

МИНИСТЕРСТВО СТРОИТЕЛЬСТВА УКРАИНЫ  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ  
МИНИСТЕРСТВО НАУКИ, ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ И ТЕХНИЧЕСКОЙ  
ПОЛИТИКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
БЕЛГОРОДСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

На правах рукописи

ДРОНОВ Василий Иванович

СОПРОТИВЛЕНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗГИБАЕМЫХ  
ЭЛЕМЕНТОВ ОБРАЗОВАНИЮ НАКЛОННЫХ ТРЕЩИН  
С УЧЕТОМ НЕУПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ БЕТОНА

Специальность 05.23.01 – Строительные конструкции,  
здания и сооружения

А в т о р е ф е р а т  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Киев – 1993



00820011 (C)

Работа выполнена в Научно-исследовательском институте строительных конструкций МГУ /НИИСК/ и Белгородском техническом университете /БелГУ/ в области строительных материалов Министерства науки, высшей школы и технической политики Российской Федерации /БТИСМ/.

- Научный руководитель - доктор технических наук, профессор А.Б.Гольшев.
- Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор Ю.И.Немчинов,  
- кандидат технических наук, старший научный сотрудник В.А.Климов.
- Ведущая организация - Государственный институт по проектированию горнорудных предприятий центральных районов России "Центрогипроруда".

Защита состоится 23 февраля 1993 года в 13<sup>30</sup> часов на заседании специализированного Совета К 033.09.01 по присуждению ученой степени кандидата технических наук в Научно-исследовательском институте строительных конструкций /252037, г. Киев, ул. И.Клименко, 5/2, актовй зал/.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан "18" января 1993 г.

Ученый секретарь  
специализированного Совета  
кандидат технических наук  
старший научный сотрудник

*Н.С.Метелюк*  
Н.С.Метелюк

ЛНБ ім. В. Стефаніка  
V D C E

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одним из путей повышения экономичности железобетонных конструкций является совершенствование методов их расчета, в том числе и по образованию наклонных трещин.

Правильно оценивать сопротивление бетона образованию наклонных трещин необходимо: когда нельзя допускать их образования, для выяснения необходимости проверки по раскрытию и закрытию трещин, для выявления случая расчета по деформациям, а также при расчете прочности на действие поперечной силы без поперечного армирования и расчете на выносливость.

Нормативный метод расчета по образованию наклонных трещин основан на сравнении величин главных растягивающих напряжений на центральной оси элемента, полученных по формулам теории упругости, с пределом прочности бетона при растяжении. При этом не только не используется существенный резерв, заложенный в способности растянутого бетона к неупругому деформированию, но и не учитывается реальная возможность развития неупругих деформаций в сжатом бетоне.

Предложенные рядом отечественных исследователей приемы расчета по образованию наклонных трещин также основаны, по существу, на предположении об упругой работе бетона и сводятся, главным образом, к уточнению нормативного метода.

Если учесть повышенную чувствительность к трещинообразованию высокопрочных бетонов, применение которых постоянно расширяется, результаты многочисленных обследований железобетонных конструкций, в процессе которых были обнаружены не предусмотренные расчетом наклонные трещины, существенное (до двух раз) отличие в величинах усилий трещинообразования, подсчитанных по отечественным нормам и по нормам таких стран как США,

ФРГ, Англия и Франция, повышение требований к точности расчетов по предельным состояниям второй группы в условиях повышения нормативных нагрузок, актуальность совершенствования методов оценки сопротивления бетона трещинообразованию в зонах совместного действия изгибающих моментов и поперечных сил становится достаточно очевидной.

Цель работы: разработать теоретически обоснованный инженерный метод расчета предварительно напряженных железобетонных изгибаемых элементов по образованию наклонных трещин с учетом неупругих деформаций растянутого и сжатого бетона и оценить область его рационального использования.

Автор защищает:

- уточнённую методику оценки напряженно-деформированного состояния железобетонных изгибаемых элементов в зонах совместного действия изгибающих моментов и поперечных сил;
- результаты анализа напряженно-деформированного состояния бетона в этих зонах, полученного на основе уточненной методики;
- инженерный метод расчета железобетонных изгибаемых элементов по образованию наклонных трещин;
- алгоритм и составленную на его основе программу на алгоритмическом языке ФОРТРАН IV для определения усилия трещинообразования;
- результаты сопоставления усилий трещинообразования, полученных на основе предложенного в работе инженерного метода, с опытными данными и данными других методов.

Научная новизна работы:

- предложена методика определения напряженно-деформированного состояния бетона в зонах совместного действия изгибающих

моментов и поперечных сил на основе решения плоской задачи теории пластичности методом конечных элементов с использованием в качестве критерия образования наклонных трещин достижение деформациями удлинения бетона по направлению действия наибольших главных растягивающих напряжений предельных значений;

- на основе уточненной методики разработан упрощенный аналитический аппарат оценки сопротивления бетона образованию наклонных трещин с учетом неупругих деформаций растянутого и сжатого бетона;

- на основе анализа результатов численных исследований выявлены особенности напряженно-деформированного состояния бетона на участках совместного действия изгибающих моментов и поперечных сил и характер влияния на сопротивление образованию наклонных трещин ряда основных факторов.

Достоверность научных положений подтверждена сравнением результатов расчетов по предложенному в данной работе методу с расчетными данными по нормативному и другим известным методам, а также с результатами экспериментальных исследований.

Практическое значение работы. Применение предложенных в работе методов расчета позволит при проектировании железобетонных конструкций более достоверно оценивать усилия образования наклонных трещин, а следовательно и получать при решении многих практически важных задач более надежные и экономичные решения.

Реализация работы. Предложенные в данной работе методы, алгоритм и программа расчета предварительно напряженных элементов использованы:

- институтом "Центрогипроруда" для расчетов проектируемых конструкций, что способствовало повышению их надежности и экономичности;

- для расчетов существующих конструкций реконструируемых

зданий и сооружений Белгородского витаминного комбината при выполнении хоздоговорной НИР;

- в Горьковском "Промстройпроекте" для расчетов железобетонных конструкций проектируемых зданий и сооружений;

- в учебном процессе в Белгородском технологическом институте строительных материалов.

Апробация работы и публикации. Основные результаты работы доложены и одобрены на координационном совещании "Нелинейные методы расчета железобетонных пространственных конструкций" /Белгород, 1986/, Всесоюзной конференции "Ускорение научно-технического прогресса в промышленности строительных материалов и строительной индустрии" /Белгород, 1987/, Всесоюзной конференции "Фундаментальные исследования и новые технологии в строительном материаловедении" /Белгород, 1989/, Всесоюзной конференции "Физико-химические проблемы материаловедения и новые технологии" /Белгород, 1991/.

По теме диссертации опубликовано 5 статей.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из 97 наименований и приложений (блок схема "БАЛКА", алгоритм, пример и программа расчета, характеристика и результаты расчетов опытных образцов, акты внедрения работы), изложена на 135 страницах текста и иллюстрирована 13 рисунками и 7 таблицами.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности темы, приведены общая характеристика работы и её основные положения, которые автор выносит на защиту.

В первой главе дан анализ характера трещинообразования на

участках совместного действия изгибающих моментов и поперечных сил, факторов, определяющих сопротивление элементов образованию наклонных трещин и обзор существующих методов расчета.

Наиболее полная классификация наклонных трещин с описанием характера их образования и развития содержится в работах М.С.Боришанского, А.А.Гвоздева, А.С.Залесова, А.Б.Голышева и И.М.Чупака.

Анализ факторов, определяющих напряженно-деформированное состояние на участках совместного действия изгибающих моментов и поперечных сил, наиболее широко представлен в работах М.С.Боришанского, А.С.Залесова, Л.В.Кузнецова, М.Н.Убайдуллаева и др. Установлено, что основными факторами, определяющими сопротивление бетона образованию наклонных трещин, являются его вид, прочностные, деформативные свойства, геометрия поперечного сечения, вид нагрузки, пролёт среза, величина предварительного напряжения продольной и поперечной арматуры, работа бетона в условиях двухосного напряженного состояния.

Вопросам совершенствования методов расчета по образованию наклонных трещин посвящены работы М.С.Боришанского, В.Ю.Виришласа, А.С.Залесова, К.В.Зеленского, А.С.Зорича, В.Г.Колбасина, Ю.А.Климова, Л.В.Кузнецова, М.Б.Лифшица, А.Н.Петрова, Ю.А.Пойменова, А.В.Тамплона, М.Н.Убайдуллаева, В.П.Чиркова, И.М.Чупака, Б.А.Шостака, К.Мяновски, Х.Рюша и др. Наиболее серьезного внимания из современных расчетных предложений заслуживает нормативный метод расчета по образованию наклонных трещин и работы Киевской школы.

Основные недостатки действующего нормативного метода следующие: проверка трещиностойкости выполняется на уровне цент-

ральной оси элемента, в то время как в реальных условиях точка с наибольшими главными растягивающими напряжениями смещается вниз от указанной оси; не учитываются неупругие деформации растянутого бетона в стадии образования наклонных трещин; в качестве критерия трещинообразования принимается достижение главными напряжениями предела прочности бетона при растяжении, вместе с тем, в расчётах по образованию нормальных трещин в тех же нормах используется более обоснованный критерий - по предельной растяжимости бетона.

Привлекательность метода - в его простоте, а следовательно и возможности широкого использования при проектировании конструкций без привлечения электронно-вычислительной техники.

Четкостью расчетной схемы и последовательностью решения задачи отличается метод, предложенный в 1961-78 годах Л.В.Кузнецовым. В рамках этого метода на основе классической теории упругости получены зависимости для определения усилия трещинообразования и действительного положения точки с наибольшими главными растягивающими напряжениями. Однако и здесь критерий образования трещин принят по прочности бетона при растяжении, а на приопорных участках "метод сечений" не позволяет получить достоверные результаты.

Учет неупругих свойств бетона в явном виде впервые осуществлен в работах М.Н.Убайдуллаева. Зависимость для предельной поперечной силы им получена из решения уравнений равновесия в условном наклонном сечении. Характер эпюры напряжений в указанном сечении принят априори.

В качестве критерия образования трещин используется прочность бетона при осевом растяжении. Метод пригоден для расчета только двутавровых балок.

С учетом сказанного задачи исследований были сформулированы следующим образом:

- разработать уточненный метод оценки сопротивления предварительно напряженных изгибаемых элементов образованию наклонных трещин, выполнить на его основе анализ напряженно-деформированного состояния в зонах совместного действия изгибающих моментов и поперечных сил;

- на основе закономерностей, выявленных в процессе указанного анализа, разработать "инженерный" (упрощенный) метод расчета по образованию наклонных трещин, пригодных для практического использования в условиях реального проектирования;

- по результатам сопоставления численных расчетов с опытными данными оценить эффективность "инженерного" и отмеченных выше методов расчета, а на основе математического эксперимента в широком диапазоне изменения основных факторов выявить область их рационального применения.

Во второй главе изложены уточненная методика и результаты исследований напряженно-деформированного состояния железобетонных изгибаемых элементов в зонах совместного действия изгибающих моментов и поперечных сил.

При разработке уточненной методики было отдано предпочтение решению, полученному в работах Л.П.Гельман и Ю.Н.Кардовского. В его основу положена модель железобетона с трещинами, предложенная Н.И.Карпенко и получившая своё развитие в работах НИИСК. Система уравнений плоского напряженного состояния решена методом конечных элементов в перемещениях.

Для реализации поставленной задачи в это решение введен ряд изменений и дополнений. Учет неупругих деформаций бетона производится посредством переменного модуля деформаций, который равен начальному модулю упругости бетона, умноженному на

коэффициент упругости. Этот коэффициент предполагает нелинейную зависимость между напряжениями и деформациями с нисходящей ветвью. Условие образования трещин в конечных элементах принято на основе предельной растяжимости бетона. Введены также зависимости для определения напряжений в бетоне и ряд других.

Для исследования напряженно-деформированного состояния изгибаемых элементов в зонах совместного действия изгибающих моментов и поперечных сил методом планирования эксперимента было выбрано 18 опытных образцов 9-ти авторов. Образцы отличались широким диапазоном изменения факторов, определяющих трещиностойкость.

Половина каждой балки была разбита на 96 конечных элементов: 8 — в поперечном направлении и 12 — в направлении продольной оси. В результате расчетов получены значения напряжений и деформаций в бетоне каждого конечного элемента, анализ характера распределения которых позволяет сделать следующие основные выводы:

- нормальные напряжения  $\sigma_x$ , получаемые с учетом неупругих деформаций бетона, могут быть до 2,5 раз меньше "упругих" в растянутом бетоне и до 1,5 раз — в сжатом;

- местные сжимающие напряжения  $\sigma_y$  концентрируются в местах приложения осредоточенных сил и опорных реакций, а в месте вероятного образования первой наклонной трещины эти напряжения могут быть и растягивающими;

- при учёте неупругих деформаций бетона касательные напряжения могут быть меньше получаемых по "упругому" расчету на 20%;

- главные растягивающие напряжения в зоне вероятного образования первой наклонной трещины имеют максимум, как правило, ниже центральной оси;

- главные сжимающие напряжения, получаемые с учетом неуп-

ругого деформирования бетона, могут быть на 30% меньше "упругих";

- закон распределения продольных деформаций в нормальном сечении близок к линейному, что позволяет пользоваться при расчетах железобетонных элементов в зонах совместного действия изгибающих моментов и поперечных сил гипотезой плоских сечений;

- в балках двутаврового профиля максимум главных деформаций растяжения находится, как правило, в пределах ребра;

- влияние поперечного армирования на сопротивление элементов образованию наклонных трещин не превышает 2%; продольное армирование сказывается, главным образом, на положении точки с наибольшими главными деформациями растяжения;

- предварительное напряжение продольной арматуры повышает сопротивление элементов образованию наклонных трещин пропорционально уровню обжатия и предотвращает образование наклонных трещин первого типа, начинающихся от растянутой грани;

- углы наклона главных площадок, найденные по "упругому" расчету и с учетом неупругих деформаций, отличаются несущественно и зависят, главным образом, от уровня предварительного обжатия бетона.

Третья глава посвящена разработке инженерного метода расчета железобетонных изгибаемых элементов по образованию наклонных трещин.

Связь между напряжениями и деформациями в сжатом бетоне для рассматриваемого уровня нагружения принята в виде ломаной линии (рис. I-а), проекция наклонного участка которой равна упругим деформациям, а горизонтального - неупругим. Для растянутого бетона связь между напряжениями и деформациями также выражается ломаной линией с той разницей, что уровень напряжений и полные деформации равны предельным значениям. Такой идеализи-

рованной диаграмме будет соответствовать эпюра нормальных напряжений в сечении элемента в виде двух трапеций (рис. I-б).

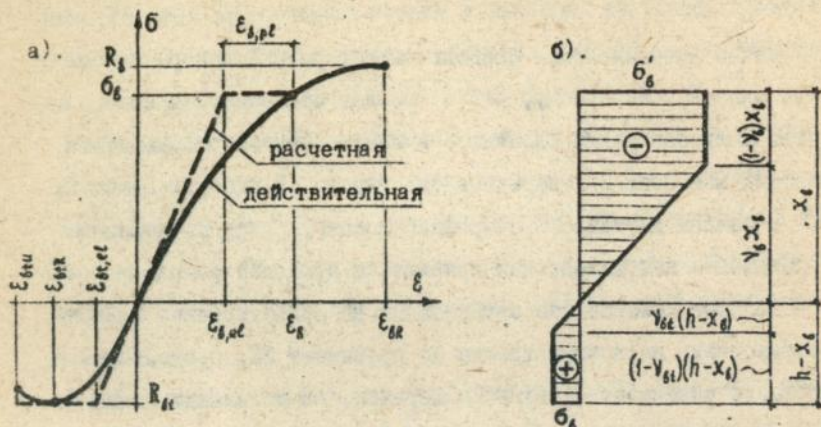


Рис. I. Диаграммы деформирования бетона (а) и эпюра напряжений в нормальном сечении (б)

В качестве критерия образования первой наклонной трещины принято достижение наибольшими главными деформациями растяжения предельных значений  $\epsilon_{btu}$ . При таком критерии решение поставленной задачи целесообразно выполнять в деформациях.

Рассматривая деформированное состояние в точке, можно получить зависимость для определения главных деформаций:

$$\epsilon_x = \epsilon_x \cdot \sin^2 \alpha + \epsilon_y \cos^2 \alpha - 0,5 \gamma_{xy} \sin 2\alpha. \quad (I)$$

Составляющие главных деформаций  $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_y$  и  $\gamma_{xy}$  могут быть определены как функции соответствующих напряжений  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  и  $\tau_{xy}$ . При определении угла наклона главных площадок принята гипотеза о том, что в неупругой стадии, как и в упругой, направления главных деформаций и главных напряжений совпадают. Это даёт возможность определять угол  $\alpha$  по формуле, предложенной Кузнецовым Л.В. при решении задачи в напряжениях:

$$\operatorname{ctg} \alpha = \sqrt{(\sigma_{sp} + \delta_{sp} R_{st}) / (\sigma_y + \delta_{st} R_{st})} . \quad (2)$$

Расчетная схема для определения напряжений  $\sigma_x$  приведена на рис. 2. Из решения уравнений равновесия и дополнительных уравнений деформаций получены зависимости для определения нормальных напряжений в растянутом бетоне:

$$\sigma_s = (M - Pe') / K , \quad (3)$$

где

$$K = bh \left( \frac{h}{2} - a' \right) - \frac{(h-x+v_s x)^2}{2v_s x} \left( \frac{h-x+v_s x}{3} - a' \right) b + \alpha_s A_s \frac{x-a}{v_s x} (h_0 - a') ;$$

$$x = (-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}) / 2A ; \quad A = -0,5b(1-v_s)^2 ;$$

$$B = bh + \alpha'_s A'_s + \alpha_s A_s - Pv_s / \sigma_s ; \quad C = -0,5bh^2 - \alpha'_s A'_s h'_0 - \alpha_s A_s a .$$

При определении напряжений  $\sigma_y$  было учтено, что в зоне вероятного образования первой наклонной трещины от их действия доля неупругих деформаций невелика и с точностью, достаточной для практических расчетов, они могут определяться по формулам, предлагаемым действующими нормами.

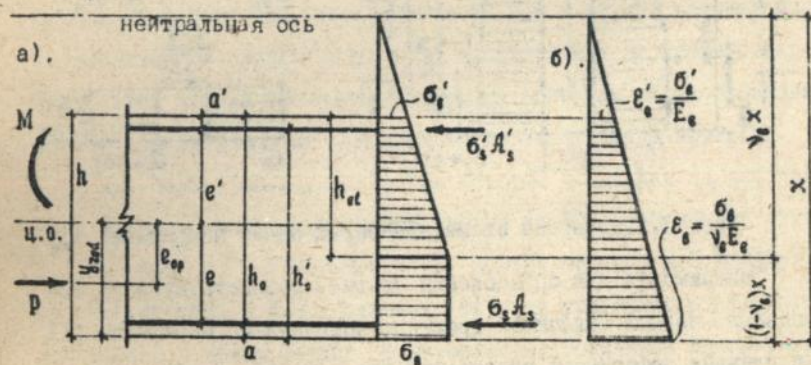


Рис. 2. Расчетная схема нормального сечения:  
а) схема усилий и эпюра напряжений в бетоне, б) эпюра деформаций

Расчетная схема для определения касательных напряжений приведена на рис. 3. Из решения уравнений равновесия получены следующие выражения для  $\tau_{xy}$  в зонах упругой и неупругой работы бетона:

$$\tau_{rel} = \frac{-Q}{L} \left( \frac{h}{2} + y_0 \right); \quad (4)$$

где 
$$\tau_{el} = -\frac{Q}{L} \left\{ \frac{h}{2} + y_0 - \beta \left( h_{el} - \frac{h}{2} + y_0 \right) - \delta \left[ \left( \frac{h}{2} + y_0 \right)^2 - \left( h - h_{el} \right)^2 \right] \right\};$$

$$\beta = 1 - \frac{1}{\nu_0} - \frac{1 - \nu_{el}}{\nu_0^2 - \sqrt{1 - (\sigma_0/R_0)^2}} \left( \frac{\sigma_0}{R_0} \right)^2; \quad \delta = \frac{h - \beta h_{el}}{h_{el}(2h - h_{el})};$$

$$L = b \left\{ \frac{h_{el}}{2} (h - h_{el}) + \frac{1 - \beta - \delta h}{2} \left[ \left( h_{el} - \frac{h}{2} \right)^2 - \frac{h^2}{4} \right] + \frac{2}{3} \delta \left[ \left( h_{el} - \frac{h}{2} \right)^3 + \frac{h^3}{8} \right] \right\}.$$

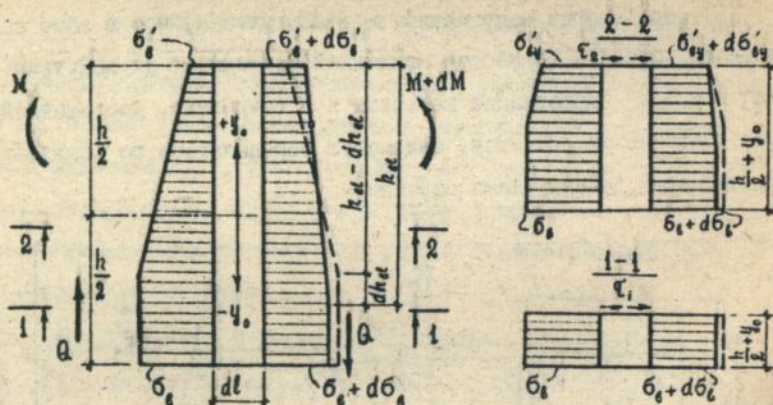


Рис. 3. Расчетная схема для определения напряжений  $\tau_{xy}$

Зависимость для определения усилия, соответствующего образованию первой наклонной трещины, получена из выражения (I) для главных деформаций растяжения при условии, что в точке с наибольшими значениями они равны предельным, т.е.  $\varepsilon_{\alpha} = \varepsilon_{\sigma_{1u}} = \nu_{04} R_{01} / (\nu_{01u} E_0)$ :

$$Q_{\text{сск}} = \frac{1}{S} \left[ \frac{\delta_{\text{сск}} R_{\text{сск}}}{\gamma_{\text{сск}} \sin^2 \alpha} + \frac{Pe'}{x} \left( 1 - \frac{y_{\text{зад}} + y_{\text{к}}}{x} \right) \left( \frac{1}{\gamma_{\text{с}} - \mu \text{ctg}^2 \alpha} \right) \right], \quad (5)$$

где

$$S = \frac{u + l_{\text{к}}}{x} \left( 1 - \frac{y_{\text{зад}} + y_{\text{к}}}{x} \right) \left( \frac{1}{\gamma_{\text{с}} - \mu \text{ctg}^2 \alpha} \right) + \frac{\varphi_{\text{с}} + \varphi_{\text{к}}}{\delta h} \left( \text{ctg}^2 \alpha - \frac{\mu}{\gamma_{\text{с}}} \right) + \frac{\text{ctg} \alpha}{0,4L} \left\{ y_{\text{зад}} + y_{\text{к}} - \beta (h_{\text{сск}} - h + y_{\text{зад}} + y_{\text{к}}) - \delta [(y_{\text{зад}} + y_{\text{к}})^2 - (h - h_{\text{сск}})^2] \right\}.$$

Выражение для определения положения точки с наибольшими главными деформациями растяжения получено из условия, что минимум  $Q_{\text{сск}}$  соответствует  $dQ_{\text{сск}}/dy = 0$ . Получены также зависимости для определения угла наклона главной площадки с учетом неупругих деформаций бетона и решения для  $Q_{\text{сск}}$  при действии равномерно распределенной нагрузки и наличии предварительно напряженных хомутов и отгибов.

В четвертой главе дана оценка эффективности разработанного метода расчета на основе сопоставления теоретических данных с опытными, имеющимися в литературе. Приведены материалы численных исследований влияния отдельных факторов на сопротивление элементов образованию наклонных трещин. Выявлена область рационального применения разработанного метода расчета. Для сравнительной оценки как разработанного, так и других методов расчета собственные экспериментальные исследования не проводились, в виду того, что за прошедший период по вопросам образования наклонных трещин накоплен обширный экспериментальный материал.

Для определения усилий, при которых появились первые наклонные трещины, выбраны исходные данные по 140 образцам из опытов К.В.Зеленского, М.С.Борисманского, Л.В.Кузнецова, М.Н.Убайдуллаева, М.Б.Лифшица и Л.Н.Брусковой. Образцы существенно отличались прочностью и видом бетона, армированием, величиной предварительного обжатия бетона, размерами и формой поперечного сечения, пролетами среза.

Для подтверждения эффективности принятых исходных предположений, а также анализа характера и степени влияния отдельных факторов были выполнены расчеты всех опытных образцов по разработанному методу, а также определены усилия трещинообразования когда угол наклона главной площадки  $\alpha$  определялся с учетом неупругих деформаций бетона, когда касательные напряжения найдены по "упругому" расчету и когда местные сжимающие напряжения равны нулю. Анализ полученных результатов позволил установить следующее.

Так, в частности, в процессе расчетов было выявлено, что величины углов  $\alpha$ , определенные по формуле (2) Л.В.Кузнецова и с учетом неупругих деформаций бетона, отличаются, в среднем, на 20%. Значения же усилий образования наклонных трещин в том и другом случае практически одинаковы. Таким образом, в практических целях без ущерба для точности расчетов для определения угла  $\alpha$  можно пользоваться формулой (2).

При определении касательных напряжений  $\tau_{xy}$  по "упругому" и "неупругому" расчетам значения усилий трещинообразования могут отличаться в пределах 15%.

Неучёт местных сжимающих напряжений  $\sigma_y$  отражается на величине усилия трещинообразования (в сторону его занижения) в пределах, примерно, 20%.

В табл. I даны среднеарифметические значения отношений к опытной расчетной трещиностойкости  $\bar{x}$ , полученной по разработанному методу, методу Л.В.Кузнецова, М.Н.Убайдуллаева и нормативному, а также соответствующие значения стандартов  $\sigma$  и коэффициентов вариации  $s_v$ , обеспеченность точности и надежность.

Приведенные данные говорят о достаточно высокой эффективности разработанного метода, особенно если учесть, что одним из основных факторов, определяющих трещиностойкость, является про-

Таблица I

Статистики отношений расчетной трещиностойкости к опытной

Методика	$\bar{x}$	b	c, %	Обеспеченность точности				Надежность
				±5%	±10%	±15%	±20%	
Разработанная	0,97	0,14	14,0	28	52	72	85	0,953
Кузнецова Л.В.	0,90	0,15	16,7	23	45	62	76	0,917
Убайдуллаева М.Н.	0,92	0,14	15,1	25	49	67	81	0,936
Нормативная	0,86	0,16	18,4	22	41	59	72	0,901

ность бетона при растяжении, которая обладает значительным разбросом.

Здесь следует отметить, что в пределах изменения основных факторов для рассматривавшихся в работе опытных образцов другие методы также дают неплохие результаты. Тем не менее существует ряд реальных задач, при решении которых использование их нежелательно или даже невозможно.

Для подтверждения и численной оценки сказанного был проведен математический эксперимент - выполнены расчеты 24 балок двутаврового, таврового с верхней или нижней полкой и прямоугольного профилей по методам Л.В.Кузнецова, М.Н.Убайдуллаева и нормативному.

Первая серия эксперимента включила расчет четырех балок, нагруженных двумя симметрично расположенными сосредоточенными силами в пролете и продольной эксцентрично приложенной сжимающей силой; уровни напряжений в бетоне принимались близкими к предельным. В результате было установлено, что указанные выше методы (по сравнению с разработанным) могут существенно (до 40%) недооценивать сопротивление бетона образованию наклонных трещин.

Вторая серия включала такие же балки с высоким уровнем напряжений в бетоне. Но здесь вместо внешней продольной сжима-

ющей силы предусматривалось предварительное напряжение продольной арматуры. И в этом случае расчетная трещиностойкость оказалась существенно (до 33%) заниженной.

Третья серия состояла из таких же балок с относительно невысоким уровнем напряжений в бетоне, но выполненных из бетона с повышенной предельной растяжимостью. В этом случае по сравнению с предыдущими погрешность в трещиностойкости оказалась максимальной (в 2 и более раза).

В четвертой серии рассматривались балки из тяжелого бетона с относительно низким уровнем предварительного обжатия и малыми пролетами среза ( $a/h_0 = 1,0; 0,5$  и  $0,25$ ). В расчетах по разработанному методу угол наклона главной площадки в месте вероятного образования первой наклонной трещины определялся по формуле (2), а в расчетах по методам Л.В.Кузнецова и М.Н.Убайдуллаева (в соответствии с рекомендациями авторов) — как для опасного сечения, проходящего от силы к опоре. Сопротивление образованию наклонных трещин на основе двух последних методов оказалось до 2,5 раз завышенным.

В процессе математического эксперимента также установлено, что углы наклонов главных площадок существенно зависят от величины продольных сжимающих напряжений, а точка вероятного образования первой наклонной трещины находится не на центральной оси, а, как правило, ниже. Так, в частности, сравнение результатов расчетов, выполненных на основе нормативного метода и предложенного Л.В.Кузнецовым, показало, что неучет действительного положения точек с наибольшими главными растягивающими напряжениями и деформациями может приводить к погрешности в величине усилий трещинообразования до 20%.

В заключении приведены основные научные и практические результаты диссертационной работы, которые могут быть сформулиро-

ваны следующим образом.

На основе известных методов, используемых в плоской задаче теории пластичности, получено решение для определения напряжений и деформаций в любой точке изгибаемого железобетонного элемента с учетом нелинейной диаграммы деформирования бетона с нисходящей ветвью. Для практического использования этого решения разработан программный комплекс для ЭВМ.

Выполнен анализ напряженно-деформированного состояния железобетонных изгибаемых элементов в зонах совместного действия изгибающих моментов и поперечных сил в стадии, предшествующей образованию трещин. Это позволило обоснованно принять исходные предпосылки для разработки упрощенного аналитического метода.

На основе уточненного решения предложен инженерный метод для определения усилия, при котором появляется первая наклонная трещина, угла наклона опасной элементарной площадки и места её положения. Составлены алгоритм и программа расчета на ЭВМ. Решения получены для элементов двутаврового профиля с предварительно напряженной продольной и поперечной арматурой при действии сосредоточенных и равномерно распределенных нагрузок.

Выполнены расчеты 140 опытных образцов разных авторов в широком диапазоне изменения основных факторов, сравнение их результатов с опытными данными и статистический анализ с оценкой точности и надежности предложенного и некоторых других современных методов.

Проведен математический эксперимент, позволивший выявить области рационального использования разработанного метода и, следовательно, получения надежных и экономичных решений.

Выполненные в диссертационной работе исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Определение усилия, при котором образуется первая на-

Иль И. В. Стефанович  
АН УРСР

лонная трещина, при решении практически всех реальных задач целесообразно выполнять с учетом неупругих деформаций как растянутого, так и сжатого бетона. При этом, в качестве критерия образования наклонной трещины следует принимать достижение главными деформациями растяжения своих предельных значений.

2. Основными факторами, определяющими сопротивление бетона образованию наклонных трещин, являются: вид и предельная растяжимость бетона, величина его предварительного обжатия, пролёт среза, вид нагрузки, сцепление арматуры с бетоном, геометрия сечения элемента.

3. Максимум главных деформаций растяжения находится не на центральной оси элемента, как это принято считать при проектировании конструкций, а ниже или выше указанной оси. При этом положение элементарной площадки с максимальными деформациями зависит, главным образом, от соотношения величин нормальных и касательных напряжений.

4. Разработанный с учетом указанных выше соображений метод расчета предварительно напряженных железобетонных изгибаемых элементов по образованию наклонных трещин обеспечивает точность и надежность результатов в реальном диапазоне изменения основных факторов и может быть уже сегодня использован при проектировании.

Область его рационального применения — это, прежде всего, элементы с высоким уровнем сжимающих напряжений в бетоне, элементы из бетонов с отличающейся от обычной предельной растяжимостью, а также элементы, загружаемые сосредоточенными силами при малых пролётах среза.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах.

И. Дронов В.И., Бачинский В.Я., Голышев А.Б. К расчету по образованию наклонных трещин в контурных элементах тонкостенных

пространственных конструкций //Нелинейные методы расчета железобетонных пространственных конструкций: Тез. докл. научно-техн. конф. - Белгород, 1986. - С. 33-34.

2. Голышев А.Б., Бачинский В.Я., Дронов В.И. О расчете по образованию трещин, наклонных к продольной оси элемента, с учетом пластических деформаций бетона //Ускорение научно-технического прогресса в промышленности строительных материалов и строительной индустрии: Тез. докл. Всесоюз.конф., ч. 4. - Белгород, 1987. - С. 26-27.

3. Дронов В.И., Голышев А.Б. К расчету железобетонных конструкций по образованию наклонных трещин с учетом неупругих деформаций бетона //Нелинейные методы расчета пространственных конструкций. Сб.науч.трудов. - М.,МИСИ, БТИСМ, 1988. - С. 107-112.

4. Гельман Л.П., Дронов В.И., Голышев А.Б. Моделирование на ЭВМ образования наклонных трещин в изгибаемых железобетонных элементах с учетом неупругого деформирования //Фундаментальные исследования и новые технологии в строительном материаловедении: Тез.докл. Всесоюз. конф., ч. II. - Белгород, 1989. - С. 9-10.

5. Дронов В.И. Анализ некоторых методов расчета трещиностойкости наклонных сечений изгибаемых железобетонных элементов//Физико-химические проблемы материаловедения и новые технологии: Тез.докл. Всесоюз.конф., ч. 7. - Белгород, 1991. - С.29-30.

---

БІСМ. Зак. 2. Тир. 120.



Ab 26.621

**AB 26.621**