

Влияние изменчивости деформационных характеристик бетона и арматуры на несущую способность внецентренно сжатых железобетонных элементов

В.М. Попов¹, В.В. Белов², О.А. Яцковец¹

¹ Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

² АО «Атомэнергопроект» Санкт-Петербург, Россия

Аннотация: В нормах проектирования железобетонных конструкций значения относительных деформаций бетона приняты как средние величины, в то время как прочностные характеристики приняты с высоким уровнем обеспеченности. В методе расчета железобетонных конструкций по предельным усилиям деформации бетона и арматуры непосредственно не используются в разрешающих уравнениях. В расчетах по нелинейной деформационной модели значения относительных деформаций напрямую используются в расчетах. Использование средних значений предельных относительных деформаций бетона приводит к снижению достоверности получаемых результатов. В работе рассматривается влияние изменчивости деформационных характеристик бетона и арматуры на несущую способность внецентренно сжатых железобетонных элементов.

Ключевые слова: внецентренное сжатие, железобетон, изменчивость деформационных характеристик, бетон, несущая способность, арматура, нелинейная деформационная модель.

Введение

В нормах проектирования железобетонных конструкций есть два подхода к расчету: метод предельных усилий и нелинейная деформационная модель (НДМ). При расчете по первому методу в уравнениях равновесия продольных усилий и моментов относительные деформации бетона и арматуры не используются. Обеспеченность нормативных значений прочности бетона на сжатие и растяжение и арматуры на растяжение принята 0,95, а деформационные характеристики были приняты как средние величины. При расчете по НДМ используются непосредственно диаграммы деформирования бетона и арматуры [1-3]. В работе [4,5] отмечалось, что изменчивость деформационных характеристик бетона влияет на несущую способность сжатых железобетонных элементов тем больше, чем больше коэффициент армирования. Некоторые исследователи разработали

собственные методики расчета внецентренно сжатых элементов [6-8]. В работах [9,10] отмечалось, что при расчете внецентренно сжатых элементов вид диаграммы деформирования незначительно влияет на получаемые значения несущей способности.

Цель и методика исследования

Цель работы – оценка влияния изменчивости деформационных характеристик бетона и арматуры на несущую способность внецентренно сжатых железобетонных элементов.

Методология настоящей работы заключается в применении нелинейной деформационной модели для численного моделирования напряженно-деформированного состояния внецентренно сжатых железобетонных элементов конструкций и использовании методов математической статистики.

Описание исследования

При помощи методов математической статистики из результатов экспериментальных исследований [5] были получены 5000 диаграмм деформирования бетона и арматурной стали. Эти данные являются исходными для анализа несущей способности внецентренно сжатых железобетонных элементов.

Для определения влияния изменчивости деформационных свойств на несущую способность в данной работе рассматривались сечения $h \times b = 400 \times 400$ мм с различными коэффициентами армирования, арматуры класса А500 и классом бетона В30. Расчет выполнялся диаграммным методом по разработанной авторами программе. В качестве диаграмм деформирования бетона использовались криволинейные диаграммы деформирования бетона Саржина.

В данной работе определялись следующие величины: средние, нормативные и расчетные значения несущей способности внецентренно

сжатых железобетонных элементов с различными коэффициентами армирования, их коэффициенты обеспеченности и обеспеченности.

Были выполнены расчеты несущей способности внецентренно сжатых железобетонных элементов с использованием 5000 диаграмм деформирования бетона с учетом и без учета изменчивости деформационных характеристик бетона и 5000 диаграмм деформирования арматуры класса А500.

Нормативные и расчетные значения несущей способности внецентренно сжатых железобетонных элементов с различными коэффициентами армирования рассчитывалась по формулам (1-2):

$$M_n = \overline{M} - 1,64 \cdot \sigma, \quad (1)$$

$$M_n = \overline{M} - 3 \cdot \sigma, \quad (2)$$

где $\overline{M}$ - среднее значение несущей способности, σ - среднее квадратичное отклонение случайной величины.

Коэффициент обеспеченности [11] $K_{об}$ – отношение значения изгибающего момента, полученного по вероятностному методу $M_u(\text{вер})$, к значению изгибающего момента, полученному по (Свод правил СП 63.13330.2018. «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения». – Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. Москва, 2018. URL: <https://docs.cntd.ru/document/554403082?ysclid=mhu5ne05ax92510137>)

$M_u(\text{СП63})$ определялся по формуле (3):

$$K_{об} = \frac{M_u(\text{вер})}{M_u(\text{СП63})}, \quad (3)$$

Данный коэффициент показывает, насколько величина, полученная по вероятностному методу, соответствует той же величине, но рассчитанной по СП 63.

Обеспеченность несущей способности внецентренно сжатых элементов железобетонных конструкций с различными коэффициентами армирования при различных средовых воздействиях, рассчитанная по СП 63, определялась по формуле:

$$\text{Обеспеченность} = 1 - \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(M_{u, \text{СП63}} - M_{u, \text{сред}})^2}{2\sigma^2}}, \quad (4)$$

Анализ результатов

В результате расчетов были построены графики зависимости продольной силы N от значений изгибающего момента M . Рассматривались значения N от 0 (соответствующему практически чистому изгибу) до $N_{\max}$ (максимальное значение продольной силы при $M = 0$, соответствующая центральному сжатию без эксцентриситета). Каждая такая кривая для определенного коэффициента армирования ограничивает область значений N - M , не ведущих к разрушению внецентренно сжатого железобетонного элемента (область ниже кривой).

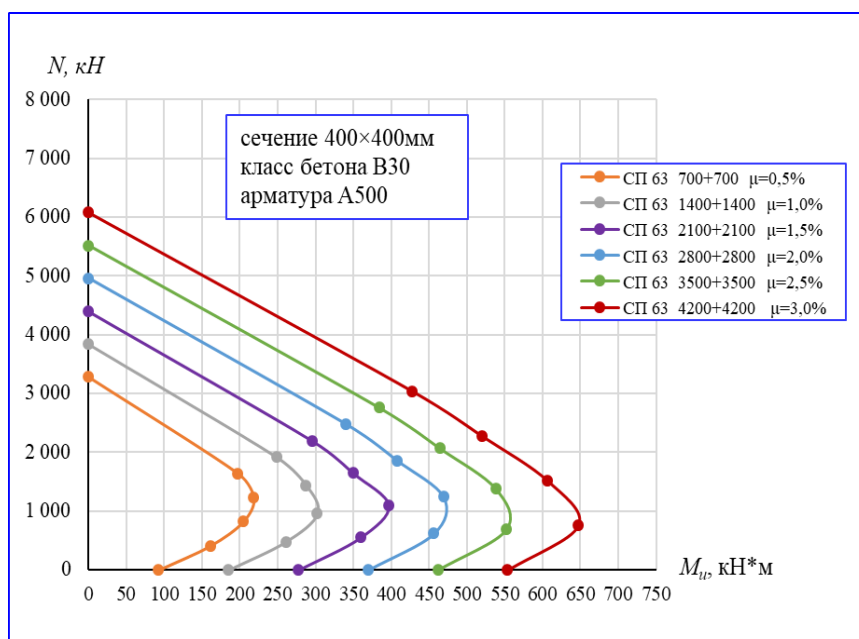


Рис. 1 – Расчетные значения несущей способности внецентренно сжатых элементов прямоугольного сечения с симметричной арматурой по СП 63

На рис. 1 приведены кривые зависимостей N - M при различных коэффициентах армирования, вычисленные по СП 63. Для этих кривых характерно с уменьшением N увеличение несущей способности по M до определенного момента. В случае чистого изгиба при $N=0$ несущая способность железобетонного элемента с симметричным армированием по M снижается. Прочностные характеристики бетона и арматуры принимались для расчетных значений.

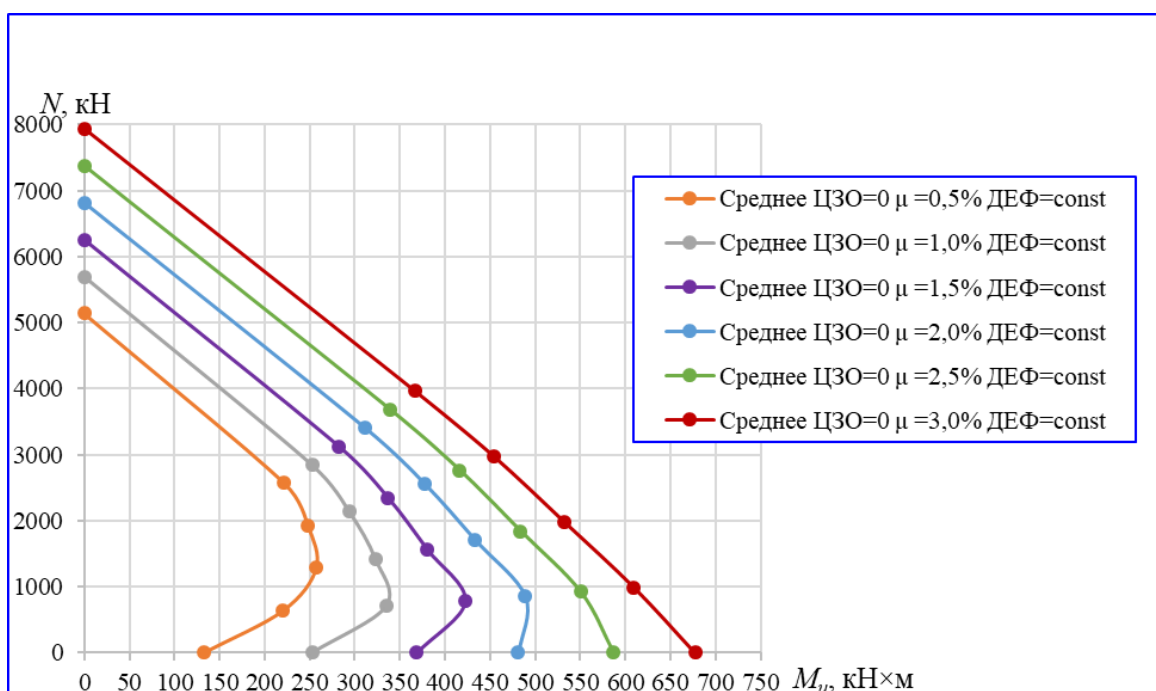


Рис. 2. – Средние значения несущей способности внецентренно сжатых элементов прямоугольного сечения с симметричной арматурой без учета изменчивости деформаций (деформации приняты по СП 63)

На рис. 2 и 3 показаны зависимости N - M для средних значений несущей способности внецентренно сжатых элементов прямоугольного сечения с симметричной арматурой без учета и с учетом изменчивости деформаций соответственно.

При небольших коэффициентах армирования кривая зависимости N - M в этом случае имеет форму, напоминающую параболу. Однако, при большом

коэффициенте армирования (до 2,5 % без учета изменчивости деформаций и до 2 % включительно с учетом изменчивости) форма кривой меняется.

При учете изменчивости деформаций для средних величин происходит снижение значений предельных изгибающих моментов при тех же параметрах предельной продольной силы.

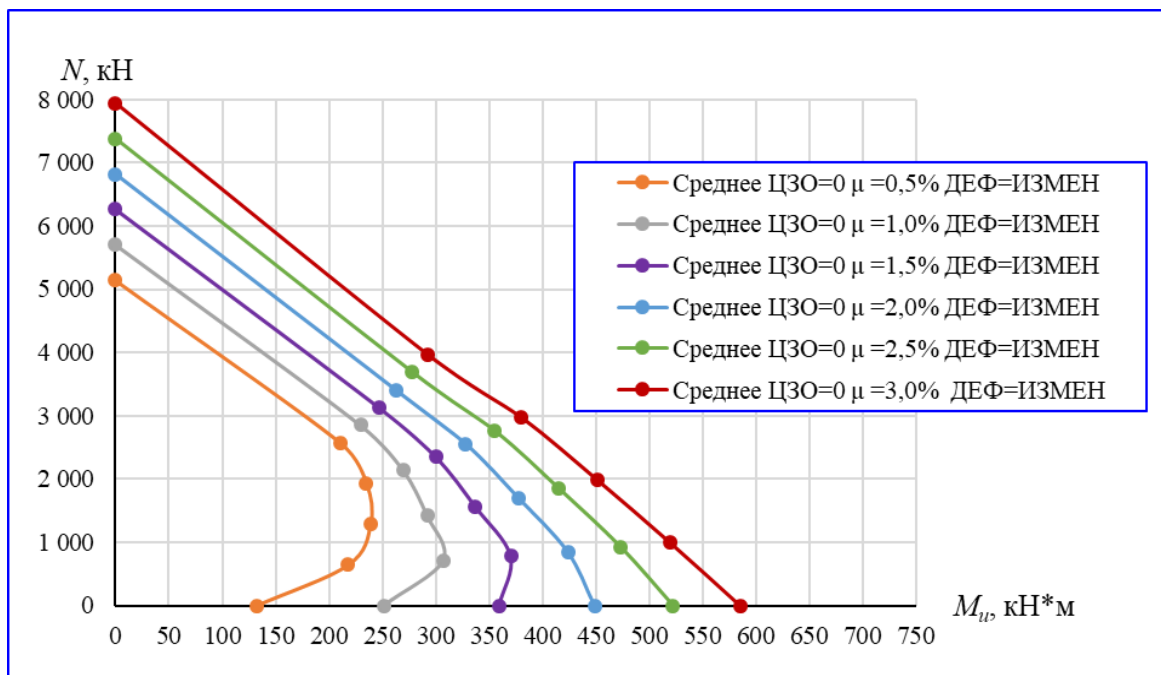


Рис. 3. – Средние значения несущей способности внецентренно сжатых элементов прямоугольного сечения с симметричной арматурой с учетом изменчивости деформаций

На рис. 4 и 5 показаны кривые нормативных значений несущей способности внецентренно сжатых элементов прямоугольного сечения с симметричной арматурой без учета и с учетом изменчивости деформаций соответственно. По форме кривых наблюдается картина, аналогичная средним значениям, но меняются значения коэффициента армирования, при котором меняется форма кривых.

Также, при учете изменчивости деформаций для нормативных значений происходит снижение значений предельного изгибающего момента при тех же значениях предельной продольной силы.

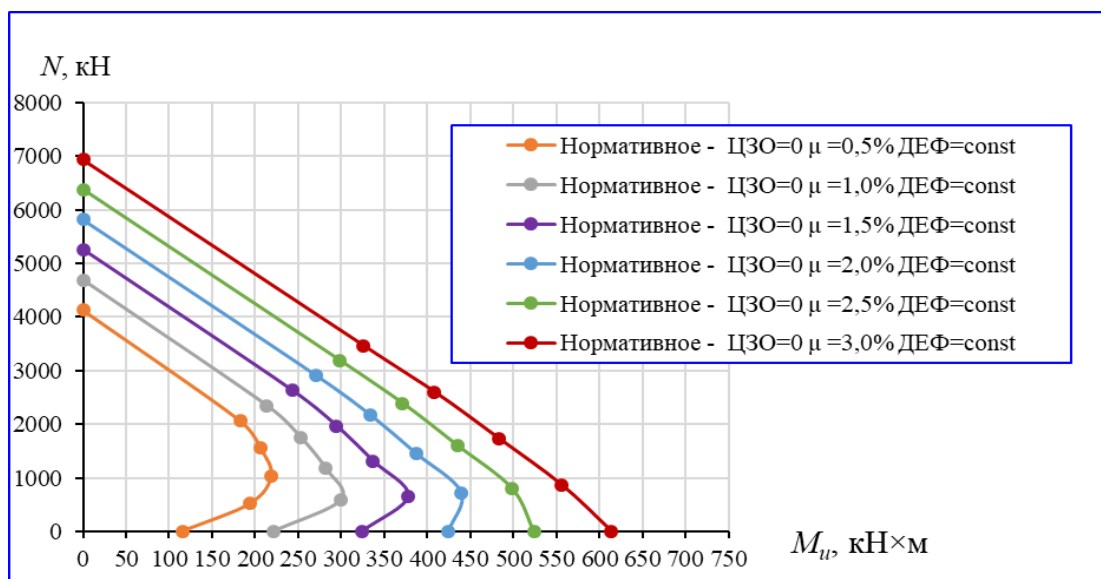


Рис. 4. – Нормативные значения несущей способности внецентренно сжатых элементов прямоугольного сечения с симметричной арматурой без учета изменчивости деформаций (деформации приняты по СП 63)

На рис. 6 и 7 показаны кривые расчетных значений несущей способности внецентренно сжатых элементов прямоугольного сечения с симметричной арматурой без учета и с учетом изменчивости деформаций.

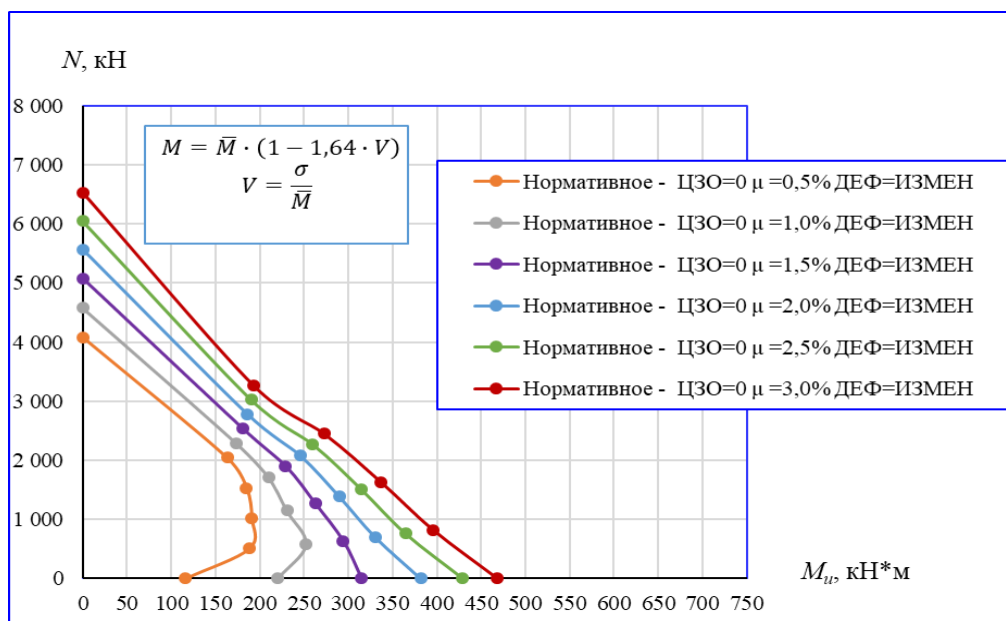


Рис. 5. – Нормативные значения несущей способности внецентренно сжатых элементов прямоугольного сечения с симметричной арматурой с учетом изменчивости деформаций

Сравнение результатов расчетов по СП 63 (рис. 1) с результатами, полученными по диаграммному методу без учета изменчивости деформаций, показало, что при $N=N_{max}$ и при чистом изгибе ($N=0$) результаты близки.

В отличие от кривых, полученных на основе статистических данных, кривые по СП 63 при любых коэффициентах армирования имеют форму, напоминающую параболу. При этом, расчет по нормам завышает область значений $N-M$, не ведущих к разрушению внецентренно сжатого железобетонного элемента по сравнению с результатами расчета на основе статистических данных без учета изменчивости деформаций и значительно завышает по сравнению с расчетами с учетом изменчивости деформаций.

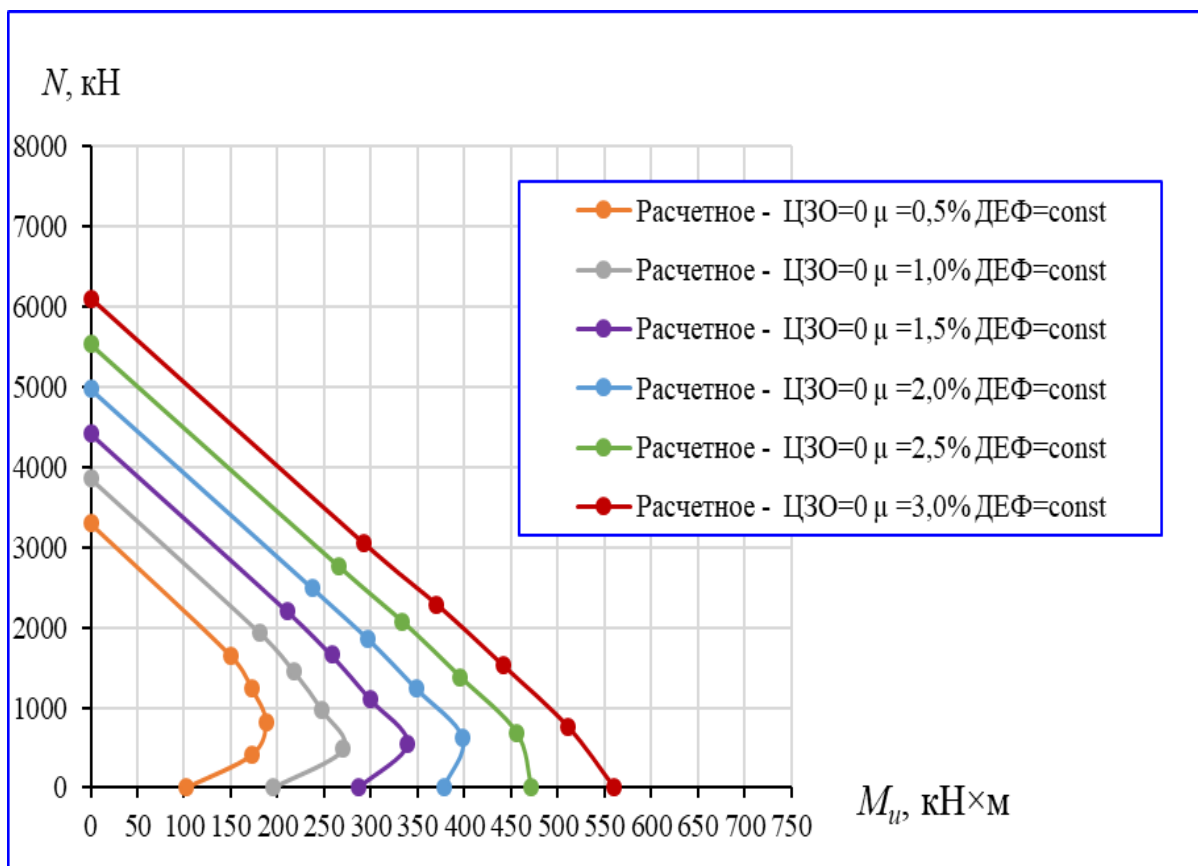


Рис. 6. – Расчетные значения несущей способности внецентренно сжатых элементов прямоугольного сечения с симметричной арматурой без учета изменчивости деформаций (деформации приняты по СП 63)

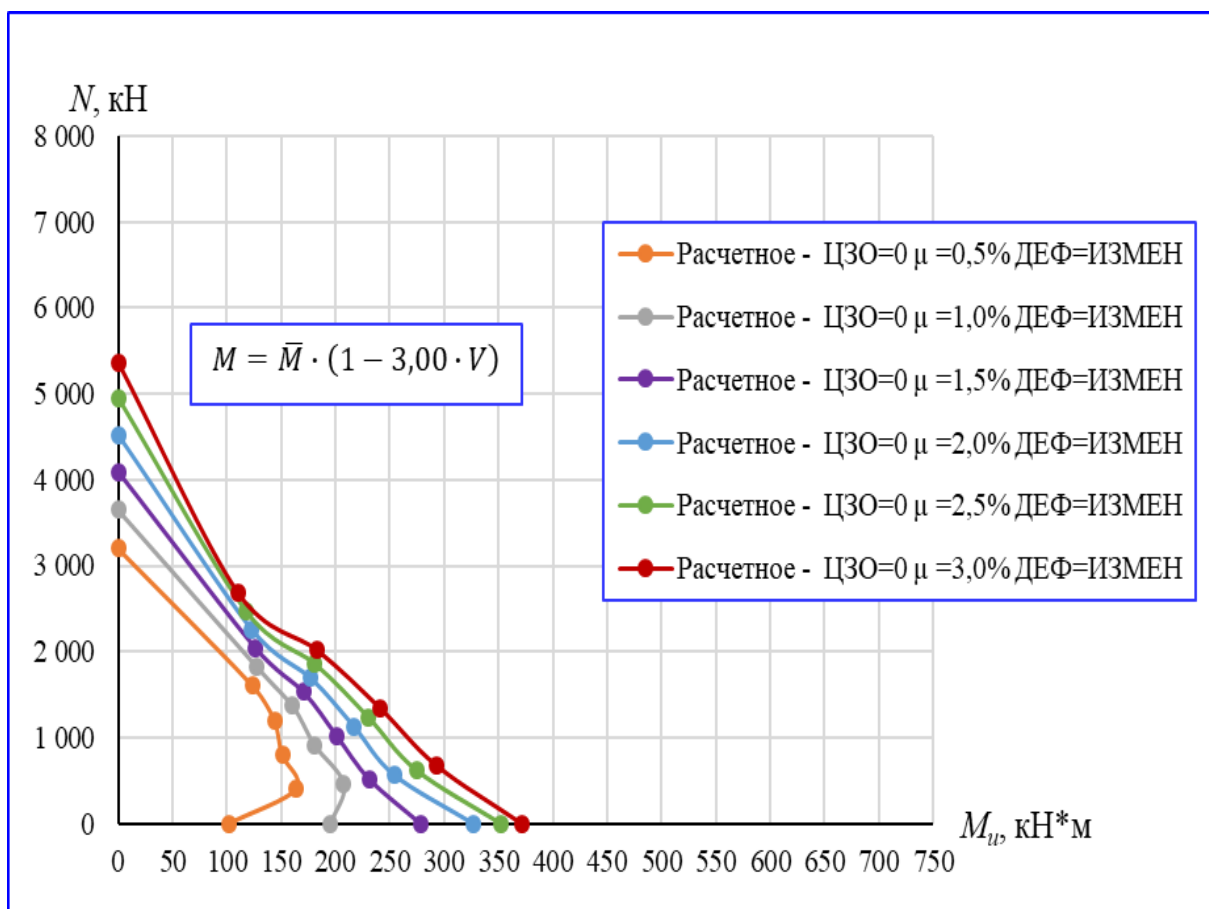


Рис. 7. – Расчетные значения несущей способности внецентренно сжатых элементов прямоугольного сечения с симметричной арматурой с учетом изменчивости деформаций

Также, в работе определялись значения коэффициента обеспеченности и обеспеченность несущей способности внецентренно сжатых железобетонных элементов. Из рис. 8 видно, что при чистом изгибе ($N=0$) для всех коэффициентов армирования коэффициент обеспеченности выше единицы, т.е. несущая способность по вероятностному методу без учета изменчивости деформационных характеристик, выше, чем по СП63. При больших эксцентриситетах с увеличением коэффициента армирования $K_{об}(M_u)$ уменьшается. При средних и малых значениях эксцентриситета влияние коэффициента армирования снижается. С уменьшением эксцентриситета происходит снижение коэффициента обеспеченности.

При уменьшении эксцентриситета приложения продольной силы происходит уменьшение расчетных значений несущей способности внецентренно сжатого железобетонного элемента, полученных диаграммным методом по сравнению с нормами. При внецентренном сжатии с малыми эксцентриситетами нормы завышают несущую способность железобетонного элемента. При центральном сжатии коэффициент обеспеченности при расчете по диаграммному методу без учета изменчивости деформаций близок к единице и уменьшается при увеличении коэффициента армирования (рис. 9).

При учете изменчивости деформаций значения коэффициента обеспеченности $K_{об}(M_u)$ значительно снижаются с уменьшением эксцентриситета. Снижение тем больше, чем выше коэффициент армирования (рис. 10). При отношении N/N_{max} большем 0,1 и коэффициенте армирования большем 0,5 % коэффициент обеспеченности становится меньшим 1. При малом эксцентриситете и коэффициенте армирования больше 2 % этот коэффициент становится меньше 0,2. Это значит, что при внецентренном сжатии даже при относительно большом эксцентриситете и коэффициенте армирования больше 0,5 % нормы завышают значения несущей способности более чем на 20 % по сравнению с вероятностным расчетом. При увеличении коэффициента армирования и уменьшении эксцентриситета это завышение может достигать 80 % по сравнению с вероятностными расчетами.

Коэффициенты обеспеченности несущей способности для центрального сжатия с учетом изменчивости деформаций меньше единицы (рис. 11). При увеличении коэффициента армирования коэффициент обеспеченности $K_{об}(N)$ снижается. Учет изменчивости деформаций при расчете центрально сжатых элементов снижает несущую способность на 12 % при коэффициенте армирования $\mu = 3$ %.

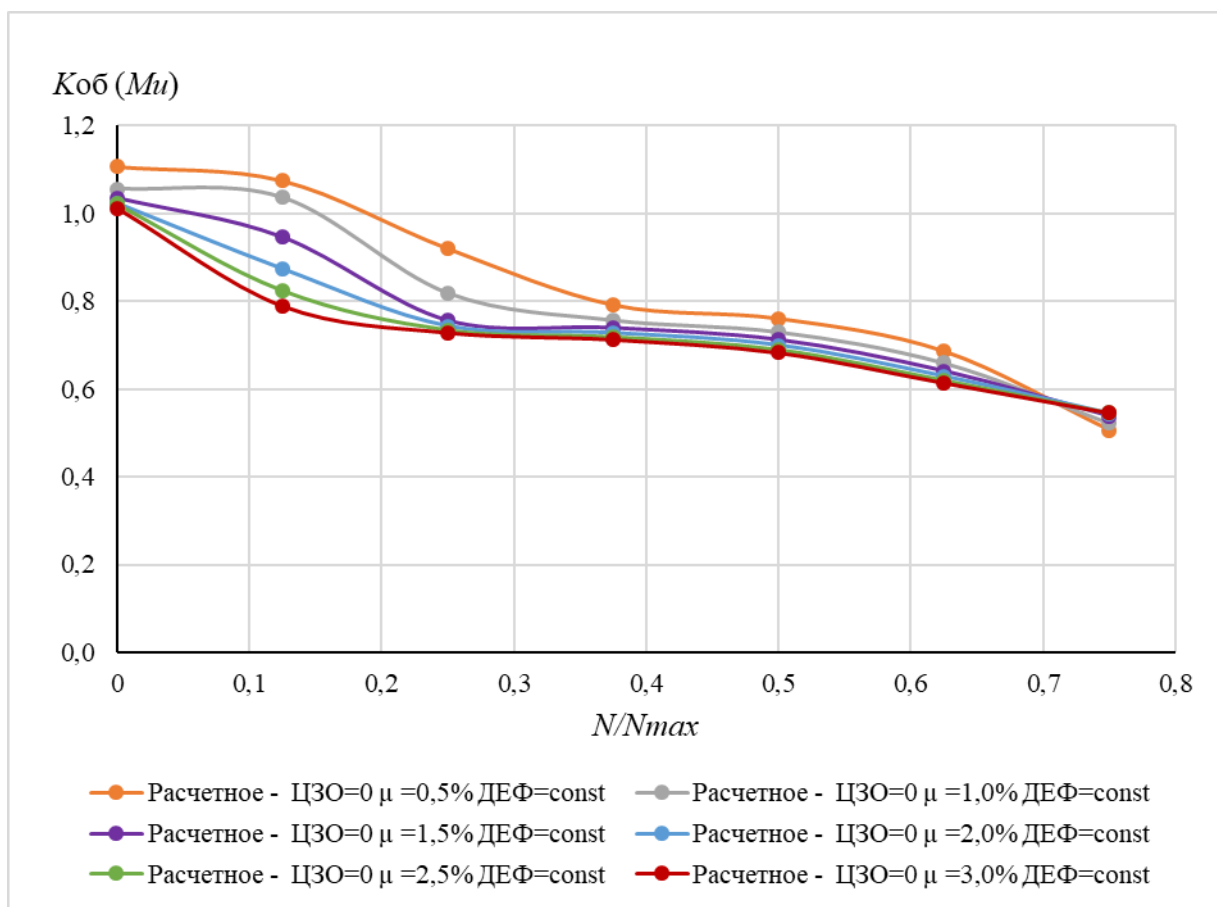


Рис. 8. – Коэффициент обеспеченности несущей способности внецентренно сжатых железобетонных элементов без учета изменчивости деформаций

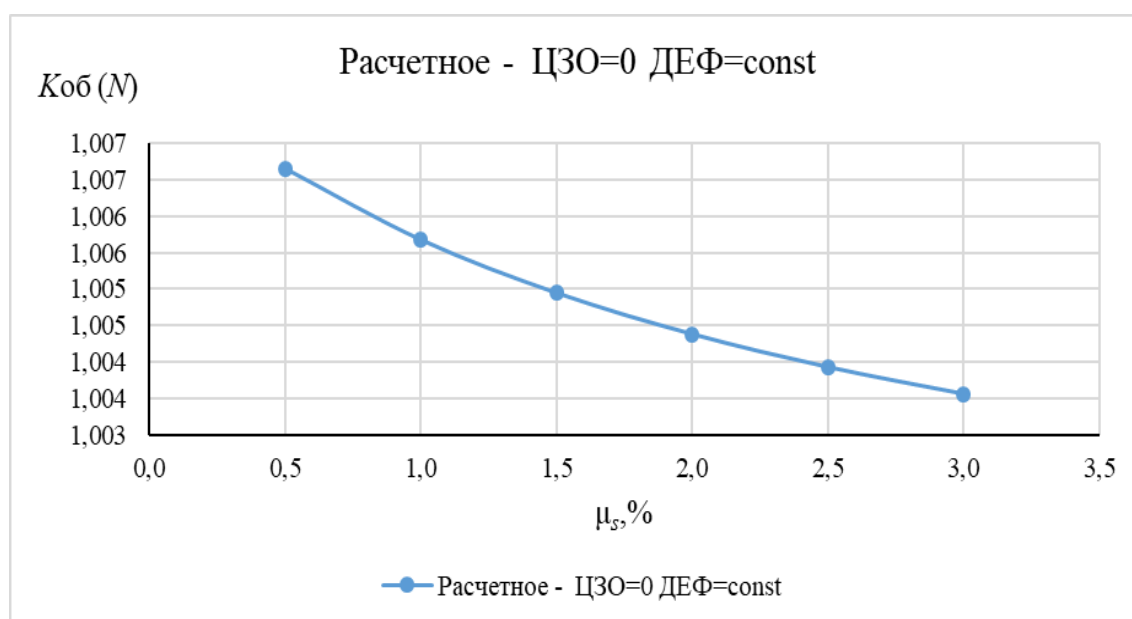


Рис. 9. – Коэффициент обеспеченности несущей способности центрально сжатых железобетонных элементов без учета изменчивости деформаций

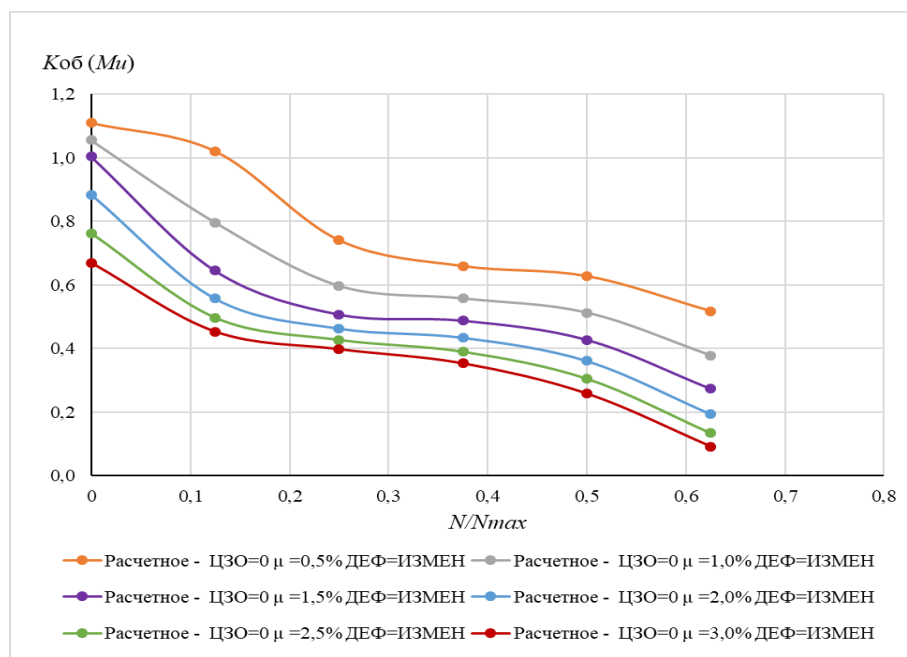


Рис. 10. – Коэффициент обеспеченности несущей способности внецентренно сжатых железобетонных элементов с учетом изменчивости деформаций

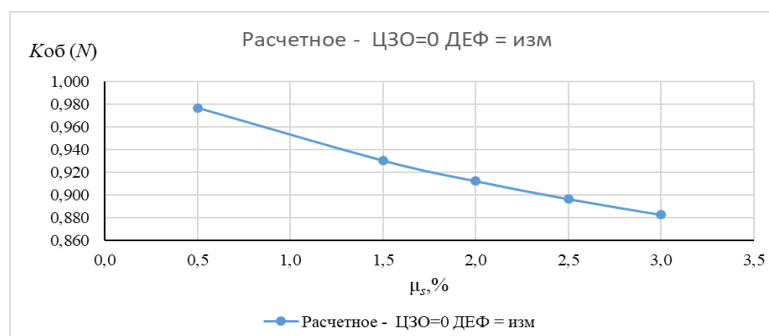


Рис. 11. – Коэффициент обеспеченности несущей способности центрально сжатых железобетонных элементов с учетом изменчивости деформаций

Обеспеченность несущей способности центрально сжатого железобетонного элемента при различных коэффициентах армирования без учета изменчивости деформаций постоянна для всех коэффициентов армирования, и она больше 0,999 – рис. 12. При учете изменчивости деформационных характеристик обеспеченность будет снижаться для центрально сжатых элементов с увеличением коэффициента армирования.

Обеспеченность несущей способности внецентренно сжатых железобетонных элементов, вычисленная без учета изменчивости

деформационных характеристик, уменьшается с уменьшением эксцентриситета продольной силы - рис. 13.

Интенсивность снижения обеспеченности несущей способности без учета изменчивости деформационных характеристик зависит от коэффициента армирования. Чем больше коэффициент армирования, тем значительнее это уменьшение. При коэффициенте армирования 1,5% и ниже и соотношении N/N_{max} более 0,2 обеспеченность становится ниже 0,3, а при коэффициенте армирования 2,5 % и выше и соотношении N/N_{max} более 0,2 обеспеченность практически нулевая. При этом, для всех коэффициентов армирования при N/N_{max} более 0,7 обеспеченность практически нулевая.

Учет изменчивости деформационных характеристик приводит к резкому снижению обеспеченности при коэффициентах армирования (1 - 2,5) % и отношении N/N_{max} больше 0,1 (рис. 15).

Особенно это становится заметным при коэффициентах армирования 1% и более и соотношении N/N_{max} более 0,6 – обеспеченность падает до значений менее 0,1. Все это говорит о необходимости учета изменчивости деформационных характеристик бетона и арматуры.

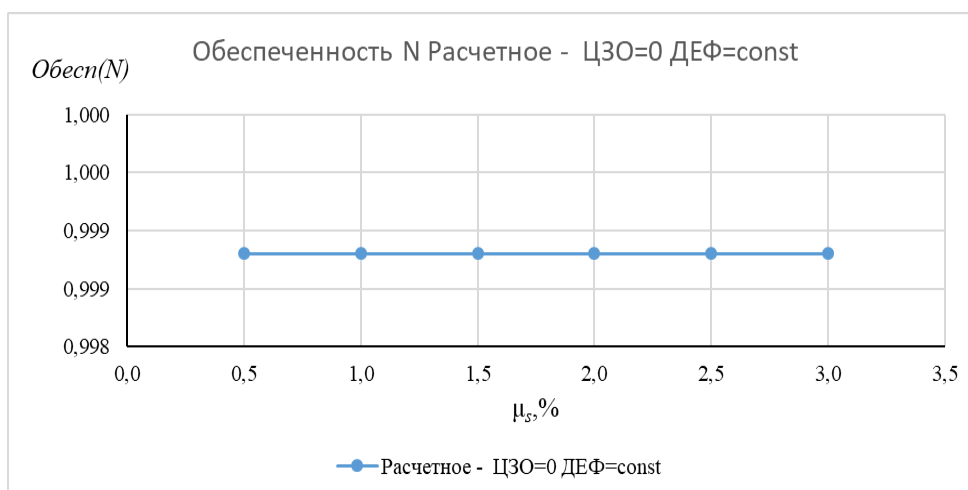


Рис. 12. – Обеспеченность несущей способности центрально сжатого железобетонного элемента при различных коэффициентах армирования без учета изменчивости деформаций

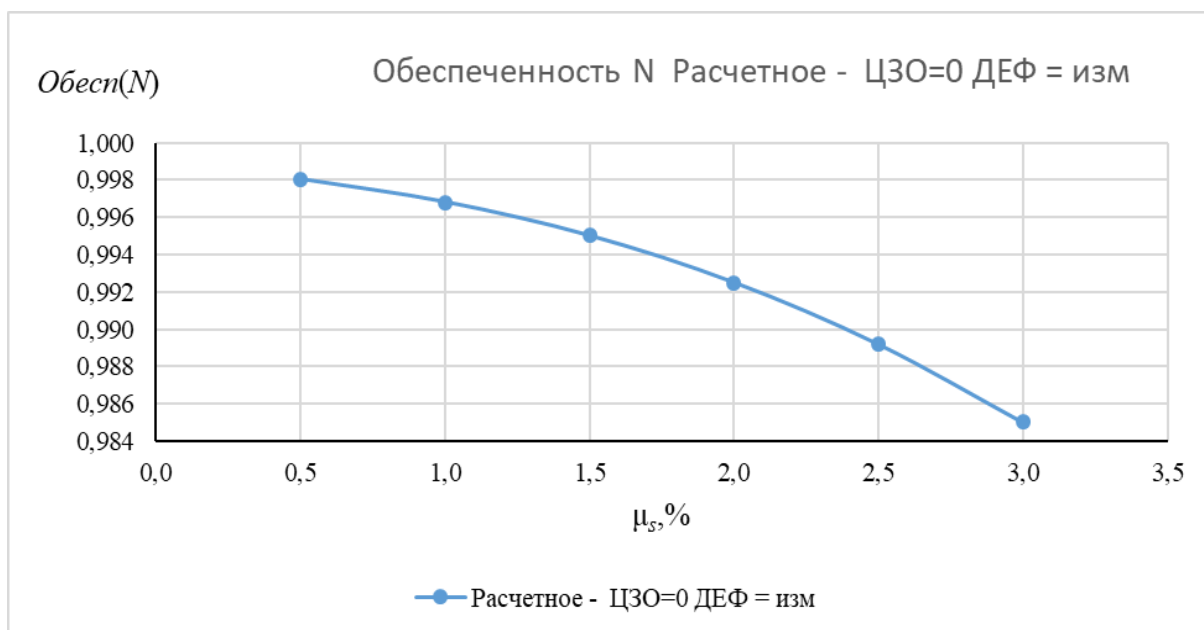


Рис. 13. – Обеспеченность несущей способности центрально сжатого железобетонного элемента при различных коэффициентах армирования с учетом изменчивости деформаций

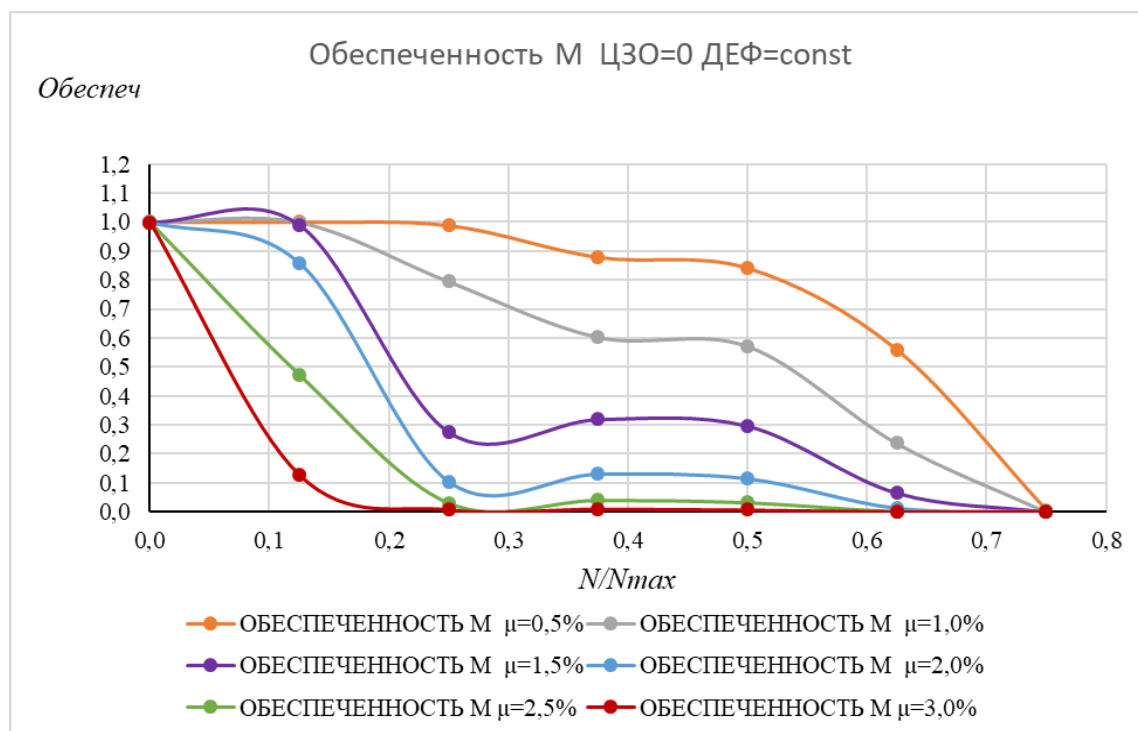


Рис. 14. – Обеспеченность несущей способности внецентренно сжатых железобетонных элементов при различных коэффициентах армирования без учета изменчивости деформаций

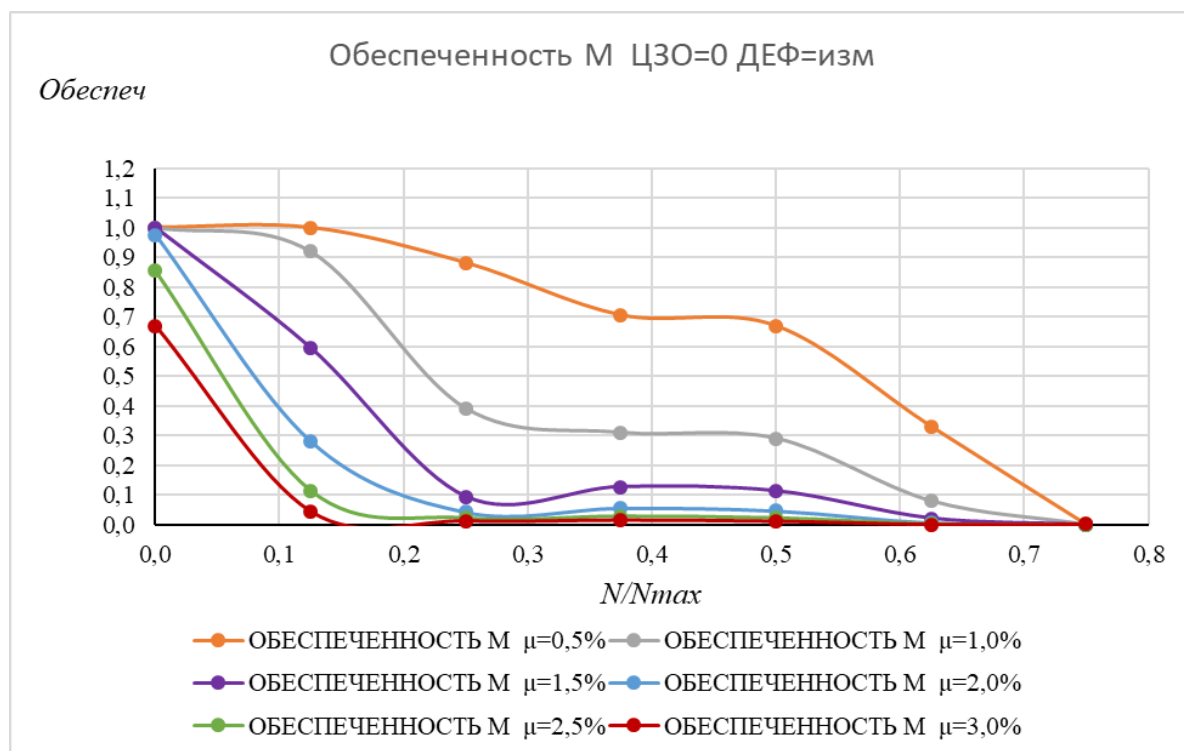


Рис. 15. – Обеспеченность несущей способности внецентренно сжатых железобетонных элементов при различных коэффициентах армирования с учетом изменчивости деформаций

Выводы

- Изменчивость деформационных характеристик бетона и арматуры существенно влияет на несущую способность внецентренно сжатых железобетонных элементов. Это влияние увеличивается с ростом коэффициента армирования и зависит от эксцентриситета приложения продольной силы.
- Надежность и обеспеченность внецентренно сжатых железобетонных элементов существенно снижается при использовании в расчетах средних значений деформационных характеристик бетона и арматуры.
- Необходимо проведение дальнейших исследований для более детального изучения изменчивости деформационных характеристик бетона.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта СПбГАСУ на 2025 год

Литература

1. Донченко О.М., Сулейманова Л.А., Есипов С.М. Расчет внецентренно-сжатых железобетонных элементов по прочности нормальных сечений на основе нелинейной деформационно-прочностной модели. Вестник евразийской науки. 2023. Т.15. № 6. URL: esj.today/PDF/26SAVN623.pdf.
2. Манаенков И.К. К расчету железобетонных элементов по нелинейной деформационной модели. Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2019. № 5(383). С. 238-242.
3. Манаенков И.К. Сравнительный анализ результатов расчета гибких внецентренно сжатых железобетонных колонн по нелинейной деформационной модели. Инженерный вестник Дона. 2024. №3. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_54__3y24_Manaenkov.pdf_8b944b9e65.pdf.
4. Плюснин М.Г., Цыбакин С.В. Экспериментальное исследование изменчивости деформационных характеристик бетона при сжатии. Вестник МГСУ. 2020. Т.15. №10. С. 1390-1398.
5. Попов В.М., Пинус Б.И., Плюснин М.Г., Кондратьева Л.Н. Влияние изменчивости деформационных характеристик бетона на надежность сжатых железобетонных конструкций. Жилищное строительство. 2025. № 1-2. С. 91-95.
6. Евтушенко И.И., Вахидов Р.Н., Барамия А.Л., Пустовалов С.А., Зотов В.В., Нор-Аревян С.Л., Нуриев В.Э. Об особенностях методик расчёта внецентренно сжатых железобетонных элементов. Инженерный вестник Дона. 2017. №4. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_248_Evtushenko.pdf_608b3db037.pdf.

7. Bresler B. Design criteria for reinforced columns under axial load and biaxial bending. Journal of The American Concrete Institute. 1960. Vol. 57. Pp. 481-490.

8. Lan S., Liu Y., Mao D., Wang D. Experimental and theoretical study on flexural rigidity reduction of reinforced concrete eccentric column. Scientific Reports. 2025. Vol. 15 (1). URL: nature.com/articles/s41598-025-15363-4.

9. Мурашкин Г.В., Мордовский С.С. Применение диаграмм деформирования для расчета несущей способности внецентренно сжатых железобетонных элементов. Жилищное строительство. 2013. №3. С. 38-40.

10. Карпенко Н.И., Соколов Б.С., Радайкин О.В. К расчёту прочности, жёсткости и трещиностойкости внецентренно сжатых железобетонных элементов с применением нелинейной деформационной модели. Известия КазГАСУ. 2013. №4 (26). С. 113-120.

11. Исайкин А.Я. Оценка надежности статически неопределимых железобетонных конструкций на основе метода предельного равновесия. Дис. ... д-ра техн. наук. 05.23.01. М. 2000. 405 с.

References

1. Donchenko O.M., Suleymanova L.A., Esipov S.M. Vestnik evraziyskoy nauki. 2023. Vol. 15. № 6. URL: esj.today/PDF/26SAVN623.pdf.

2. Manaenkov I.K. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti. 2019. № 5(383). Pp. 238-242.

3. Manaenkov I.K. Inzhenernyj vestnik Dona. 2024. №3. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_54__3y24_Manaenkov.pdf_8b944b9e65.pdf.

4. Plyusnin M.G., Tsybakin S.V. Vestnik MGSU. 2020. Vol.15. №10. Pp. 1390-1398.

5. Popov V.M., Pinus B.I., Plyusnin M.G., Kondrat'eva L.N. Zhilishchnoe stroitel'stvo. 2025. № 1-2. Pp. 91-95.

6. Evtushenko I.I., Vakhidov R.N., Baramiya A.L., Pustovalov S.A., Zotov V.V., Nor-Arevyan S.L., Nuriev V.E. Inzhenernyj vestnik Dona. 2017. №4. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_248_Evtushenko.pdf_608b3db037.pdf.

7. Bresler B. Design criteria for reinforced columns under axial load and biaxial bending. Journal of The American Concrete Institute. 1960. Vol. 57. Pp. 481-490.

8. Lan S., Liu Y., Mao D., Wang D. Experimental and theoretical study on flexural rigidity reduction of reinforced concrete eccentric column. Scientific Reports. 2025. Vol. 15 (1). URL: nature.com/articles/s41598-025-15363-4.

9. Murashkin G.V., Mordovskiy S.S. Zhilishchnoe stroitel'stvo. 2013. №3. Pp. 38-40.

10. Karpenko N.I., Sokolov B.S., Radaykin O.V. Izvestiya KazGASU. 2013. №4 (26). Pp. 113-120.

11. Isaykin A.Ya. Otsenka nadezhnosti staticheskii neopredelimykh zhelezobetonnykh konstruktsiy na osnove metoda predel'nogo ravnovesiya [Assessment of reliability of statically indeterminate reinforced concrete structures based on the limit equilibrium method]. Dis. ... d-ra tekhn. nauk. 05.23.01. M. 2000. 405 p.

Дата поступления: 4.10.2025

Дата публикации: 27.11.2025