



Учет физической нелинейности при расчете плоской железобетонной рамы с использованием вычислительного комплекса SCAD

© В.А. Куш, В.П. Ященко

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель работы заключается в анализе результатов определения усилий и перемещений в плоской раме при статической нагрузке, полученных с учетом физически нелинейной работы железобетона. Проведено сравнение деформационных теорий, применяемых для композитных материалов. Осуществлен линейный расчет и исследованы результаты нелинейного автоматизированного расчета перемещений и усилий в раме, выполненного в программном комплексе *SCAD Office* (версия 21.1.9.7) с использованием различных вариантов деформационных теорий. Проведен автоматизированный расчет рамы в соответствии с рекомендациями СП 52-103-2007 «Железобетонные монолитные конструкции зданий», согласно которому нелинейную работу железобетонных элементов конструкций рекомендуется учитывать путем введения понижающих коэффициентов. Был выполнен сравнительный анализ результатов определения перемещений и усилий в плоской железобетонной раме, вследствие чего было установлено несоответствие значений величин усилий, полученных при расчетах по теориям физической нелинейности и по рекомендациям СП 52-103-2007. Максимальная погрешность, по сравнению с нелинейным расчетом по СП 52-103-2007, составляет 55,8%. При сравнении данных, полученных в расчетах, также было установлено несоответствие значений перемещений, полученных по рекомендациям СП 52-103-2007. Наибольшее расхождение с результатами нелинейного расчета составляет 49,4%, а с результатами линейного расчета – 69%. Таким образом, проведенное исследование выявило несогласованность результатов, полученных с использованием нормативных рекомендаций, и результатов линейного и нелинейного расчета. Разнонаправленность результатов требует дополнительных верификационных проверок при использовании нелинейного анализа в расчетах на прочность и жесткость как средства уточнения напряженно-деформированного состояния конструкции.

Ключевые слова: нелинейный анализ, упругопластический материал, критерии прочности, теории пластичности, *SCAD Office*

Для цитирования: Куш В.А., Ященко В.П. Учет физической нелинейности при расчете плоской железобетонной рамы с использованием вычислительного комплекса SCAD. *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. 2021. Т. 11. № 1. С. 38–47. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2021-1-38-47>

Consideration of physical nonlinearity in the calculation of a flat reinforced concrete slab using the SCAD software

Vadim A. Kushch, Vladimir P. Yashchenko

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The aim of the paper is to analyze the results of the determination of forces and motions in a flat slab under static load, obtained considering the physically nonlinear operation of reinforced concrete. The deformation theories used for composite materials were compared. A linear analysis was carried out, along with a nonlinear automated analysis of forces and motions in a slab in the *SCAD Office* software (version 21.1.9.7) based on various deformation theories. An automatic calculation of a slab was conducted in accordance with the guidelines of the SP 52-103-2007 “Concrete monolithic building structures”, according to which the nonlinear operation of reinforced concrete structural elements should be considered by introducing reducing coefficients. A comparative analysis of the obtained forces and motions in a flat reinforced concrete slab was carried out. An inconsistency was found between the values calculated based on the theory of physical nonlinearity and

those calculated according to the recommendations of SP 52-103-2007. In comparison with the non-linear analysis based on SP 52-103-2007, the maximum error comprised 55.8%. The obtained values of motions, according to the recommendations of SP 52-103-2007, were also inconsistent. The largest discrepancy in the results of the nonlinear analysis was 49.4%, while the largest discrepancy in the linear analysis was 69%. Thus, the study showed inconsistency between the results obtained using the guidelines and the results of linear and non-linear analysis. The difference in the results demands additional verification when using non-linear analysis in calculations for strength and stiffness as a means of clarifying the stress-strain state of the studied structure.

Keywords: nonlinear analysis, elastic-plastic material, strength criteria, plasticity theories, SCAD Office

For citation: Kushch VA, Yashchenko VP. Consideration of physical nonlinearity in the calculation of a flat reinforced concrete slab using the SCAD software. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'* = *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2021;11(1):38–47. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2021-1-38-47>

Введение

В настоящее время при проектировании строительных конструкций в основном используется линейная постановка. Это позволяет существенно сократить сложность расчетов и затраты времени на их проведение. Для более детального исследования работы сооружений требуется учитывать нелинейное поведение конструкции при выполнении расчетных процедур [1–7]. При расчете железобетонных конструкций с использованием нелинейных диаграмм деформирования бетона и стали [8–9] удается получить более точную картину напряженно-деформированного состояния строительных конструкций, что дает возможность эффективного использования возможностей конструкционных материалов при расчете элементов конструкций на прочность, жесткость по второй группе предельных состояний или на устойчивость.

Модели деформирования для бетона

Для учета физической нелинейности необходимо выбрать модель деформирования для материала. Особенностью расчета железобетона является то, что данные задаются как для бетона, так и для арматуры. Работа бетона описывается на основании деформационной теории пластичности, теории пластического течения Друкера – Прагера или теории пластического течения Гениева [10–19].

В основу деформационной теории пластичности положены физические соотношения, связывающие напряжения и деформации. При построении теории используются следующие допущения:

1. Связь между интенсивностью напряжений и интенсивностью деформаций

не зависит от вида напряженного состояния.

2. Между объемной деформацией и средним напряжением существует линейная зависимость:

$$\varepsilon_v = \frac{3\sigma_{cp}}{K} = \frac{3 \cdot (1 - 2\nu)}{E} \sigma_{cp}.$$

Здесь K – это модуль объемной деформации. При больших пластических деформациях данное допущение заменяется допущением о несжимаемости материала.

3. Компоненты девиатора напряжений пропорциональны компонентам девиатора деформаций:

$$D_\varepsilon = \chi \cdot D_\sigma.$$

Здесь $\chi = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_1 - \varepsilon_{cp}}$ – модуль пластичности.

При возрастающих напряжениях поведение материала в области пластических деформаций не отличается от его упругого поведения, а при разгрузке появляется пластическая деформация.

Как показывают экспериментальные исследования [10], деформационная теория пластичности справедлива при относительно небольших пластических деформациях при осуществлении простого нагружения, когда все нагрузки растут пропорционально одному параметру. При больших деформациях или при сложном нагружении поведение бетона отличается от того, что предлагает деформационная теория пластичности, так как объемный закон Гука не соблюдается.

Теория пластического течения рассматривает не сами деформации, а их приращения. При построении теории используются следующие допущения:

1. Связь между интенсивностью напряжений и интенсивностью деформаций не зависит от вида напряженного состояния.

2. Объемные изменения являются только упругими и между приращением объемной деформации и приращением среднего напряжения существует линейная зависимость:

$$d\varepsilon_v = \frac{3 \cdot d\sigma_{cp}}{K} = \frac{3 \cdot (1 - 2\nu)}{E} d\sigma_{cp}.$$

3. Девиатор приращения пластической деформации пропорционален девиатору напряжений:

$$D_{d\varepsilon}^{pl} = d\lambda \cdot D_\sigma.$$

Коэффициент пропорциональности $d\lambda$ – некоторая функция напряжений. При использовании критерия Друкера – Прагера зависимость принимает вид:

$$\sqrt{J_2(D_\sigma)} = A + B \cdot I_1(T_\sigma).$$

Здесь $I_1(T_\sigma) = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ – первый инвариант тензора напряжений; $J_2(D_\sigma) = \frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]$ – второй инвариант девиатора напряжений; $A = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{\sigma_c \cdot \sigma_t}{\sigma_c + \sigma_t} \right)$; $B = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{\sigma_t - \sigma_c}{\sigma_c + \sigma_t} \right)$ – константы, определяемые по экспериментальным данным; σ_t , σ_c – пределы прочности при одноосном растяжении и сжатии.

Данный критерий подходит как для пластичных, так и для хрупких материалов. Также он может применяться для описания разрушения скальных грунтов, бетона, полимеров и других материалов. Однако, его применение дает большие погрешности, если прочности материала при сжатии и растяжении отличаются больше, чем на порядок.

При использовании критерия прочности Гениева теория пластического течения записывается в виде:

$$3 \cdot J_2(D_\sigma) = [\sigma_c \cdot \sigma_t + (\sigma_c - \sigma_t) I_1(T_\sigma)] \times \left\{ 1 - \left(1 - \frac{3T_c^2}{\sigma_c \cdot \sigma_t} \right) \left[1 + \frac{J_3(D_\sigma)}{2} \left(\frac{J_2(D_\sigma)}{3} \right)^{-\frac{3}{2}} \right] \right\}.$$

Здесь $J_3(D_\sigma) = (\sigma_1 - \sigma_0) \cdot (\sigma_2 - \sigma_0) \cdot (\sigma_3 - \sigma_0)$ – третий инвариант девиатора напряжений; T_c – параметр прочности, принимаемый в следующих пределах [10]:

$$0,168 \approx \sqrt{\frac{11}{39}} \sqrt{\sigma_c \cdot \sigma_t} \leq T_c \leq \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\sigma_c \cdot \sigma_t} \approx 0,183.$$

Исходя из исследований работы [10], при использовании критерия Гениева в условиях плоского напряженного состояния возможно как завышение расчетной прочности бетона, так и её занижение.

Модели деформирования для стали

Арматура описывается как деформационной теорией пластичности, так и теорией

пластического течения с использованием критерия текучести фон Мизеса. При этом учитывается жесткость арматуры не только при растяжении-сжатии, но и при сдвиге.

При использовании деформационной теории пластичности используется билинейная диаграмма деформирования или её экспоненциальные аппроксимации. Объемная деформация арматурного стержня определяется выражением:

$$\theta = \varepsilon_s + \varepsilon_n + \varepsilon_z = (1 - 2\nu_s) \varepsilon_s.$$

Здесь ε_s , ε_n , ε_z – деформации в направлении локальных осей (s , n , z) арматурного стержня, ν_s – коэффициент Пуассона по направлению s . Приведенное напряжение представляется выражением:

$$\sigma_{e,s} = \sqrt{3J_2(D_\sigma)} = \sqrt{\sigma_s^2 + 3(\tau_{sy}^2 + \tau_{sz}^2)}.$$

Здесь $J_2(D_\sigma)$ – второй инвариант девиатора напряжений, σ_s – предел текучести стали, τ_{sy} , τ_{sz} – касательные напряжения в плоскостях sy и sz соответственно.

Приведенная деформация определяется из условия:

$$\varepsilon_{e,s} = \frac{2}{3} \sqrt{(1 + \nu)^2 (\varepsilon_x - \varepsilon_s^A)^2 + \frac{3}{4} [(\gamma_{sn} - \gamma_{sn}^A)^2 + (\gamma_{sz} - \gamma_{sz}^A)^2]}.$$

Здесь ε_s^A , γ_{sn}^A , γ_{sz}^A – остаточные деформации.

В теории пластического течения фон Мизеса предполагается, что опасное (предельное) состояние нагруженного тела определяется предельной величиной накопленной удельной потенциальной энергии формоизменения. При этом считается, что материал следует закону Гука вплоть до наступления предельного состояния. Условие пластичности фон Мизеса записывается как:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}.$$

Здесь σ_1 , σ_2 , σ_3 – главные напряжения. В момент наступления пластического состояния интенсивность напряжения σ_i становится равной истинному пределу текучести.

Учет физической нелинейности по рекомендациям нормативных документов

Ввиду того, что бетон начинает работать нелинейно даже при малых нагрузках, перераспределение усилий в железобетоне не стоит недооценивать. Однако, этим зачастую пренебрегают ввиду определенных обстоятельств. Физическая нелинейность учитывается исключительно путем понижения жесткостей конечных элементов с помощью понижающих коэффициентов.

В нормах СП 52-103-2007 «Железобетонные монолитные конструкции зданий» при

расчете деформаций конструкций в первом приближении значения понижающих коэффициентов относительно начального модуля упругости бетона с учетом длительности действия нагрузки рекомендуется принимать: для вертикальных несущих элементов – 0,6, а для плит перекрытий (покрытий) – 0,2 при наличии трещин или 0,3 при их отсутствии.

Расчет в линейной и нелинейной постановке с использованием ПК SCAD Office

Для оценки влияния физической нелинейности на величину перемещений и усилий была создана тестовая модель, для которой проведены линейный расчет, расчеты с использованием различных вариантов нелинейных теорий [14–15], а также расчет, в котором для учета нелинейной работы материала использовались понижающие коэффициенты для модуля упругости материала в соответствии с СП 52-103-2007. Расчетная модель создавалась в системе прочностного анализа и проектирования конструкций SCAD (версия 21.1.9.7). Объектом изучения была выбрана монолитная железобетонная рама пролетом $l = 10$ м, высотой $h = 4$ м, сечением колонн 400 мм x 400 мм и сечением ригеля 400 мм x 600 мм, с жестким защемлением баз колонн. На ригель приложена распределенная нагрузка интенсивностью 3 т/м по

всей длине пролета и сосредоточенная нагрузка 5 т на расстоянии 2 м от правого края ригеля. На колонны действует распределенная нагрузка (слева направо) интенсивностью 1 т/м по всей высоте.

Линейный расчет проводится в двух вариантах. Первый вариант предполагает постоянное значение модуля упругости бетона. Во втором варианте модуль упругости бетона изменяется в соответствии с рекомендациями норм СП 52-103-2007, что имитирует нелинейный расчет.

После выполнения линейного расчета схема преобразуется для выполнения расчета с учетом физической нелинейности. Элементам назначается тип № 405 (пространственный стержень с учетом физической нелинейности).

Выбор расчетной теории происходит на этапе создания расчетной модели при задании жесткости элементам. Нелинейный режим расчета вызывается установкой флажка «Физическая нелинейность» в диалоговом окне «Жесткость». После установки флажка появляется диалоговое окно «Материалы», в котором можно указать физико-механические характеристики материала и выбрать вариант теории. Программа обеспечивает два варианта пластического поведения материала: согласно деформационной теории пластичности и теории пластического течения. По умолчанию используется деформационная теория пластичности (рис. 1).

Общие данные		
☒	Деформационная теория пластичности	
☐	Теория пластического течения Друкера - Прагера	
☐	Теория пластического течения Гениева	
☐	Пластичность	
Свойства бетона		
☐	Игнорировать работу бетона на растяжение	
☐	Учитывать деградацию бетона	
☒	Аппроксимация Паде билинейной диаграммы	
☐	Диаграмма Европейской Комиссии по бетону	
	Объемный вес	2.5 Т/м³
	Коэффициент Пуассона	0.2
	Начальный модуль упругости бетона	2446483.18 Т/м²
	Предел прочности бетона на сжатие	779.82 Т/м²
	Предел прочности бетона на растяжение	68.81 Т/м²
	Относительный модуль(раз)упрочнения билинейной диаграммы при растяжении	0.2
	Относительный модуль(раз)упрочнения билинейной диаграммы при сжатии	0.2
Свойства арматуры		
☒	Билинейная диаграмма	
☐	Экспоненциальная аппроксимация билинейной диаграммы	
☐	Экспоненциальная аппроксимация трехлинейной диаграммы	
	Модуль упругости арматуры	20387359.84 Т/м²
	Коэффициент Пуассона арматуры	0.3
	Предел текучести арматуры на растяжение	21406.73 Т/м²
	Предел текучести арматуры на сжатие	21406.73 Т/м²
	Относительный модуль(раз)упрочнения в зоне растяжения для арматуры	0
	Относительный модуль(раз)упрочнения в зоне сжатия для арматуры	0

Рис. 1. Вкладка «Жесткость стержневых элементов»
Fig. 1. Bar "Stiffness Tab"

После задания характеристик материалов имеется возможность визуализировать диаграмму «Напряжение – деформация».

Билинейная диаграмма и аппроксимация билинейной диаграммы представлены на рис. 2.

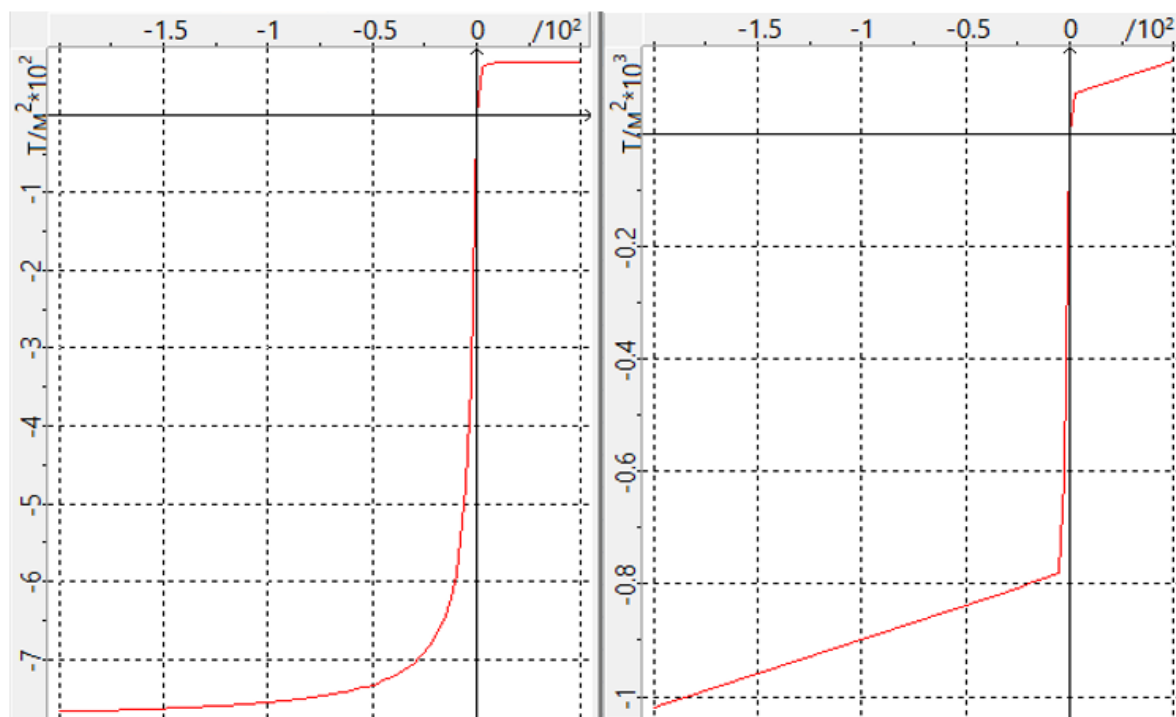


Рис. 2. Диаграммы «Напряжение – деформация»
Fig. 2. Stress-strain diagrams

Далее задается схема армирования железобетонных элементов и эти элементы включаются в группу конструктивных железобетонных элементов (рис. 3).

Решение нелинейной задачи программными комплексами производится шаговым методом. Процессор организует пошаговое нагружение конструкции и обеспечивает решение линеаризованной системы уравнений на каждом шаге для текущего

приращения вектора узловых нагрузок, сформированного для конкретного нагружения. Параметры шагового процесса были сформированы во вкладке «Моделирование нелинейных нагрузок».

Результаты линейного расчета представлены на рис. 4. Сравнение результатов расчетов для сечения в середине пролета приведено в табл. 1 и 2.

Таблица 1. Величина изгибающего момента в середине пролета

Table 1. Magnitude of bending moment in the middle of span

№	Вид расчета	Изгибающий момент, т*м	Расхождение, %
1	Нелинейный по СП 52-103-2007	22,71	–
2	Нелинейный по деформационной теории пластичности	30,56	34,6
3	Нелинейный по теории Друкера – Прагера	30,57	34,6
4	Нелинейный по теории Гениева	35,4	55,8

Таблица 2. Величина прогиба в середине пролета

Table 2. Deflection value in the middle of the span

№	Вид расчета	Прогиб, мм	Расхождение, %
1	Нелинейный по СП 52-103-2007	42,3	–
2	Нелинейный по деформационной теории пластичности	53,57	26,6
3	Нелинейный по теории Друкера – Прагера	21,41	–49,4
4	Нелинейный по теории Гениева	44,45	5,1

Участки

☐ поперечная арматура ☐ боковая арматура
 Арматура S1 Арматура S2
☐ диаметры разные ☐ диаметры разные
☐ в два ряда ☐ в два ряда
 Число участков: 1 [Площади](#)

Участок	Длина %	S1 Ø1		S2 Ø1	
		Ø мм	шт	Ø мм	шт
1	100	14	2	28	3

Имя	Описание					
	S1	S2	S3	S4	S _{wZ}	S _{wY}
1	1.2d10	1.2d10				

Имя:

Рис. 3. Вкладка «Схемы армирования»
Fig. 3. Reinforcement Diagram Tab

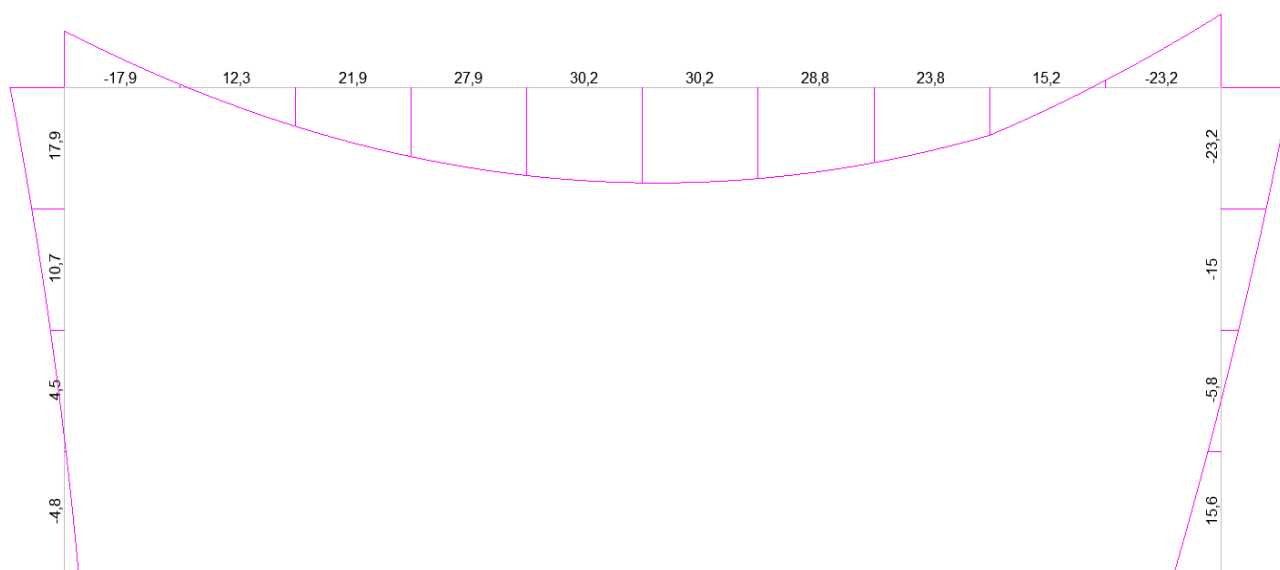


Рис. 4. Эпюра M_y (т*м) в линейном расчете
Fig. 4. M_y (t * m) graph in linear calculation

Из табл. 1 видно, что расчет по всем теориям физической нелинейности показывает примерно одинаковые усилия в пролете.

Максимальная погрешность по срав-

нению с нелинейным расчетом по СП 52-103-2007 составляет 55,8%.

Величина прогиба в середине пролета, полученного по линейному расчету, равна 12,8 мм.

При сравнении величин прогиба из табл. 2, полученных разными нелинейными методами, можно увидеть, насколько сильно отличаются значения прогибов по сравнению с линейным расчетом. Наибольшая погрешность составляет 69%.

Предельное значение прогиба для рассчитываемой рамы по рекомендациям СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия»:

$$l/233,3 = 10/233,3 = 0,043 \text{ м} = 43 \text{ мм.}$$

Таким образом, при линейном расчете жесткость рамы обеспечена, а при нелинейном расчете жесткость обеспечена только по теории течения Друкера – Прагера.

Заключение

В реальной практике строительного проектирования расчет чаще проводят без учета физической нелинейности работы материала, и применение нелинейного расчета может показаться лишней процедурой. Поскольку при учете физической нелинейности максимальные напряжения в кон-

струкциях могут не только уменьшиться, но и возрасти по сравнению с линейным расчетом, запас прочности по линейному расчету в одних местах конструкции (например, на опорах балок перекрытий) оказывается излишним, а в других местах недостаточным. Кроме этого, линейный расчет недооценивает величину перемещений элементов конструкций.

Поэтому применение нелинейных расчетов должно стать стандартной процедурой при расчете конструкций зданий, их стоит использовать и в тех случаях, когда применение простых стандартных методов расчета сечений является недостаточным и не дает полной информации о поведении конструктивной системы.

Нелинейный расчет может оказаться полезным при оценке прочности уже готовой конструкции, при расчете элементов конструкций на жесткость по второй группе предельных состояний или на устойчивость. Разнонаправленность полученных результатов требует дополнительных верификационных проверок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Евсеев Н.А. Учет физической нелинейности железобетонных конструкций при численных расчетах конструктивных систем // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 5 (64). С. 66–70. <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2017-14-5-66-70>
2. Залесов А.С., Мухамедиев Т.А., Чистяков Е.А. Учет физической нелинейности при расчете железобетонных монолитных конструкций высотных зданий // Строительная механика и расчет сооружений. 2005. № 1. С. 4–8.
3. Блохина Н.С. Проблема учета физической нелинейности при расчете строительных конструкций // Вестник МГСУ. 2011. № 6. С. 384–387.
4. Теплых А.В. Применение оболочечных элементов при расчетах строительных стальных конструкций в программах SCAD и Nastran с учетом геометрической и физической нелинейности // Промышленное и гражданское строительство. 2011. № 6. С. 49–52.
5. Теплых А.В. Применение оболочечных и объемных элементов при расчетах строительных стальных конструкций в программах SCAD и Nastran с учетом геометрической и физической нелинейности // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 3. С. 4–20. <https://doi.org/10.18720/MCE.21.4>
6. Перельмутер А.В., Тур В.В. Готовы ли мы перейти к нелинейному анализу при проектировании? // Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций. 2017. № 13 (3). С. 86–102.
7. Городецкий А.С., Батрак Л.Г., Городецкий Д.А., Лазнюк М.В., Юсипенко С.В. Расчет и проектирование конструкций высотных зданий из монолитного железобетона. Киев: Факт, 2004. 106 с.
8. Фиалко С.Ю. Четырехузловой конечный элемент для моделирования поведения тонкостенных железобетонных конструкций // Инженерно-строительный журнал. 2014. № 5 (49). С. 27–36. <https://doi.org/10.5862/MCE.49.3>
9. Фиалко С.Ю. Применение метода конечных элементов к анализу прочности и несущей способности тонкостенных железобетонных конструкций с учетом физической нелинейности. М.: АСВ, 2018. 192 с.
10. Корсун В.И., Недорезов А.В., Макаренко С.Ю. Сопоставительный анализ критериев прочности для бетонов // Современное промышленное и гражданское строительство. 2014. № 1. С. 65–78.
11. Сковцов Ю.В. Теории пластичности и ползучести. Самара: СГАУ, 2013. 85 с.
12. Тарануха Н.А., Васильев А.С. Анализ критериев предельного состояния для конструкций из композитных материалов // Ученые записки КНАГТУ. 2015. № III-1(23). С. 81–87.

13. Клованич С.Ф., Мироненко И.Н. Метод конечных элементов в механике железобетона. Одесса: ОНМУ, 2007. 110 с.
14. Fialko S.Yu., Perelmuter A.V. Inelastic analysis of reinforced concrete structures in SCAD // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2019. № 15 (1). P. 54–60. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2019-15-1-54-60>
15. Fialko S.Yu., Karpilovskyi V.S. Triangular and quadrilateral flat shell finite elements for nonlinear analysis of thin-walled reinforced concrete structures in SCAD software // Proceedings of the 11th International Conference "Shell Structures: Theory and Applications", (SSTA 2017), October 11–13, 2017. Gdansk, Poland, 2017. Vol. 4. P. 367–370. <https://doi.org/10.1201/9781315166605-83>
16. Geraymovich Y.D., Yevzerov I.D., Marchenko D.V. The new physically nonlinear

finite elements in software package LIRA 10.8 // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2019. №15 (1). P. 61–66. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2018-15-1-61-66>
17. Hagsten L.G., Rasmussen A.B., Fisker J. Strain capacity of reinforced concrete members subjected to uniaxial tension // Procedia engineering. 2017. № 172. P. 338–346. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.038>
18. Tur V., Nadolski V. A first attempt to determine the partial factors according to Eurocodes for the verification of ULS of steel elements for conditions of the Republic of Belarus // Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering. 2016. №1/14. P. 44–50. <https://doi.org/10.5755/j01.sace.14.1.15066>
19. Рудых О.Л., Соколов Г.П., Пахомов В.Л. Введение в нелинейную строительную механику. М.: АСВ, 1998. 103 с.

REFERENCES

1. Evseev NA. Accounting of physical nonlinearity of reinforced concrete structures at computation of structural systems. *Vestnik grajdanskih ingenerov = Bulletin of Civil Engineers*. 2017;5(64):66-70. (In Russ.) <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2017-14-5-66-70>
2. Zalesov AS, Mukhamediev TA, Chistyakov EA. Physical nonlinearity accounting for calculation of reinforced concrete monolithic structures of high-rise buildings. *Stroitel'naya mehanika i raschet sooruzheniy = Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2005;1:4–8. (In Russ.)
3. Blokhina NS. The problem of physical nonlinearity accounting in the building structures calculation. *Vestnik MGSU*. 2011;6:384–387. (In Russ.)
4. Teplykh AV. The use of shell elements for calculation of building steel structures in the SCAD and Nastran programs with due regard for geometrical and physical nonlinearities. *Promyshlennoe i grajdanskoe stroitel'stvo = Industrial and civil engineering*. 2011;6:49–52. (In Russ.)
5. Teplykh AV. Application of shell and solid elements in the analysis of building steel structures in the SCAD and Nastran software taking into account geometrical and physical nonlinearity. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal = Magazine of Civil Engineering*. 2011;3:4–20. (In Russ.) <https://doi.org/10.18720/MCE.21.4>
6. Perelmuter AV, Tur VV. Whether we are ready to proceed to a nonlinear analysis

at designing? *Mezhdunarodnyi zhurnal po raschetu grazhdanskikh i stroitel'nykh konstruksii = International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2017;13(3):86–102. (In Russ.)
7. Gorodetsky AS, Batrak LG, Gorodetsky DA, Laznyuk MV, Yusipenko SV. *Calculation and design of structures of high-rise buildings made of monolithic reinforced concrete*. Kiev, Fact; 2004. 106 p. (In Russ.)
8. Fialko SYu. Quadrilateral shell finite element for analysis of thin-walled reinforced concrete structures. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal = Magazine of Civil Engineering*. 2014;5(49):27–36. (In Russ.) <https://doi.org/10.5862/MCE.49.3>
9. Fialko SYu. Application of finite element method to analysis of strength and bearing capacity of thin-walled reinforced concrete structures taking into account physical nonlinearity. Moscow, ASV; 2018. 192 p. (In Russ.)
10. Korsun VI, Niedoriezov AV, Makarenko SYu. Comparative analysis of the strength criteria for concrete. *Sovremennoe promyshlennoe i grajdanskoe stroitel'stvo = Modern industrial and civil engineering*. 2014;1:65–78. (In Russ.)
11. Skvortsov YuV. Plasticity and creep theories. Samara, SGAU; 2013. 85 p. (In Russ.)
12. Taranukha NA, Vasilyev AS. An analysis of limit state criteria for the construction of composite materials. *Uchenye zapiski KnAGTU = Scholarly Notes of Komsomolsk-na-Amure State Technical University*. 2015;III-1(23):81–87. (In Russ.)

13. Klovanih SF, Mironenko IN. Finite element method in reinforced concrete mechanics. Odessa, ONMU; 2007. 110 p. (In Russ.)
14. Fialko SYu, Perelmutter AV. Inelastic analysis of reinforced concrete structures in SCAD. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2019;15(1):54–60. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2019-15-1-54-60>
15. Fialko SYu, Karpilovskyi VS. Triangular and quadrilateral flat shell finite elements for nonlinear analysis of thin-walled reinforced concrete structures in SCAD software. *Proceedings of the 11th International Conference "Shell Structures: Theory and Applications", (SSTA 2017). 11-13th October 2017, Gdansk, Poland*. Gdansk, 2017;4:367–370. <https://doi.org/10.1201/9781315166605-83>
16. Geraymovich YD, Yevzerov ID, Marchenko DV. The new physically nonlinear finite el-

- ements in software package LIRA 10.8. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2019;15(1):61–66. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2018-15-1-61-66>
17. Hagsten LG, Rasmussen AB, Fisker J. Strain capacity of reinforced concrete members subjected to uniaxial tension. *Procedia engineering*. 2017;172:338–346. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.038>
18. Tur V, Nadolski V. A first attempt to determine the partial factors according to Eurocodes for the verification of ULS of steel elements for conditions of the Republic of Belarus. *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*. 2016;1/14:44–50. <https://doi.org/10.5755/j01.sace.14.1.15066>
19. Rudykh OL, Sokolov GP, Pakhomov VL. Introduction to nonlinear construction mechanics. Moscow, ASV;1998. 103 p. (In Russ.)

Сведения об авторах

Куш Вадим Александрович,
магистрант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Россия,
e-mail: caxap818@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0443-6405>

Ященко Владимир Петрович,
кандидат технических наук,
доцент кафедры механики и сопротивления
материалов,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Россия,
✉e-mail: vp_yashenko@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3800-0570>

Information about the authors

Vadim A. Kushch,
master's degree student,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,
e-mail: caxap818@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0443-6405>

Vladimir P. Yashchenko,
Cand. Sci (Eng.),
Associate Professor of the Department
of Mechanics and Strength of Materials,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,
✉e-mail: vp_yashenko@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3800-0570>

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors

All authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests regarding the publication of this article.

Все авторы прочитали и одобрили
окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and
approved by all the co-authors.

Статья поступила в редакцию 30.01.2021.
Одобрена после рецензирования 24.02.2021.
Принята к публикации 26.02.2021.

The article was submitted 30.01.2021.
Approved after reviewing 24.02.2021.
Accepted for publication 26.02.2021.