

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ НЕЛИНЕЙНО-ДЕФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК СО СМЕШАННЫМ АРМИРОВАНИЕМ

Рассмотрена нелинейно-деформационная модель напряженно-деформированного состояния конструкций со смешанным армированием. Проанализированы результаты компьютерного моделирования железобетонных балок с различными схемами совмещенного армирования. Сделаны выводы о влиянии коэффициента частичного преднапряжения на характеристики жесткости балок покрытия со смешанным армированием.

**Ключевые слова:** нелинейно-деформационная модель, напряженно-деформированное состояние, дискретная модель, смешанное армирование, матрица жесткости.

Наиболее актуальной на сегодняшний день задачей для исследователей является совершенствование теории железобетона путем сближения расчетной и физической моделей реальной конструкции. Использование аппарата матричной алгебры позволяет создавать универсальные программные комплексы для расчетов строительных конструкций на основе физического, а не математического подхода.

В железобетонных конструкциях реализуются разные напряжения и деформации, которые равны расчетным сопротивлениям бетона и арматуры или отличаются от них в большую или меньшую сторону. На напряженно-деформированное состояние реальных конструкций оказывает воздействие множество факторов: влияние градиента деформаций по высоте сечения изгибаемых элементов, режимы нагружения, деформации ползучести и нелинейного деформирования железобетона, нарушение сцепления арматуры с бетоном вследствие образования трещин.

На основе вышесказанного была разработана нелинейно-деформационная модель конструкций со смешанным армированием, которая позволяет оценить характер напряженно-деформированного состояния конструкций на всех этапах их кратковременного нагружения [1] и реализована в программе для ЭВМ [2].

В основу расчета положена дискретная модель поперечного сечения конструкции (рис. 1). Поперечное сечение любой формы разбивается на  $n$ -е число элементарных участков бетона и  $k$ -е число участков арматуры, равное количеству продольных стержней арматуры.

При расчете по данной модели учет физической нелинейности материалов производится с помощью математического описания диаграмм деформирования бетона и арматуры и применения шагово-итерационного метода, реализующего способ упругих решений [3].

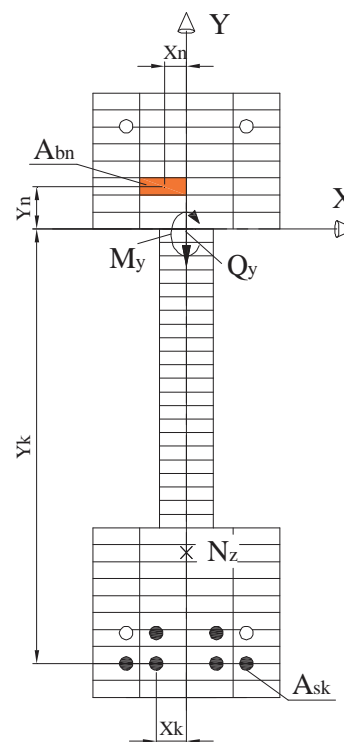


Рис. 1. Дискретная модель поперечного сечения балки

Вся информация о физической нелинейности элемента содержится в матрице жесткости. Матричное уравнение равновесия с учетом нелинейности записывают следующим образом:

$$\begin{Bmatrix} M_y \\ N_z \\ Q_y \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & 0 \\ R_{21} & R_{22} & 0 \\ 0 & 0 & R_{33} \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} k_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}$$

или

$$\{F\} = [R(\{F\}, S)] \times \{U(\{F\}, S)\}, \quad (1)$$

где  $\{F\} = \{M_y, N_z, Q_y\}^T$  – вектор-столбец внешних сил;  $\{U(\{F\}, S)\} = \{k_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}\}^T$  – вектор-столбец деформаций;  $[R(\{F\}, S)]$  – матрица жесткости нормального сечения; элементы матрицы

\* - автор, с которым следует вести переписку

жесткости  $[R(\{F\}, S)]$  являются переменными величинами

$R_{11}$  – изгибная жесткость в направлении оси  $Y$ :

$$R_{11} = \sum_n E'_{bn} \cdot A_{bn} \cdot y_n^2 + \sum_k E'_{sk} \cdot A_{sk} \cdot y_k^2,$$

$R_{12} = R_{21}$  – изгибно-осевая жесткость, отражающая взаимное влияние продольной силы и изгибающего момента:

$$R_{12} = R_{21} = -\sum_n E'_{bn} \cdot A_{bn} \cdot y_n - \sum_k E'_{sk} \cdot A_{sk} \cdot y_k,$$

$R_{22}$  – осевая жесткость, зависящая от уровня загрузки и геометрических характеристик:

$$R_{22} = \sum_n E'_{bn} \cdot A_{bn} + \sum_k E'_{sk} \cdot A_{sk}.$$

В данной постановке задачи традиционно определяемые основные перемещения (от действия момента и продольной силы) отделяются от дополнительных перемещений, вызванных действием поперечной силы, поскольку в этом случае не требуется задавать начальное соотношение между перемещениями от изгиба и сдвига, которые для зависимости (1) установить трудно. Значения сдвиговой жесткости  $R_{33}$  в этом случае можно определять по указаниям СНиП 2.03.01-84\*:

$$R_{33} = \sum_n G'_{bn} A_{bn} + \sum_k G'_{sk} A_{sk} \text{ или } R_{33} = G'_{bn} \frac{A_{red}}{1,5\phi_{crc}},$$

где  $G'_{bn}$  – модуль сдвига бетона.

При решении системы уравнений (1) используется численное интегрирование (суммирование) напряжений, действующих по элементарным площадкам сечения. При этом принимается допущение о том, что напряжения в пределах каждого элементарного участка бетона постоянны и равны напряжениям на уровне его центра тяжести. Относительные деформации также рассчитывают на уровне центра тяжести каждого элементарного участка. Считается, что допущение о постоянстве напряжений в пределах дискретных участков не вносит существенных погрешностей в расчеты, если его размеры не превышают 1/10 соответствующего размера сечения.

По данной расчетной модели критерием исчерпания прочности конструкции по нормальному сечению принято условие достижения бетоном и (или) растянутой арматурой предельных значений относительных деформаций, установленных нормативными документами. Если прочность по нормальному сечению обеспечена, то заданным внешним силам  $\{F\}$  и принятым размерам сечения отвечает вполне определенный вектор деформаций, т.е.  $k_y, \epsilon_z, \gamma_{xy}$ . Если прочность по нормальному сечению не обеспечена, то заданные внешние силы  $\{F\}$  вызывают неограниченный рост деформаций, т.е. разрушение. Таким

образом, нелинейная система уравнений (1) имеет решение в виде вектора деформаций  $\{k_y, \epsilon_z, \gamma_{xy}\}$  только тогда, когда прочность сечения обеспечена, в противном случае система (1) не имеет решения.

Система (1) решается итерационным способом по следующему алгоритму, реализуемому на ЭВМ:

1. Вычисляются коэффициенты матрицы физических соотношений для упругого состояния элемента, т.е. при  $E'_{bn}=E_{bn}$  и  $E'_{sk}=E_{sk}$ .
2. По стандартной программе решается система (1) с постоянными коэффициентами относительно вектора деформаций.
3. Определяются продольные деформации бетона и арматуры для центров элементарных площадок.
4. По диаграммам деформирования бетона и арматуры устанавливаются текущие модули деформаций  $E'_{bn}$  и  $E'_{sk}$ .
5. Уточняются коэффициенты матрицы жесткости.
6. Расчет повторяется со второго пункта.

В процессе итерационного расчета при неизменном уровне внешних сил  $\{F\}$  по мере корректировки элементов матрицы жесткости, вследствие учета неупругих деформаций  $k_y, \epsilon_z, \gamma_{xy}$ , увеличиваются. Постепенно они достигают некоторых конечных значений, если прочность нормального сечения обеспечена, т.е. приращения элементов вектора деформаций затухают.

Если решение получено, оно сравнивается с решением на предыдущей итерации для проверки сходимости итерационного процесса. Это условие имеет вид

$$\frac{U_{max}^i - U_{max}^{i-1}}{U_{max}^i + U_{max}^{i+1}} \leq \Delta, \quad (2)$$

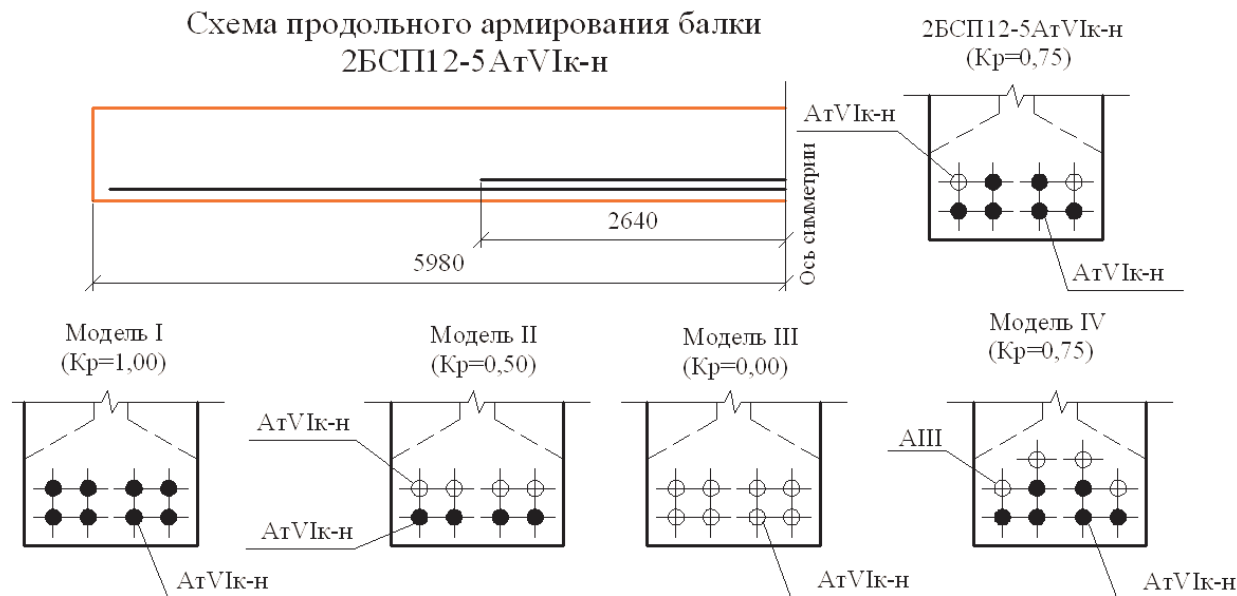
где  $U_{max}^i$  – максимальное перемещение на данной итерации;  $U_{max}^{i-1}$  – перемещение по соответствующему направлению на предыдущей итерации;  $\Delta$  – точность расчета: 0,1 %.

При соблюдении условия (2) несущая способность конструкции обеспечена, в противном случае – нет.

Адекватность принятой расчетной модели установлена на основании сопоставления результатов численного моделирования для балок на базе марки 2БСП12-5АтVК-н серии 1.462.1-1/88 и экспериментальных данных, полученных на комбинате «Братскжелезобетон» при испытании балок покрытия марок 2БСП12-3К7 и 2БСП12-5К7 серии 1.462.1-1/81. Характеристики моделируемых балок и схемы их армирования представлены в табл. 1 и на рис. 2 соответственно.

Характеристики исследуемых балок

Марка балки	Напрягаемая арматура	Ненапрягаемая арматура	$K_p$	Класс бетона
2БСП12-5АтVIк-н	6Ø18 Ат-VIк-н	2Ø18 Ат-VIк-н	0,75	В40
Модель I	8Ø16 Ат-VIк-н	–	1,00	
Модель II	4Ø18 Ат-VIк-н	4Ø18 Ат-VIк-н	0,50	
Модель III	–	8Ø18 Ат-VIк-н	0,00	
Модель IV	6Ø18 Ат-VIк-н	4Ø18 А-III	0,75	



Для каждой моделируемой балки определялся коэффициент частичного преднапряжения

$$K_p = \frac{A_{sp}}{\sum A_s}. \text{ Для полностью напрягаемой балки}$$

он равен единице. Чем больше доля ненапрягаемой арматуры по отношению к напрягаемой, тем меньше коэффициент  $K_p$ .

Анализ полученных результатов показывает, что конструкции с большим содержанием ненапрягаемой арматуры (соотношение между напрягаемой и ненапрягаемой арматурой  $K_p < 0,5$ ) с точки зрения жесткости неэффективны и по своим деформационным свойствам приближаются к ненапрягаемым элементам. Однако конструкции со средним содержанием ненапрягаемой арматуры ( $K_p \approx 0,67$ ) имеют более низкую деформативность и по характеру работы приближаются к полностью напряженным элементам (рис. 3).

На снижение жесткости влияет не только уменьшение количества напрягаемой арматуры, но и собственно наличие ненапрягаемой армату-

ры, а также характер ее расположения по высоте растянутой зоны элемента. Кроме того, анализ результатов численного моделирования показал, что наиболее целесообразно в конструкциях со смешанным армированием применять в качестве ненапрягаемой арматуры арматуру класса А-III, поскольку она полностью реализует свои прочностные свойства (рис. 4).

Вывод о пригодности конструкции к нормальной эксплуатации делается исходя из конструктивных показателей, т.е. трещиностойкость и жесткость балок обеспечивается за счет назначения контрольных прогибов и ширины раскрытия трещин. Конструкция тогда удовлетворяет требованиям жесткости, когда при заданной эксплуатационной нагрузке прогибы и трещины не превышают предельных значений, определяемых из условия пригодности конструкции к нормальной эксплуатации в заданных условиях.

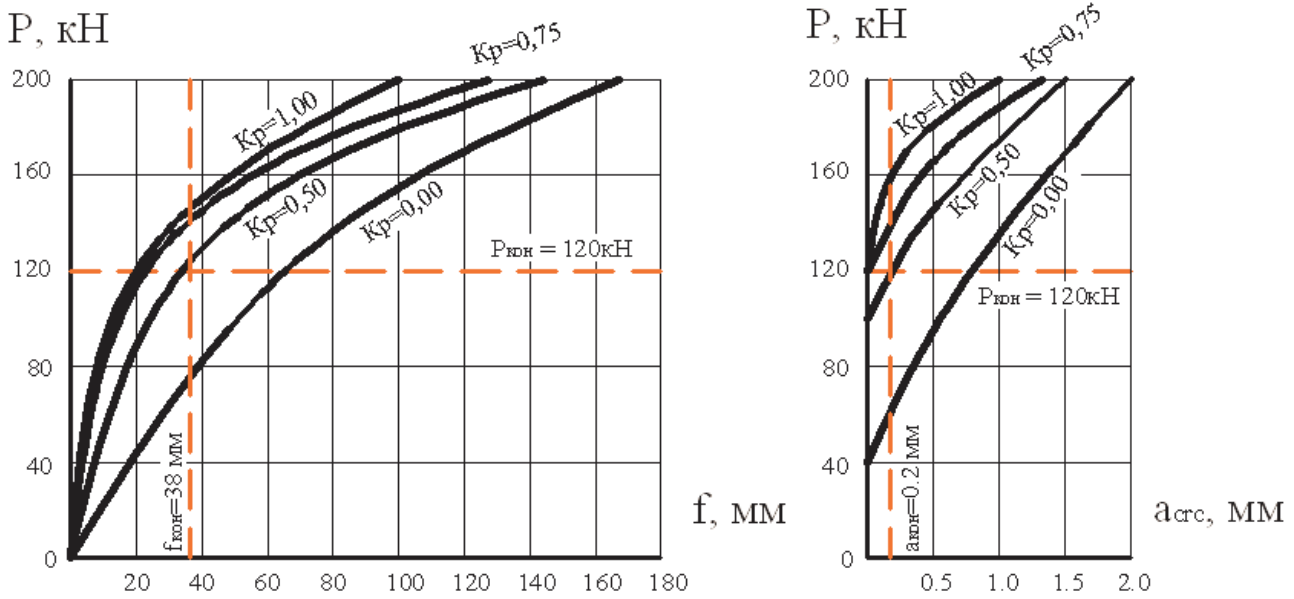


Рис. 3. Кинетика развития прогибов и нормальных трещин

Анализ строительных аварий, произошедших на территории Российской Федерации в последнее десятилетие, показывает, что основная их доля приходится на эксплуатируемые объекты, а не более 20 % – на строящиеся здания и сооружения. Основными причинами аварий на эксплуатируемых объектах являются грубейшие нарушения правил технической эксплуатации, перевооружение и реконструкция производственных зданий промышленных предприятий, реконструкция малоэтажной старой застройки, что часто связано с изменением действующих нагрузок и конструктивных схем. В процессе эксплуатации зданий

вследствие различных причин происходит физический износ строительных конструкций, снижение и потеря их несущей способности, деформации как отдельных элементов, так и здания в целом. Профилактические меры по предотвращению аварий, обеспечению безопасности возводимых и эксплуатируемых объектов, принимаемые органами надзора, а также строительными и эксплуатационными организациями, оказываются недостаточными. Число аварий не снижается, тяжесть их увеличивается, возрастает число их жертв.

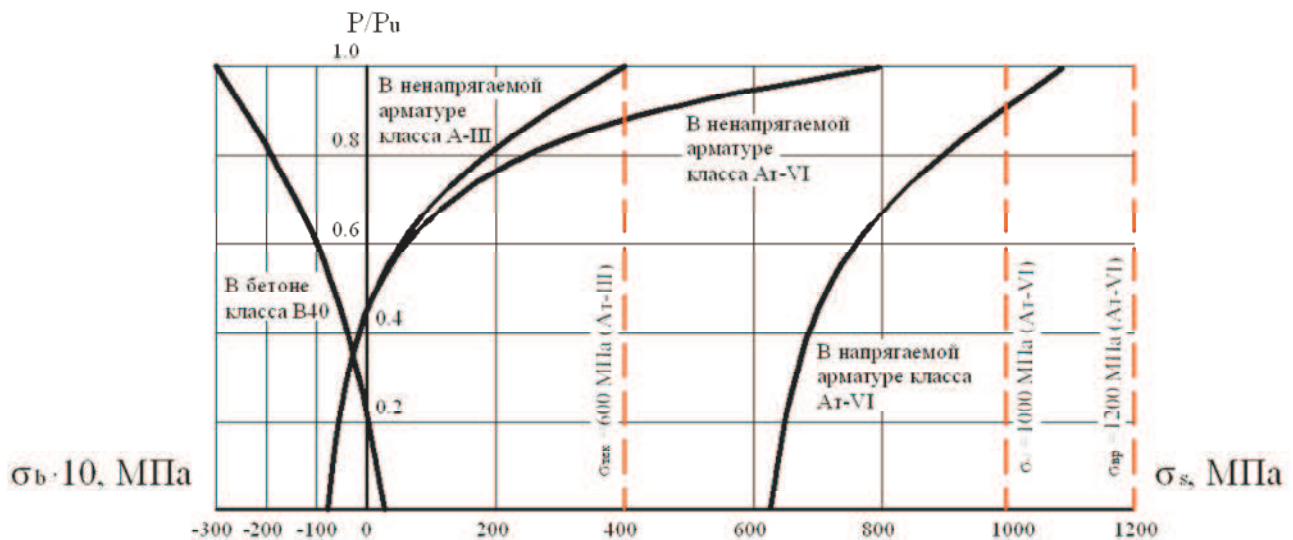


Рис. 4. Напряжения в бетоне и арматуре для балки 2БСП12-5АтVIк-н

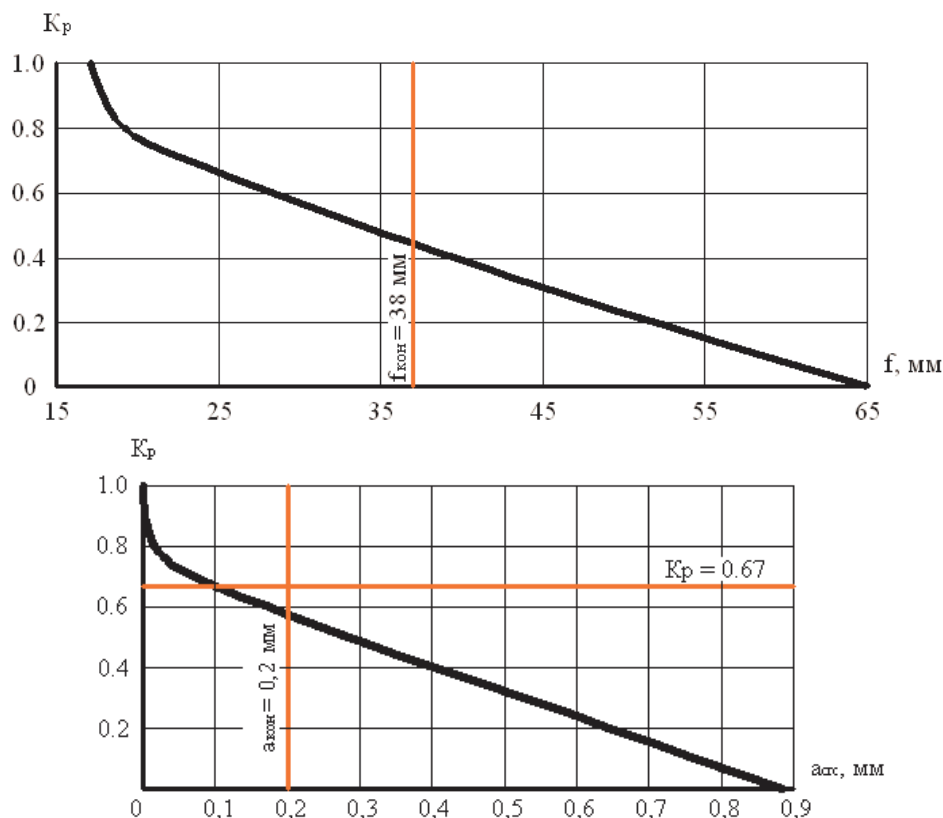


Рис. 5. Влияние коэффициента частичного преднапряжения на жесткостные характеристики балки 2БСП12-5АтVIк-н

Наиболее целесообразным с экономической точки зрения способом восстановления несущей способности и эксплуатационной пригодности изгибаемых железобетонных конструкций (балок и плит) является их усиление установкой дополнительной рабочей арматуры. Усиленные таким образом, они называются конструкциями со смешанным армированием.

Подобные конструкции имеют ряд особенностей: в частности, ненапрягаемая арматура вступает в работу позже напрягаемой и не во всех случаях может использовать свои прочностные возможности. Кроме того, ненапрягаемая (усиливающая) арматура устанавливается тогда, когда конструкции уже нагружены собственным весом и эксплуатационной нагрузкой.

Разработанная авторами модель оценки напряженно-деформированного состояния конструкций со смешанным армированием может быть применена для расчета усиливаемых конструкций, а ее использование при проектировании и конструировании восстанавливаемых конструкций позволит оптимально подобрать класс усиливающей арматуры, соответствующий классу рабочей арматуры, определить ее количество и характер размещения по высоте сечения.

#### Литература

1. Карпенко, Н.И. К построению методики расчета стержневых элементов на основе диаграмм деформирования материалов / Н.И. Карпенко, Т.А. Мухамедиев, М.А. Сапожников // Совершенствование методов расчета статически неопределимых ж/б конструкций. – М.: НИИЖБ, 1987. – С. 4–24.
2. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2005612294 // Оценка напряженно-деформированного состояния балок покрытия со смешанным армированием (CombiFix v.1.0) / Г.В. Коваленко, Н.С. Меньшикова.
3. Дудина, И.В. Особенности расчета конструкций со смешанным армированием с учетом нелинейных свойств материалов / И.В. Дудина, Г.В. Коваленко, О.П. Бороздин // Сб. трудов «Математическое моделирование. Численные методы и комплексы программ» СПбГАСУ. – 2001. – № 7.