b3}/R_b = f(R_b)$  по формулам (2); — — — —  $R_{b3}/R_b = f(R_{bm})$  по формулам (2)

По результатам расчетов для рассмотренных диапазонов конструктивных параметров увеличение прочности бетона составило:

- по формулам (1) от 1,23 до 2,52 раз при вычислениях на основе расчетных значений прочности  $R_b$ ; от 1,17 до 2,20 раз при вычислениях на основе средних значений прочности  $R_{bm}$ ;

- по формулам (2) от 1,17 до 2,68 раз при вычислениях на основе расчетных значений прочности  $R_b$ ; от 1,12 до 2,37 раз при вычислениях на основе средних значений прочности  $R_{bm}$ .

Увеличение сжимаемости бетона составило:

- по формулам (1) от 1,51 до 11,12 раз при вычислениях на основе расчетных значений прочности  $R_b$ ; от 1,38 до 9,54 раз при вычислениях на основе средних значений прочности  $R_{bm}$ ;
- по формулам (2) от 1,82 до 6,56 раз при вычислениях на основе расчетных значений прочности  $R_b$ ; от 1,52 до 5,87 при вычислениях на основе средних значений прочности  $R_{bm}$ .

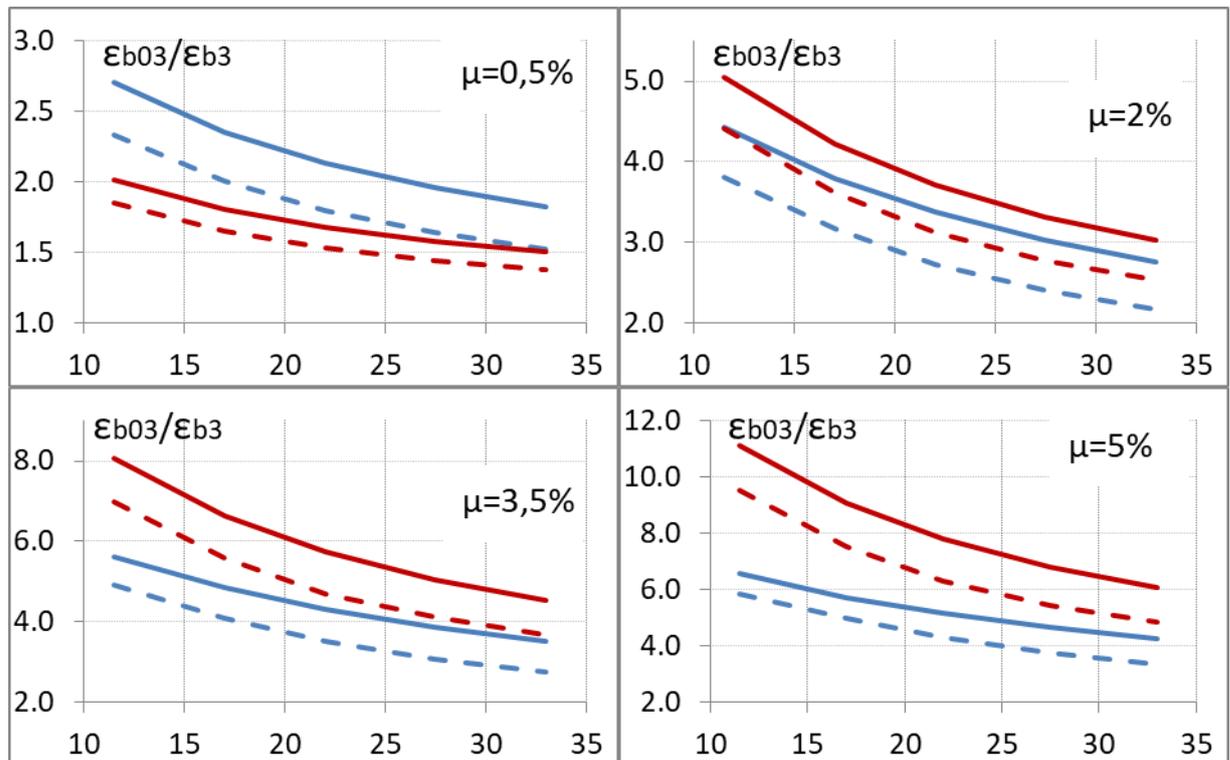


Рис. 3. – Зависимость роста значений относительных деформаций, соответствующих вершине диаграммы сжатия, от расчетного значения призмной прочности  $R_b$ :

- $\epsilon_{b03}/\epsilon_{b0} = f(R_b)$  по формулам (1); —  $\epsilon_{b03}/\epsilon_{b0} = f(R_{bm})$  по формулам (1);
- -  $\epsilon_{b03}/\epsilon_{b0} = f(R_b)$  по формулам (2); - -  $\epsilon_{b03}/\epsilon_{b0} = f(R_{bm})$  по формулам (2)

Также стоит отметить, что по формулам (1) получается существенно большее значение  $\epsilon_{b03}$  при больших коэффициентах косвенного армирования. И, как отмечалось ранее в работе [4], эти значения могут существенно превышать экспериментальные данные.

Для наглядного сравнения на рис. 4 приведены расчетные трехлинейные диаграммы работы на сжатие для бетона класса В30, построенные по формулам (1) по расчетным значениям прочности исходного бетона и по средним значениям. Деформации в конце диаграммы  $\epsilon_{bu3}$  определялись в соответствии с требованиями СП 63.13330.2012:

$$\epsilon_{bu3} = \epsilon_{bu} \cdot \epsilon_{b03} / \epsilon_{b0}$$

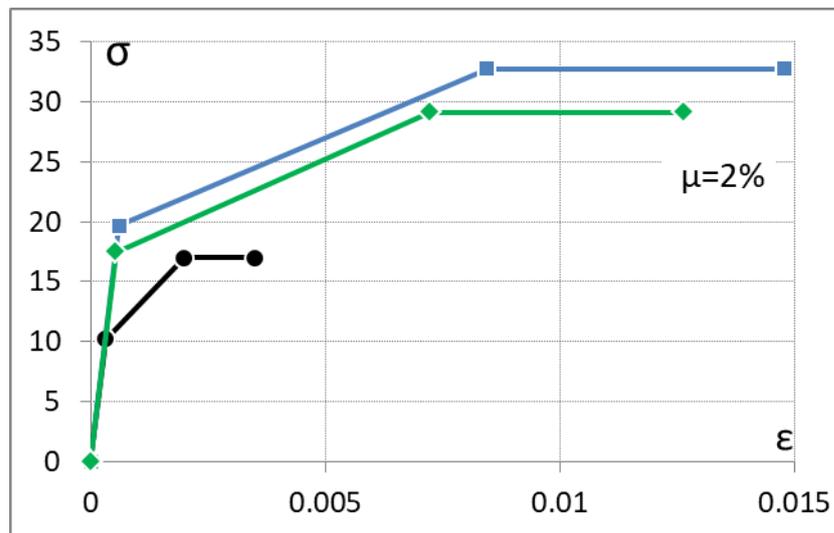


Рис. 4. – Расчетные диаграммы сжатия: ● – неармированный бетон;  
■ –  $(\epsilon_{b03}; R_{b3}) = f(R_b)$ ; ◆ –  $(\epsilon_{b03}; R_{b3}) = f(R_{bm})$

### Заключение

Полученные результаты свидетельствуют о том, что для всех рассмотренных диапазонов конструктивных параметров вычисление характеристик бетона с косвенным армированием на основании расчетных значений прочности исходного бетона приводит к существенному завышению прочности и предельной сжимаемости. Превышение составляет:

- для  $R_{b3}$  от 4% до 30% при вычислениях по формулам (1); от 6% до 32% при вычислениях по формулам (2) (проценты посчитаны от  $R_b$ );
- для  $\varepsilon_{b03}$  от 12% до 157% при вычислениях по формулам (1); от 30% до 69% при вычислениях по формулам (2) (проценты посчитаны от  $\varepsilon_{b0}$ ).

Разницу можно объяснить тем, что изначально расчетные зависимости получены именно для экспериментальных средних значений прочности и не могут без доработок применяться для уменьшенных расчетных значений прочности. В этой связи для корректного определения параметров бетона с косвенным армированием в рамках теории предельных состояний рекомендуется дополнить СП 63.13330.2012 средними значениями прочности. Так, например, EN 1992 Eurocode 2 содержит такие данные.

### Литература

1. Attard M.M., Samani A.K. A stress–strain model for uniaxial and confined concrete under compression // Eng. Struct. – 2012. - № 41. Pp. 335-349.
2. Tamrazyan A.G., Manaenkov I.K., Koroteev D.D. Study of reinforced concrete beams with indirect reinforcement of compressed zone in the form of cross welded mesh. J.Mech.Cont.& Math. Sci. 2019. № 1S. Pp. 621-631.
3. Fedorova N.V. et al. Indirect Reinforcement of Reinforced Concrete Elements as a Means of Protecting a Constructive System from a Progressive Collapse. 2020. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 753 032032.
4. Манаенков И.К. К совершенствованию диаграммы сжатого бетона с косвенным армированием // Строительство и реконструкция. 2018. № 2 (76). С. 41-50.
5. Krishan A.L., Rimshin V.I., Troshkina E.A. Compressed and bending concrete elements with confinement reinforcement meshes. 2020. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 753 022052.

6. Han L.H., Xu C.Y., Tao Z. Performance of concrete filled stainless steel tubular (CFSST) columns and joints: Summary of recent research. Journal Of Constructional Steel Research. 2019. Vol. 152. Pp. 117-131.

7. Krishan A.L. et al. Strength of compressed concrete filled steel tube elements of circular and square cross-section. 2018. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 451 012053.

8. Munir M.J. et al. Stress-strain behavior of spirally confined recycled aggregate concrete: An approach towards sustainable design. Resources Conservation And Recycling. 2019. Vol. 146. Pp. 127-139.

9. Тамразян А.Г., Черник В.И. Диаграмма деформирования бетона, ограниченного дискретной композитной обоймой // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 8. С. 43-53.

10. Трекин Н.Н., Кодыш Э.Н., Трекин Д.Н. Расчет по образованию нормальных трещин на основе деформационной модели // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 7. С. 74-78.

11. Мкртчян А.М., Аксенов В.Н. Аналитическое описание диаграммы деформирования высокопрочных бетонов // Инженерный вестник Дона. 2013. № 3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1818](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1818)

12. Резван И.В., Маилян Д.Р., Резван А.В. Построение диаграммы "напряжения-деформации" бетона в условиях пассивного бокового обжатия // Инженерный вестник Дона. 2012. № 4-1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p1y2012/1127](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p1y2012/1127)

13. Перельмутер А.В., Кабанцев О.В., Пичугин С.Ф. Основы метода расчетных предельных состояний. М: Издательство АСВ, 2019. 240 с.

14. Manaenkov I.K., Korenkov P.A., Grezeva A.S., Zinoveva E.A. Calculation of deformations of concrete with indirect reinforcement according to limit state design. 2020. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 869 052033.

## References

1. Attard M.M., Samani A.K. Eng. Struct. 2012. № 41. Pp. 335-349.
  2. Tamrazyan A.G., Manaenkov I.K., Koroteev D.D. J.Mech.Cont.& Math. Sci. 2019. № 1S. Pp. 621-631.
  3. Fedorova N.V. et al. 2020. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 753 032032.
  4. Manaenkov I.K. Stroitel'stvo i rekonstrukcija. 2018. № 2 (76). Pp. 41-50.
  5. Krishan A.L., Rimshin V.I., Troshkina E.A. 2020. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 753 022052.
  6. Han L.H.; Xu C.Y.; Tao Z. Journal of Constructional Steel Research. 2019. Vol. 152. pp. 117-131.
  7. Krishan A.L. et al. 2018. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 451 012053.
  8. Munir M.J. et al. Resources Conservation and Recycling. 2019. Vol. 146. Pp. 127-139.
  9. Tamrazjan A.G., Chernik V.I. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2020. № 8. Pp. 43-53.
  10. Trekin N.N., Kodysh Je.N., Trekin D.N. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2016. № 7. Pp. 74-78.
  11. Mkrтчjan A.M., Aksenov V.N. Inzhenernyj vestnik Dona. 2013. № 3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1818](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1818)
  12. Rezvan I.V., Mailjan D.R., Rezvan A.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2012. № 4-1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p1y2012/1127](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p1y2012/1127)
  13. Perel'muter A.V., Kabancev O.V., Pichugin S.F. Osnovy metoda raschetnyh predel'nyh sostojanij. [Basis of the method of limit state design] M: Izdatel'stvovo ASV, 2019. 240 p.
  14. Manaenkov I.K., Korenkov P.A., Grezeva A.S., Zinoveva E.A. 2020. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 869 052033.
-