

УДК 624.046.5

**УЧЕТ НЕЛИНЕЙНОЙ РАБОТЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ  
КОНСТРУКЦИЙ В ПРАКТИЧЕСКИХ РАСЧЕТАХ**

*д.т.н., проф. Городецкий А.С. \*, к.т.н., доцент Барабаш М.С. \*\**

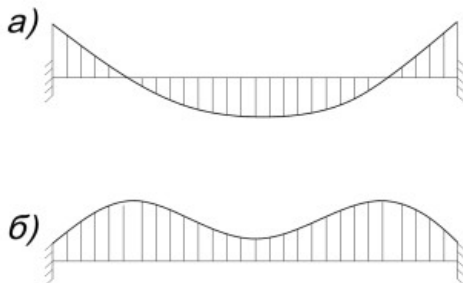
*\*Киевский национальный университет строительства и архитектуры,*

*\*\*Национальный авиационный университет, Киев*

В СП 52-103-2007 «железобетонные монолитные конструкции зданий» при расчете железобетонных конструкций «рекомендуется применять модуль упругости материала равным  $E_b$  с понижающим коэффициентом: 0,6 – для вертикальных сжатых элементов; 0,3 – для плит перекрытий (покрытий) с учетом длительности действия нагрузки.»

Хотя эти рекомендации даются в качестве первого приближения, ничего не говорится, как организовать последующие приближения для получения ожидаемых адекватных результатов. Поэтому в практических расчетах зачастую эти коэффициенты вводятся в расчетную схему для выполнения расчетов по традиционной схеме – расчет на все нагруженные, выполнение РСУ (РСН), подбор арматуры.

Такой подход достаточно грубо оценивает действительную ситуацию. Это можно продемонстрировать на примере элементарной защемленной балки (рис.1).



*Рис.1 НДС защемленной балки*

*а) эпюра моментов*

*б) соответствующая эпюра жесткостей*

В реальных расчетах ситуация еще более сложная: балки, зачастую, испытывают значительные нормальные усилия; колонны испытывают значительные изгибное усилие; в пластичных элементах, как правило, возникают соизмеримые мембранные и изгибные усилия.

Методы учета физической нелинейности в достаточно строгой математической постановке (разрешающее управление строятся на основе имеющихся нелинейных зависимостей  $\sigma - \varepsilon$  для бетона и арматуры, нелинейные уравнения, решаются имеющимися методами решения

нелинейных уравнений) можно использовать в основном для исследовательских задач. Для практических расчетов такой подход имеет ряд недостатков:

- результаты расчетов выполнены для различных нагружений - нельзя складывать (принцип суперпозиции не работает), поэтому приходится делать много расчетов на различные РСН, число которых ограничено, ввиду большой трудоемкости одного нелинейного расчета.

- для выполнения расчета в такой нелинейной постановке необходимо задавать арматуру во всех сечениях элементов, т.к. в нелинейных расчетах наличие и расположения арматуры значительно влияет на НДС, в отличие от расчетов в нелинейной постановке. Процедура задания арматуры достаточно трудоемкая, требует большой подготовительной работы и в практических расчетах не всегда приемлема.

Предлагаемый компромиссный 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 расчетные сочетания усилий (PCY) и расчетные сочетания нагрузок (PCN), подбор арматуры.

Отличие заключается в том, что предварительно проводится итерационный расчет по определению пониженных жесткостных характеристик.

В основе метода «инженерная нелинейность» лежит процедура определения жесткостных характеристик сечения.

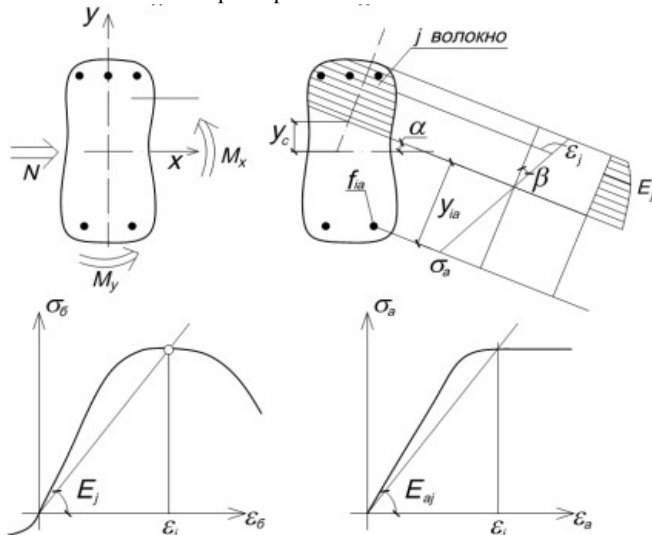


Рис.2. НДС сечения железобетонного стержня

Задача состоит в следующем:

Задано: геометрия сечения, арматура, материал сечения, усилия в сечении –  $M_x, M_y, N$  (рис.2).

Требуется: определить жесткостные характеристики сечения, соответствующие секущим моделям деформаций бетона и арматуры.

Для определения НДС сечения необходимо найти положения нейтральной оси, которое характеризуется тремя величинами (рис.2):

$y_c$  - смещение нейтральной оси;

$\alpha$  - угол поворота нейтральной оси;

$\beta$  – угол поворота (кривизна) сечения.

Решение задачи выполняется численным методом. Сечение рассчитывается на полоски параллельные нейтральной оси.

Эти величины находятся из трех уравнений равновесия:

$$\sum z = \sum_{j=1}^n f_{j\bar{\sigma}}(n, y_c, \alpha) \cdot \sigma_j(y_c, \alpha, \beta) + \sum_{i=1}^a f_{i\sigma} \sigma_{ia}(y_c, \alpha, \beta) + N = 0$$

$$\sum M_x = \sum_{j=1}^n f_{j\bar{\sigma}}(y_c, \alpha, \beta) \cdot \sigma_{j\bar{\sigma}}(y_c, \alpha, \beta) y_j(y_c, \alpha, \beta) + \sum_{i=1}^a f_{i\sigma} \sigma_{ia}(y_c, \alpha, \beta) y_{ia} + M_x + Ne_x = 0$$

$$\sum M_y = \sum_{j=1}^n f_{j\bar{\sigma}}(y_c, \alpha, \beta) \cdot \sigma_{j\bar{\sigma}}(y_c, \alpha, \beta) \cdot x_j(y_c, \alpha, \beta) + \sum_{i=1}^a f_{i\sigma} \sigma_{ia}(y_c, \alpha, \beta) \cdot x_{ia} + M_y + Ne_y = 0$$

После нахождения  $y_c, \alpha, \beta$  – определяются секущие  $EI_x, EI_y, EF, GI_{кр}$ . Для бетона в определение входит только сжатая часть бетона с переменным по сечению секущим моделям деформации. Для каждого арматурного стержня также используется соответствующий модуль деформации.

Матрица жесткости стержня, имеющего переменные по длине секущие жесткостные характеристики (рис.1) также строится численным методом (каждый стержень рассматривается как своеобразный супер элемент).

Для пластинчатых элементов аналогичная процедура производится для двух взаимно перпендикулярных сечений в центре КЭ. Матрица жесткости для пластинчатого конечного элемента строится как для ортотропного материала.

Для рассматриваемой конструкции с вычисленными секущими жесткостями выполняется статический расчет на «определяющее нагружение», которое, по мнению проектировщика, ответственно за понижение жесткостных характеристик железобетонных элементов в связи с появлением трещин, пластическими деформациями бетона и арматуры. Расчет является итерационным: на каждой итерации определяется арматура. Если отличие вычисленной арматуры и перемещений на  $m$  итерации от этих же параметров вычисленных на  $m - 1$  итерации лежит в пределах заданной точности, то расчет заканчивается.

Жесткостные характеристики элементов, вычисленные на  $m$  итерации, переменные по области конструкций и соответствующие «определяющему нагружению», является стартовым для последующего традиционного расчета:

- расчет на все нагружения;
- определение РСУ или РСН;
- подбор арматуры;
- конструирование.

Ниже приводится пример. Рассматриваемая конструкция представляет однопролетно двухэтажную раму (рис.3).

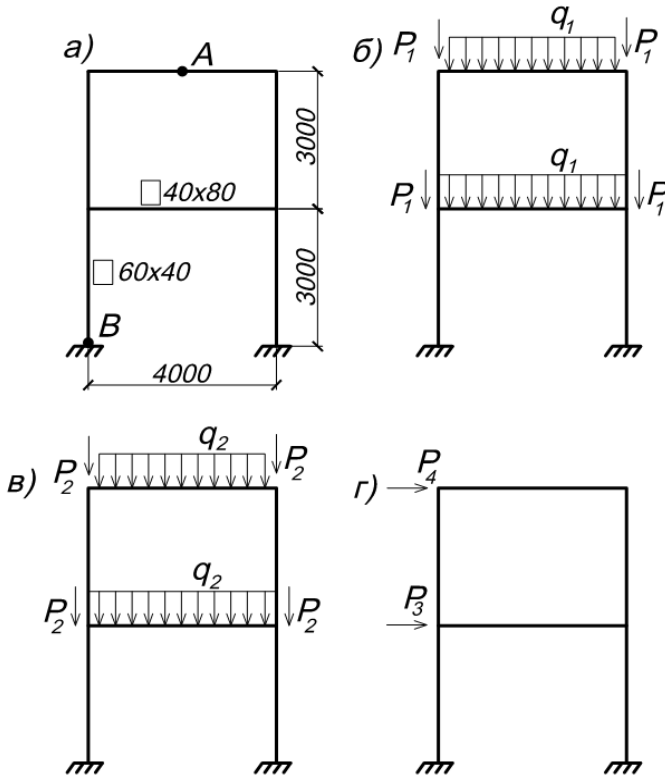


Рис.3. Исследуемая конструкция

а) геометрия и сечения; б) нагружение 1 ( $q_1=6\text{т/п.м}$ ,  $P_1=4\text{т}$ ); в) нагружение 2 ( $q_2=4\text{т/п.м}$ ,  $P_2=2\text{т}$ ); г) нагружение 3 ( $P_3=1$ ,  $P_4=2\text{т}$ )

В качестве «определяющего нагружения» принимаем сумму всех трех нагружений.

На это нагружение выполняем расчет в линейной постановке и методом «инженерная нелинейность».

Некоторые характерные результаты приведены в табл.1

*Таблица 1*

Характерные параметры		Расчет в линейной постановке	Расчет методом «инженерная нелинейность»
Перемещение узла А (мм)	X	0.508	0.684
	Z	4.41	8.43
Момент (тм)	A	32.0	37.4
	B	-10.7	-13.9

Сравнение полученных результатов свидетельствует, что расчет методом «инженерная нелинейность» дает ожидаемые несколько большие перемещения и некоторое перераспределение усилий.

### ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. А.С.Городецкий «Компьютерное моделирование процесса нагружения железобетонных конструкций». Сборник научных трудов Луганского национального университета, серия «Технические науки» N49/52, - Л.: Из-во «ЛНАУ», 2004, с.3-10.
2. М.С.Барабаш «Компьютерное моделирование процессов жизненного цикла объектов строительства», - К: Из-во «Сталь», 2014. – 301с.