

## **МОДЕЛЬ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Дорофеев В.С. Ковров А.В., Ковтуненко А.В., Чайковский Р.Э.,  
Максимова Т.А.

Одесская государственная академия строительства и архитектуры  
г. Одесса, Украина

**АННОТАЦИЯ:** Запропонована деформаційна модель роботи перерізів залізобетонних елементів, що згинаються та методика побудови діаграм «кривизна – згинальний момент» для прямокутних перерізів залізобетонних елементів. Виконано порівняння діаграм, отриманих за запропонованою методикою з експериментальними даними.

**АННОТАЦИЯ:** Предложена деформационная модель работы сечений изгибаемых железобетонных элементов и методика построения диаграмм «кривизна – изгибающий момент» для прямоугольных сечений железобетонных элементов. Выполнено сравнение диаграмм, полученных по предлагаемой методике с экспериментальными данными.

**ABSTRACT:** The model of section deformation of bent reinforced concrete elements and the method of the drawing up of the diagrams "curvature – bending moment" for rectangular sections of reinforced concrete elements is proposed. The comparison of the diagrams, got on proposed method with experimental data is executed.

**Ключевые слова:** железобетонный изгибаемый элемент, изгибающий момент, кривизна.

### **ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ**

Работы [2], [3], [4], [6], [7] посвящены изучению напряженно-деформированного состояния железобетонных изгибаемых элементов, проводимому под руководством А.Н.Бамбуры, Л.Р.Маиляна,

В.С.Дорофеева, Е.М.Бабича, которые основывались на построении реальных диаграмм деформирования материалов.

В работах [5], [9] предложен практический способ построения диаграмм «кривизна – изгибающий момент», основанный на предложениях И.Е.Прокоповича.

В работах [2], [3] предложена шагово-итерационная методика для определения внутренних усилий в сечениях изгибаемых железобетонных элементов, основанная на реальных диаграммах деформирования бетона, описанных при помощи полинома пятой степени.

В работах [6], [7] предложена методика исследования напряженно-деформированного состояния сечений изгибаемых железобетонных элементов, основанная на диаграммах деформирования бетона, описанных при помощи зависимостей ЕКБ-ФИП.

Для более полного учета процессов, происходящих в статически неопределимых железобетонных конструкциях при изменении нагрузок вплоть до разрушения, необходимо использование реальных диаграмм «кривизна – изгибающий момент» наиболее полно учитывающих работу материала и имеющих возможность применения в практических расчетах.

## ФОРМУЛИРОВАНИЕ ЦЕЛИ РАБОТЫ

Целью работы является разработка деформационной модели работы нормальных сечений изгибаемых железобетонных элементов и методики построения диаграмм «кривизна – изгибающий момент» для использования в расчетах статически неопределимых систем.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Для описания напряженно-деформированного состояния изгибаемых железобетонных элементов в работе принимаются следующие предпосылки:

1. Считается справедливой гипотеза Бернулли (гипотеза плоских сечений) – деформации по высоте сечения изменяются по линейному закону.

2. Между арматурой и окружающим ее бетоном существует сцепление, такое, что деформации в арматуре и бетоне равны между собой.

3. Зависимость «напряжения-деформации» при сжатии бетона описывается, в соответствии с предложениями А.Н.Бамбуры [3], при помощи полинома пятой степени.

Связь между напряжениями и деформациями при растяжении бетона описывается при помощи диаграммы Прандтля.

Взаимосвязь между напряжениями и деформациями при растяжении и сжатии арматуры описывается при помощи диаграммы Прандтля.

4. Сопротивление расчетного сечения считается исчерпанным при достижении деформациями крайнего сжатого волокна бетона или растянутой арматуры предельных значений, соответственно  $\epsilon_{bu}$  и  $\epsilon_{su}$ .

Принято выделять три стадии работы нормальных сечений изгибаемых железобетонных элементов. Рассмотрим их более подробно.

*Стадия I.* При невысоких нагрузках деформации бетона и арматуры в сечении носят упругий характер.

При дальнейшем увеличении нагрузки развиваются пластические деформации растянутого бетона. Деформирование сечения железобетонного изгибаемого элемента на данной стадии носит линейный характер.

Граница первой стадии – достижение деформациями крайнего растянутого волокна бетона предельного значения  $\epsilon_{btu}$  и образование трещины.

*Стадия II.* Внутренние растягивающие усилия воспринимаются арматурой и растянутым бетоном над трещиной.

При увеличении нагрузки развиваются неупругие деформации в сжатом бетоне, эпюра нормальных напряжений приобретает вид криволинейной трапеции. Трещина разрыва в растянутом бетоне продолжает развиваться по высоте сечения.

Границей второй стадии для слабо армированных сечений изгибаемых железобетонных элементов является достижение деформациями растянутой арматуры значений, соответствующих пределу упругости  $\epsilon_s = \epsilon_{sR}$ .

Для нормально и сильно армированных сечений изгибаемых железобетонных элементов граница второй стадии характеризуется достижением деформациями крайнего сжатого волокна значений  $\epsilon_b = \epsilon_{bR}$ , соответствующих напряжениям  $\sigma_b = R_b$ .

*Стадия III.* При увеличении нагрузки в сечениях слабо армированных изгибаемых железобетонных элементов увеличиваются деформации, при постоянном изгибающем моменте, воспринимаемым сечением. Разрушение происходит при достижении предельных деформаций растянутой арматуры  $\epsilon_s = \epsilon_{su}$ .

При увеличении нагрузки в сечениях нормально и сильно армированных изгибаемых железобетонных элементов деформации крайнего сжатого волокна превышают предельное значение  $\epsilon_{bR}$ , но не достигают значения  $\epsilon_{bu}$ . Максимальное значение на эпюре нормальных

напряжений сжатого бетона смещается от крайнего сжатого волокна к нейтральной оси сечения. Изгибающий момент, воспринимаемый сечением, достигает своего максимального значения.

Дальнейшее увеличение нагрузки ведет к разрушению изгибаемого железобетонного элемента. При этом возможны следующие случаи:

1. В сильно армированных сечениях изгибаемых железобетонных элементов увеличиваются деформации, напряжения в сжатом бетоне падают, что влечет к снижению изгибающего момента, воспринимаемого сечением. Разрушение происходит при достижении предельных деформаций крайнего сжатого волокна бетона  $\epsilon_b = \epsilon_{bu}$ .

2. В нормально армированных сечениях изгибаемых железобетонных элементов, также как и в слабо армированных, увеличиваются деформации при постоянном изгибающем моменте, воспринимаемом сечением. Разрушение при этом происходит при одновременном достижении предельных деформаций растянутой арматуры  $\epsilon_s = \epsilon_{su}$  и крайнего сжатого волокна бетона  $\epsilon_b = \epsilon_{bu}$ .

На всех стадиях работы сечения железобетонного изгибаемого элемента могут быть записаны уравнения равновесия, имеющие вид:

$$\sum X = 0 \quad N_b + N_{sc} - N_{bt} - N_s = 0; \quad (1)$$

$$\sum m = 0 \quad M_b + M_{sc} + M_{bt} + M_s = M. \quad (2)$$

где  $N_b, N_{bt}, N_{sc}, N_s$  – равнодействующие внутренних усилий соответственно в сжатом и растянутом бетоне, сжатой и растянутой арматуре;

$M, M_b, M_{bt}, M_{sc}, M_s$  – изгибающие моменты соответственно от внешней нагрузки, внутренних усилий в сжатом и растянутом бетоне, сжатой и растянутой арматуре.

Задача определения напряженно-деформированного состояния в поперечном сечении изгибаемого железобетонного элемента на всех стадиях решена при помощи шагово-итерационной методики.

На первой стадии работы железобетонного сечения задаются значения деформаций крайнего растянутого волокна бетона.

На последующих стадиях работы железобетонного сечения задаются значения деформаций крайнего сжатого волокна бетона.

На каждом шаге расчета уточняется высота сжатой зоны бетона при заданных деформациях, определяются значения изгибающих моментов, воспринимаемых сечением, соответствующие им кривизны.

Авторами предложен алгоритм определения напряженно-деформированного состояния нормальных прямоугольных сечений железобетонных изгибаемых элементов при увеличении нагрузки вплоть до предельного состояния с построением диаграммы «кривизна – изгибающий момент», блок-схема которого приведена на рис. 1, 2.

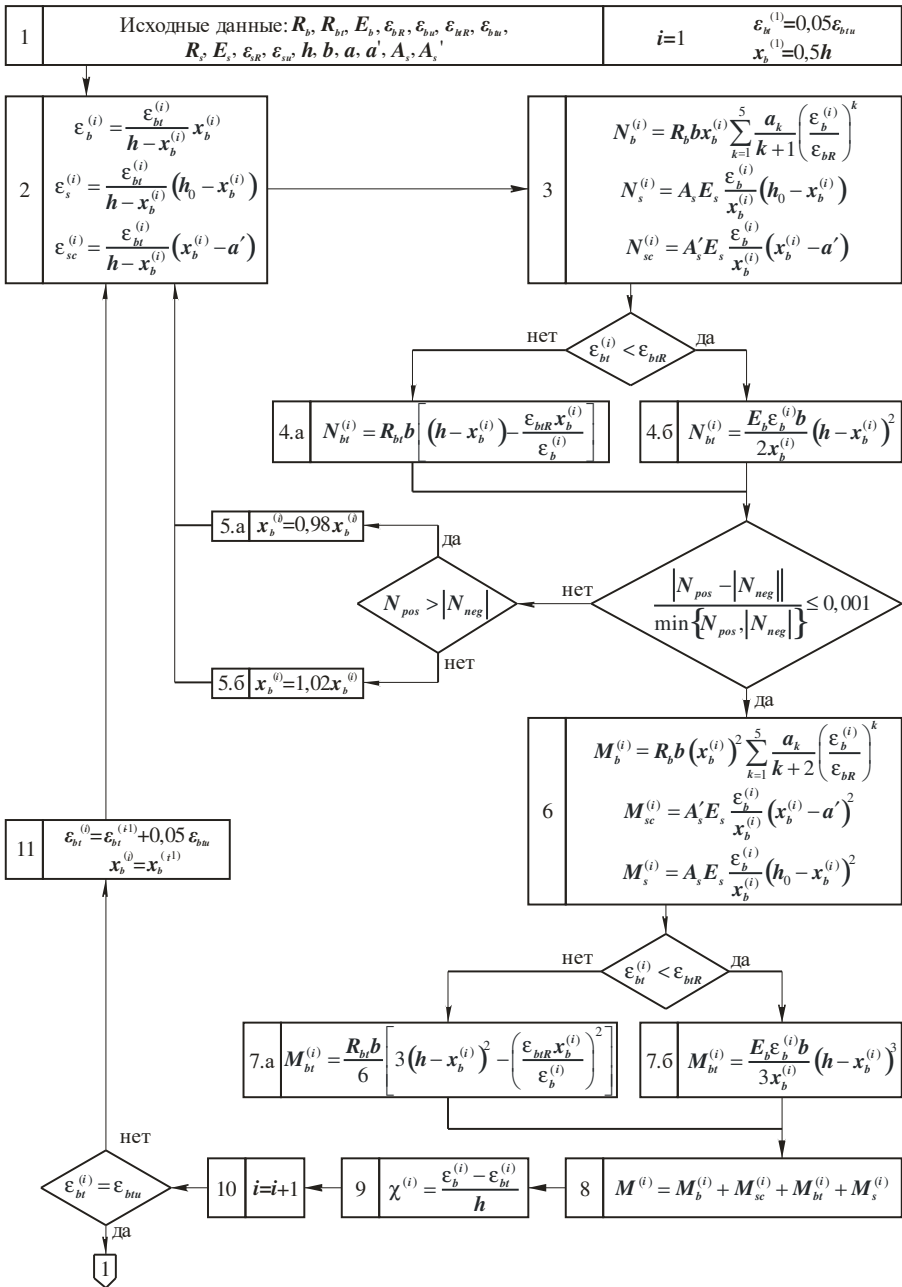


Рис. 1. Блок-схема построения диаграммы «кривизна-момент»

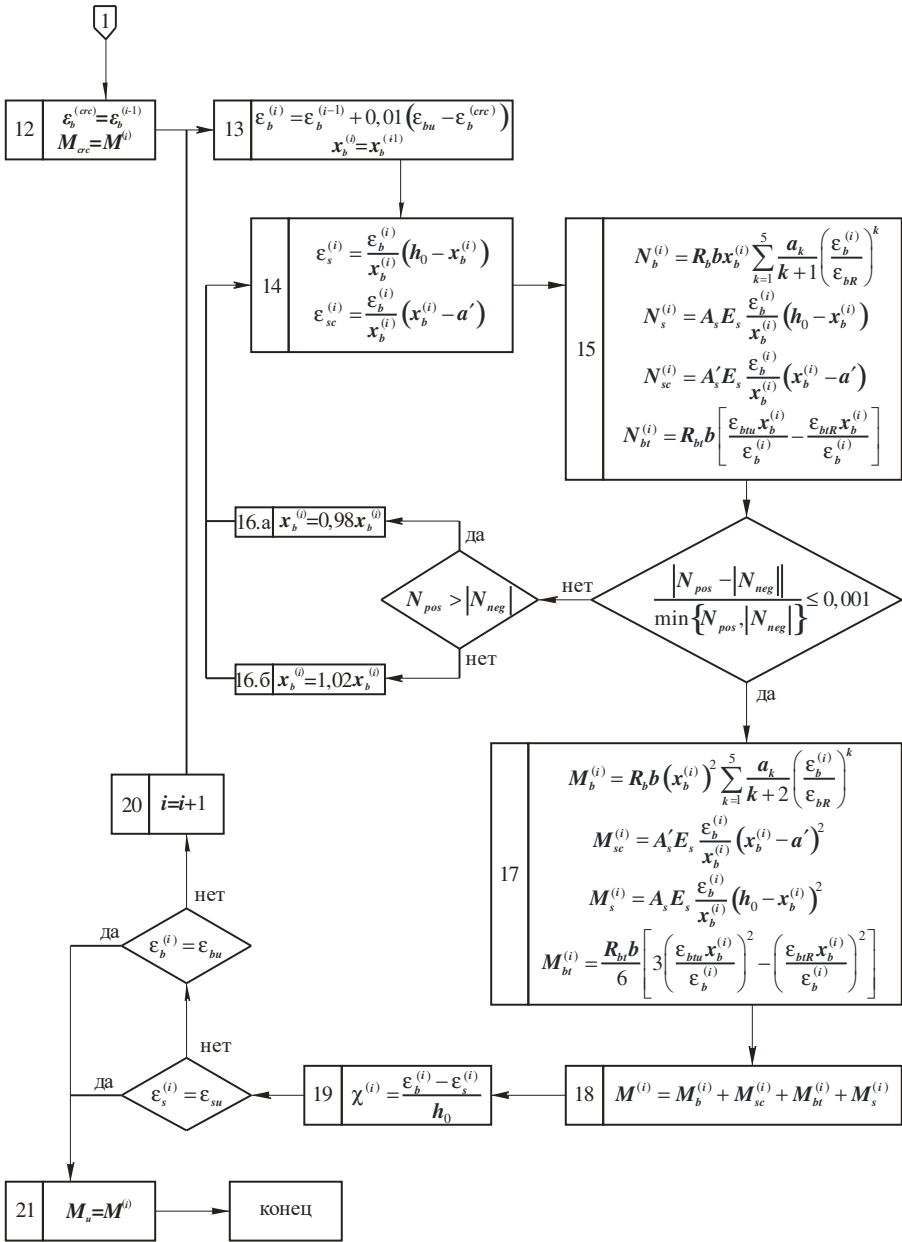


Рис. 2. Блок-схема построения диаграммы «кривизна-момент»  
(окончание)

В соответствии с приведенной блок-схемой, в системе компьютерной математики MATLAB разработана программа определения напряженно-деформированного состояния прямоугольных сечений железобетонных изгибаемых элементов с построением диаграмм «кривизна – изгибающий момент».

Диаграммы «кривизна – изгибающий момент», построенные по экспериментальным данным для нормально армированного сечения (эксперимент Чинь Ким Дама [8]) и для сильно армированного сечения (эксперимент Р.Х. Асаада [1]), по предлагаемой методике, по практическому методу, основанному на предложениях И.Е. Прокоповича и по формулам СНиП 2.03.01-84\* «Бетонные и железобетонные конструкции» приведены на рис. 3.

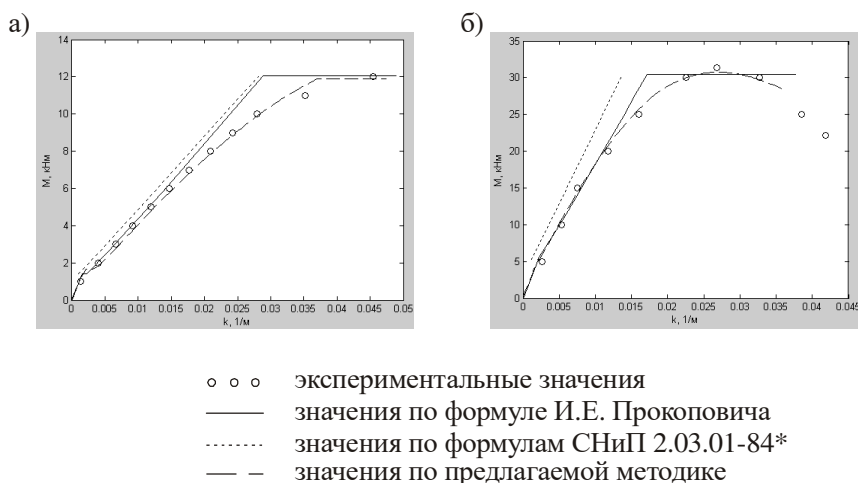


Рис. 3. Диаграммы «кривизна – изгибающий момент»  
 а) эксперимент Чинь Ким Дама [8]; б) эксперимент Р.Х. Асаада [1].

В таблице 1 приведена статистическая оценка распределения отношения теоретических и экспериментальных кривизн  $k_{теор} / k_{exp}$ .

Таблица 1.

	Эксперимент Р.Х. Асаада	Эксперимент Чинь Ким Дама
Выборочное среднее $M_x$	0,9502	0,9942
Выборочная дисперсия $S_x$	0,0944	0,1136
Выборочный коэффициент вариации $v_x$	0,0994	0,1142
Доверительный интервал ( $P=0,95$ ) $p_n$	0,8847	0,9299
$p_v$	1,0156	1,0585

## ВЫВОДЫ

1. Предложена модель деформирования нормальных сечений изгибаемых железобетонных элементов.
2. Разработана методика построения диаграмм «кривизна – изгибающий момент» для прямоугольных сечений железобетонных изгибаемых элементов.
3. Сравнение экспериментально полученных и теоретически построенных по предлагаемой методике диаграмм показало высокую сходимость.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Асаад Р.Х. Разработка методов расчета статически неопределимых железобетонных балок с учетом нисходящей ветви деформирования: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Ташкент, 1984.
2. Бабич В.Є. Напружено-деформований стан і міцність нерозрізних залізобетонних балок при одноразових та повторних навантаженнях: Дис. ... канд. техн. наук. – Рівне, 2005. – 176 с.
3. Бамбура А.М. Експериментальні основи прикладної деформаційної теорії залізобетону: Дис. ... докт. техн. наук. – Київ, 2005. – 379 с.
4. Дорофеев В.С., Барданов В.Ю. Расчет изгибаемых элементов с учетом полной диаграммы деформирования бетона. Монография. – Одесса: Издательство ОГАСА, 2003. – 210 с.
5. Ковров А.В. К анализу закономерностей деформирования сечений неразрезных железобетонных балок / А.В.Ковров, Р.Э.Чайковский, Т.А. Синюкина // Вісник ОДАБА. – Одесса, 2007. – № 27. – С.178-183.
6. Маилян Л.Р. Расчет статически неопределимых стержневых железобетонных систем: Учебное пособие. – Ростов н/Д: Рост. инж.-строит. ин-т, 1988. – 91 с.
7. Маилян Л.Р. Соппротивление железобетонных статически неопределимых балок силовым воздействиям. – Ростов-на-Дону: Издательство Ростовского университета, 1989. – 176 с.
8. Чинь Ким Дам. Влияние длительной нагрузки высокого уровня на деформативность и несущую способность железобетонных балок: Дис. ... канд. техн. наук. – Одесса, 1985
9. Яременко А.Ф. О практическом способе определения жесткости железобетонных балок / А.Ф.Яременко, А.В.Ковров, Т.А.Синюкина // Вісник ОДАБА. – Одесса, 2005. – № 20. – С.389-394.