

## **УЧЕТ НЕЛИНЕЙНОЙ РАБОТЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА В ИНЖЕНЕРНЫХ РАСЧЕТАХ. РЕЖИМ «ИНЖЕНЕРНАЯ НЕЛИНЕЙНОСТЬ» В ПК ЛИРА-САПР.**

*В статье рассматривается итерационный метод «инженерная нелинейность». Представленный метод позволяет определить реальные жесткостные характеристики сечения, которые могут быть пониженными в связи с появлением трещин, пластическими деформациями бетона и арматуры.*

*Предлагаемый метод «инженерная нелинейность», с одной стороны позволяет более точно учитывать распределение жесткостей, с другой стороны по технологии практически аналогичен традиционным методам расчета в линейной постановке, т.е. позволяет выполнить расчет на все нагружения, получить РСУ и РСН, подбор арматуры.*

*Ключевые слова: жизненный цикл, компьютерное моделирование, конструктивные элементы, нелинейный расчет, устойчивость, физическая и геометрическая нелинейность, напряженно - деформированное состояние.*

*In given article is considered iterative method “engineering nonlinearity”. Given method allows defining real characteristics of section stiffness that could be decreased owing to cracks occurrence, plastic deformations of concrete and reinforcement.*

*Proposed method “engineering nonlinearity” allows on the one hand to take into account more exactly stiffness distribution, on the other hand is similar to traditional analysis methods into linear formulation, i.e. allows to perform analysis on all load-cases, obtain DCF and DCL, perform reinforcement selection.*

*Key words: life cycle, computer modelling, structural elements, nonlinear analysis, stability, physical and geometrical nonlinearity, stress - strain state.*

### **Вступление**

Ползучесть, трещины и другие специфические особенности железобетона обуславливают изменение жесткостных характеристик элементов уже на ранних этапах нагружения, включая и эксплуатационную стадию. Это приводит к перераспределению усилий, значительному увеличению перемещений по сравнению с линейно-упругим расчетом. Нормативные документы

ориентируют инженера на учет этих факторов. Так в ДБН и Еврокоде рекомендуется проводить расчет с учетом физической нелинейности.

Программный комплекс ЛИРА-САПР предоставляет возможность инженеру выполнять такие расчеты. Однако расчет конструкции с учетом физической нелинейности [2, 3] в строгом математическом понимании этого процесса при использовании в массовых инженерных расчетах имеет ряд недостатков:

- такой расчет может быть выполнен только на одно нагружение и его нельзя использовать в РСУ или РСН;
- такой расчет требует больших ресурсозатрат – шаговый метод обуславливает необходимость многократного решения систем линеаризованных уравнений;
- такой расчет требует задания арматуры (диаметры и расположение) в каждом сечении стержня или пластинчатого элемента.

С другой стороны, некоторые нормативы, пытаясь несколько сгладить это несоответствие, предлагают просто вводить занижающие коэффициенты на жесткость для изгибаемых элементов 0,3 и сжатых 0,6. Конечно, такое грубое предположение не учитывает, что снижение жесткости зависит от величины и характера напряженного-деформированного состояния сечения. О снижении жесткости растянутых элементов вообще ничего не говорится.

Метод «Инженерная нелинейность» ориентирован на некоторое устранение этого несоответствия (некоторые предложения в этом направлении были известны ранее [1]) и этот метод надо позиционировать как метод уточненного дифференцированного учета снижения жесткостных характеристик железобетонных элементов.

Метод «Инженерная нелинейность» состоит в следующем:

1. Задается «определяющее нагружение», которое по мнению инженера в основном определяет напряженного-деформированного состояние конструкции (развитие трещин, пластические деформации бетона и арматуры) на протяжении жизненного цикла конструкции. «Определяющее нагружение»

может составляться на основании набора нагрузжений (собственный вес, полезные нагрузки и др.), которые задаются инженером для последующего традиционного расчета или назначается инженером на основе других предположений.

2. Производится расчет на «определяющее нагружение» в физически нелинейной постановке с одновременным подбором арматуры. Расчет выполняется итерационным методом.

3. В результате итерационного расчета на основе НДС каждого сечения стержня и КЭ пластинчатой конструкции определяются жесткостные характеристики.

4. Выполняется традиционный расчет конструкции, элементы которой имеют жесткостные характеристики определяемые в результате итерационного расчета. Традиционный расчет подразумевает расчет в линейно-упругой постановке на весь набор нагрузжений (собственный вес, полезная нагрузка, сеймика и др.), составление РСУ или РСН, подбор или проверку сечений стержней железобетонных и стальных элементов, конструирование.

Наиболее ответственным и сложным в постановке и реализации является этап определения жесткостных характеристик сечений стержня и пластинчатого элемента [4].

### **Определение жесткостных характеристик сечения стержня**

На рис. 1 представлено произвольное сечение стержня, на которое действует два момента  $M_x$  и  $M_y$ , нормальная сила  $N$ . Моменты действуют относительно главных осей сечения  $x$  и  $y$ . Нормальная сила приложена в точке  $C$  – пересечении геометрической оси стержня с плоскостью сечения.

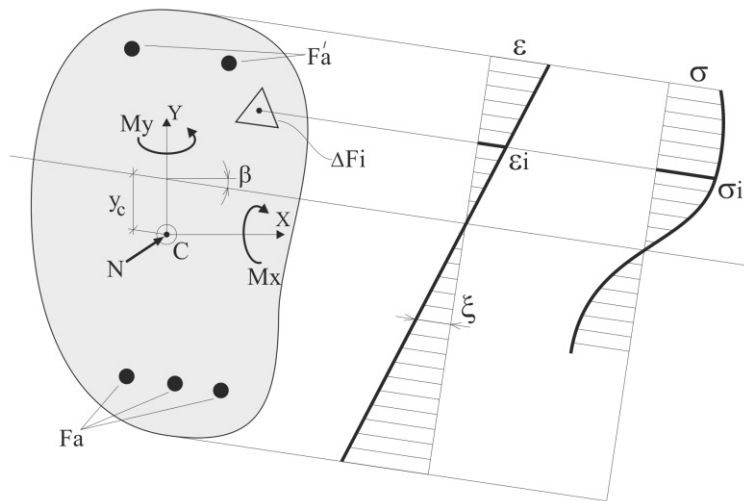


Рис. 1. Напряженно-деформированное состояние сечения стержня

Зависимость  $\sigma$ – $\epsilon$  для бетона представлена на рис. 2, для арматуры – на рис. 3.

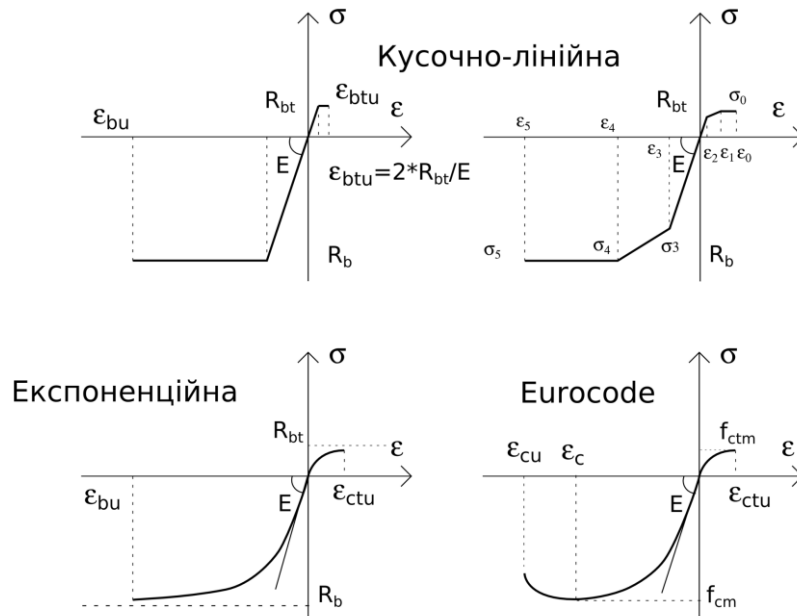


Рис. 2. Зависимость напряжение-деформация для бетона

В результате итерационного процесса находятся:

$y_c$  – смещение нейтральной оси;

$\beta$  – угол поворота нейтральной оси;

$\xi$  – привязка сечения.

Эти три неизвестных находятся из трех уравнений равновесия:

$$\sum Z=0, \sum m_x=0, \sum m_y=0.$$

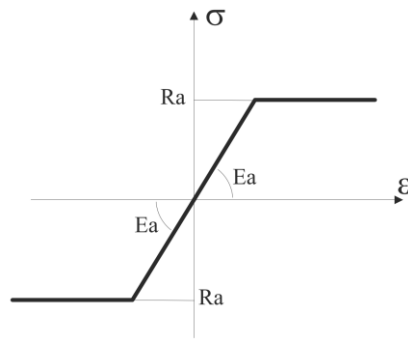


Рис. 3. Зависимость напряжение-деформация для арматуры

Жесткостные характеристики  $E_{об}F$ ,  $E_{об}I_x$ ,  $E_{об}I_y$  определяются на основании зависимостей  $\sigma$ - $\epsilon$  для бетона и арматуры (рис. 2, 3).

$$E_{об}F = \sum_{i=1}^n E_{сек,i} \Delta F_i$$

$$E_{об}I_x = \sum_{i=1}^n E_{сек,i} \Delta F_i Y_i^2$$

$$E_{об}I_y = \sum_{i=1}^n E_{сек,i} \Delta F_i X_i^2$$

Здесь  $\Delta F_i$  – элементарные участки, на которые расчленяется сечение бетона и площади отдельных стержней арматуры.

$n$  – количество участков.

$E_{сек,i}$  – секущий модуль деформаций, который определяется на основании зависимостей  $\sigma$ - $\epsilon$  (рис. 2,3).

$x_i$ ,  $y_i$  – расстояние центра тяжести  $i$  участка до главных осей, положение которых ( $Y_c$ ,  $\beta$ ) определено в результате итерационного расчета.

Режим «Инженерная нелинейность» реализован в программном комплексе ЛИРА-САПР. Ниже приводятся результаты расчета рамы на основе инженерной нелинейности (рис. 4).

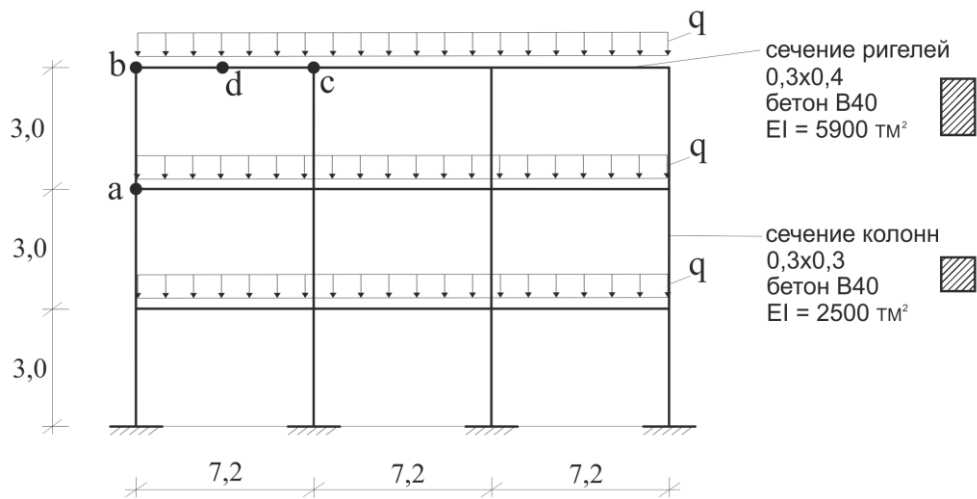


Рис. 4. Расчетная схема исследуемой конструкции

В качестве определяющего нагружения была принята нагрузка  $q=15$  т/п.м. на рис. 5 приведены соответствующие жесткости для ригеля в – с и колонн а – в.

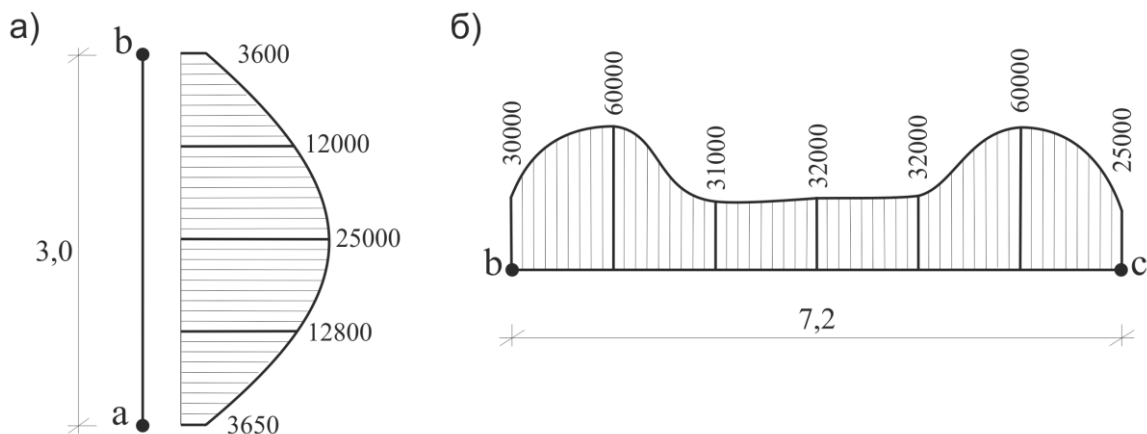


Рис. 5. Эпюры жесткостей  $EI$   $\text{тм}^2$  полученных на основе расчета по методу «ИНЖЕНЕРНАЯ НЕЛИНЕЙНОСТЬ»: а) для колонны, б) для ригеля

Анализируя эпюры жесткостных характеристик можно сделать вывод, что рекомендуемое нормативами снижение жесткостных характеристик для колонн на понижающий коэффициент 0,6 (в этом случае эпюра для колонн выглядела бы постоянной и равной  $0,6 \times 2500 = 1500 \text{ тм}^2$ ) и для ригелей 0,3 (в этом случае эпюра выглядела бы постоянной и равной  $0,3 \times 5900 = 1770 \text{ тм}^2$ ) выглядит достаточно грубым приближением.

В таблице 1 приведены результаты линейно-упругого расчета рамы на нагрузку  $q=20$  т/п.м. с учетом дифференцированного распределения

жесткостей для всех элементов, полученных на основе режима «Инженерная нелинейность».

Табл. 1

Вид расчета	Значение параметров НДС	Статический расчет			Динамический расчет	
		Момент в ригеле «в – с» в узле «в» в тм	Момент в ригеле «в – с» в узле «d» в тм	Перемещение в узле «d» в тм	Частота $\omega$ в герцах	Период Т в сек.
линейно-упругий расчет с начальными жесткостями		58,4	100,7	54,0	0,182	5,51
линейно-упругий расчет с жесткостями полученными на основе режима «Инженерная нелинейность»		74,3	84,5	113,0	0,158	6,32

Анализируя результаты расчета приведенные в табл. 1 можно сделать следующие выводы:

- получено некоторое перераспределение усилий – в менее нагруженном сечении «в» ригеля момент увеличился, в более нагруженном сечении «d» ригеля момент уменьшился;
- перемещение узла «d» увеличилось более чем в 2 раза;
- частота собственных колебаний (первая форма) уменьшилась, а период увеличился.

В заключение еще раз следует отметить, что режим «Инженерная нелинейность» предназначен только для учета пониженной жесткости железобетонных конструкций в массовых инженерных расчетах и ни в коем случае не заменяет расчет с учетом физической нелинейности [3].

В ПК ЛИРА-САПР реализован режим «Инженерная нелинейность». Для учета изменения жесткостных характеристик железобетонных элементов пользователю необходимо только назначить «определяющее нагружение» и включить этот режим.

## Литература

1. Бондаренко В.М. Инженерные методы нелинейной теории железобетона / В.М. Бондаренко – М.: Стройиздат, 1982. – 287 с.
2. Барабаш М. С. Компьютерное моделирование процессов жизненного цикла объектов строительства: Монография / Мария Сергеевна Барабаш. – К.: «Сталь», 2014. – 301 с.
3. Городецкий А.С. К расчету физически нелинейных плоских рамных систем / А. С. Городецкий, В. С. Здоренко // Строительная механика и расчет сооружений. – 1969. – № 4. – С. 61-68.
4. Пикуль А.В. Определение жесткостных характеристик сечения железобетонного стержня с учетом нелинейных свойств материала / А.В. Пикуль, Д.А. Городецкий // Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений: тезисы докладов IV Международного симпозиума. – Челябинск.: Издательский центр ЮУрГУ, 2012. – С. 228.