

На правах рукописи

Горностаев Иван Сергеевич

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ
СОСТАВНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ НАЛИЧИИ НАКЛОННЫХ ТРЕЩИН

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

Курск – 2015

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Юго-Западный государственный университет"

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Клюева Наталия Витальевна

Официальные оппоненты: Алмазов Владлен Ованесович,
доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВПО
«Московский государственный строительный
университет» г.Москва, профессор кафедры
«Железобетонные и каменные конструкции»

Смоляго Елена Геннадьевна,
кандидат технических наук, начальник отдела
строительного аудита ООО «Строительная
экспертиза», г. Белгород

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
учреждение «Научно-исследовательский институт
строительной физики Российской академии
архитектуры и строительных наук» (НИИСФ
РААСН), г. Москва

Защита состоится 29 мая 2015 года в 12-00 часов на заседании
объединенного диссертационного совета ДМ 212.105.11, созданного на базе
ФГБОУ ВПО «Юго-Западный государственный университет», ФГБОУ ВПО
«Госуниверситет – УНПК», ФГБОУ ВПО «Брянская государственная
инженерно-технологическая академия» по адресу: 305040, г. Курск,
ул. 50 лет Октября, 94, аудитория Г-527.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте
ФГБОУ ВПО «Юго-Западный государственный университет»
<http://www.swsu.ru>.

Автореферат разослан « _____ » 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, ДМ 212.105.11
д.т.н., доцент

Н.В. Бакаева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Железобетонные составные конструкции зданий и сооружений характеризуются общим сопротивлением двух или нескольких бетонов с разными свойствами прочности и деформативности. Этим определяется ряд специфических параметров расчета и конструирования конструкций данного класса, приводящее к перераспределению внутренних усилий между старым и новым бетонами. Отсюда вытекает необходимость развития методов их расчета на основе расчетной модели составных стержней.

Теоретические и экспериментальные исследования, посвященные решению такой задачи, на сегодняшний день проведены в незначительном количестве. Что же касается вопросов изучения деформативности железобетонных составных конструкций при наличии наклонных трещин, то они практически остались неизученными. В то же время составные железобетонные конструкции занимают значительную часть в общем объеме железобетонных конструкций. Это конструкции покрытий и перекрытий зданий, стойки промышленных зданий со значительными крановыми нагрузками, стоечно-балочные системы каркасов многоэтажных зданий, конструктивные элементы специальных сооружений и др.

Анализ результатов проведенных исследований, а также опыт использования составных железобетонных конструкций при проектировании зданий и сооружений позволил выявить случаи превышения параметров сечения и материала запроектированных конструкций по второй группе предельных состояний, над требуемыми параметрами по прочности. Появление наклонных трещин приводит к изменению прочностных и деформативных характеристик конструкций. На сегодняшний день отсутствуют расчетные модели, учитывающие эти изменения и отражающие все многообразие различных типов наклонных трещин. Это приводит к необходимости проведения трудоемких экспериментальных исследований и становится серьезным препятствием для оценки предельных состояний несущих конструкций.

На сегодняшний день отсутствуют фактические данные о взаимных сдвигах старого и нового бетонов в зонах, прилегающих к шву; не исследован этот вопрос в тех случаях, когда шов расположен в сжатой или растянутой зонах сечения; не выявлены особенности напряженно-деформированного состояния в зонах бетона, прилегающих к шву; не изучены эффекты, связанные с нарушением сплошности железобетона.

Таким образом, совершенствование железобетонных составных конструкций, связанное с повышением их эффективности, входит в число важнейших задач капитального строительства. Отсюда следует, что проведение экспериментально-теоретических исследований по разработке практического способа расчета деформативности железобетонных составных конструкций при наличии наклонных трещин с учетом условного сосредоточенного сдвига в швах между бетонами различных слоев и эффекта нарушения сплошности железобетона является **актуальной задачей**.

Цель работы. Разработать расчетную модель деформативности железобетонных составных конструкций при наличии наклонных трещин, отражающую формирование различных типов наклонных трещин при учете в них условных сосредоточенных сдвигов и работы внутренних сил по схеме составного стержня, несовместности деформаций бетона и арматуры и эффекта нарушения сплошности бетона.

Задачи исследований:

- разработать расчетную модель деформативности железобетонных составных конструкций при наличии наклонных трещин с учетом новых эффектов сопротивления;

- разработать методику проведения экспериментальных исследований с целью построения расчетной модели деформативности железобетонных составных конструкций при наличии наклонных трещин с учетом условного сосредоточенного шва сдвига, учетом несовместности деформаций бетона и арматуры и эффекта нарушения сплошности бетона;

- провести численные исследования параметров напряженно-деформированного состояния для оценки деформативности железобетонных составных конструкций при наличии наклонных трещин и выполнить сравнительную оценку предложенной расчетной методики с экспериментальными данными и нормативной методикой расчета.

Объект исследования: составные железобетонные конструкции зданий и сооружений.

Предмет исследования: деформативность составных железобетонных конструкций с наклонными трещинами.

Научную новизну работы составляют:

1. Построенная расчетная модель деформативности железобетонных составных конструкций при наличии наклонных трещин, содержащая:

- расчетную схему, состоящую из пяти блоков, образующихся между наклонными трещинами различных типов и разрешающие уравнения для определения усилий в этих блоках;

- расчетную схему в виде единичной полосы и полученное применительно к ней новое решение железобетонного составного стержня при наличии трещин;

- расчетную методику для определения деформативности железобетонных составных конструкций при наличии наклонных трещин, при учете условных сосредоточенных сдвигов в швах между бетонами, в швах - трещинах, несовместности деформаций бетона и арматуры, и эффекта нарушения сплошности бетона.

2. Результаты экспериментальных исследований с данными о характере деформирования, развития и раскрытия наклонных трещин в железобетонных составных конструкциях с учетом различных схем нагружения и армирования;

3. Результаты численных исследований, доказывающие эффективность предложенной расчетной модели деформативности железобетонных составных конструкций при наличии наклонных трещин с использованием теории составных стержней применительно к железобетону в широком диапазоне

изменения пролетов «среза», классов бетонов и при различных схемах армирования.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в том, что разработанная расчетная модель деформативности железобетонных составных конструкций при наличии наклонных трещин, учитывающая параметры и особенности деформирования арматуры и бетона, позволяет получить более строгое решение и выявить резервы для оптимизации характеристик материала конструкции.

Методология и методы исследований. Используется экспериментально-теоретический метод. В теоретических и численных исследованиях, которые выполнены в работе, использованы общие методы механики твердого деформируемого тела, теории составных стержней и теории железобетона.

Положения, выносимые на защиту:

- расчетная модель и построенная на ее основе методика расчета деформативности железобетонных составных конструкций с наклонными трещинами, которая позволяет учесть несовместность деформаций бетона и арматуры, условный сосредоточенный сдвиг в шве между бетонами, а также эффект нарушения сплошности бетона;

- результаты экспериментальных исследований в значительной степени дополняющие имеющийся фактический материал по многоуровневому процессу трещинообразования, оценке эффекта нарушения сплошности, перемещениям (прогибам) железобетонных составных конструкций при наличии наклонных трещин с различными схемами загрузки и армирования;

- алгоритм расчета и результаты численных исследований перемещений (прогибов) железобетонных составных конструкций при наличии наклонных трещин с использованием разработанной расчетной модели, а также результаты их сопоставительного анализа с опытными данными и нормативной методикой расчета.

Конкретное личное участие автора в получении научных результатов, изложенных в диссертации:

- вывод новых уравнений теории составных стержней применительно к железобетонному составному стержню без и при наличии трещин;

- формулирование рабочих гипотез расчетной методики для определения деформативности железобетонных составных конструкций при наличии наклонных трещин;

- разработка методики и проведение экспериментальных исследований деформативности железобетонных составных конструкций при различных схемах армирования, различных классах бетона и пролетах «среза»;

- разработка алгоритма расчета деформативности железобетонных составных конструкций при наличии наклонных трещин, а также проведение сравнительного анализа с опытными данными и нормативной методикой расчета.

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность научных положений, выводов и заключения, сформулированных в диссертации, обеспечивается:

– построением расчетной модели деформативности железобетонных составных конструкций при наличии наклонных трещин на основе закономерностей механики твердого деформируемого тела, механики разрушения, теории составных стержней, теории железобетона;

– сравнительным анализом результатов значений перемещений (прогибов) с использованием разработанного способа расчета с экспериментом и расчетами по нормативной методике, получившей наибольшее распространение в практике проектирования;

– эффективностью предложенных расчетных зависимостей для оценки перемещений (прогибов) при наличии наклонных трещин, использованных в практике проектирования железобетонных составных конструкций зданий и сооружений.

Апробация результатов диссертации. Основные положения диссертации докладывались на Международной научно-методической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения В. Н. Байкова, 4–5 апреля 2012 г. (г. Москва, МГСУ); на семинаре кафедры «Строительные конструкции и материалы» Архитектурно-строительного института Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», (г. Орел, 2012 г.); на Международном семинаре «Перспективы развития программных комплексов для расчета зданий и сооружений» (г. Курск, ЮЗГУ, 2013 г.), на расширенном семинаре кафедры «Уникальные здания и сооружения» и кафедры «Промышленное и гражданское строительство» ФГБОУ ВПО Юго-Западного государственного университета (г. Курск, 2014 г.)

Внедрение результатов исследования в практику.

Диссертационная работа выполнялась в рамках исследований по гранту Президента РФ МД6533.2013.8.

Результаты диссертационных исследований использованы в учебном процессе ФГБОУ ВПО «Юго-Западный государственный университет» (г. Курск) на кафедрах «Уникальные здания и сооружения» и «Промышленное и гражданское строительство», а также Орловским академцентром РААСН при проектировании каркасов жилых и гражданских зданий.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 6 работ, все в рецензируемых изданиях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем работы 210 страниц машинописного текста, 64 рисунка, 3 таблицы. Список литературы состоит из 191 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проанализированы работы, выполненные по исследованию деформативности и трещиностойкости железобетонных составных конструкций по нормальным и наклонным сечениям.

Значительный вклад в построение расчетного аппарата прогибов железобетонных конструкций внесли Д. О. Астафьев, В. Н. Байков, Х. З. Баширов, В. М. Бондаренко, С.В. Бондаренко, А. А. Гвоздев, А. Б. Гольшев, Ю.П. Гуца, А. С. Залесов, Кани, Б.С. Расторгуев, А.Г. Тамразян, Н. И. Карпенко, С. Н. Карпенко, Вл. И. Колчунов, Н. В. Ключева, Э. Н. Кодыш, Л. Л. Лемыш, В.П. Митрофанов, В. И. Мурашев, Я. М. Немировский, И. К. Никитин, В.П. Полищук, В. С. Рокач, В.И. Римшин, В. И. Травуш, В.П. Чирков, В. В. Фигаровский, Р. С. Санжаровский, Г.Н. Шоршнева, В.О. Алмазов, В. С. Федоров и др.

Теоретические и экспериментальные исследования составных железобетонных конструкций в своем подавляющем большинстве базируются на предпосылке об абсолютно жёстком шве сопряжения между элементами – работы А. Е. Жданова, А.Е. Кузмичева, Я.Г. Сунгатулина, А. В. Харченко и др., что, как правило, приводит к ощутимому расхождению результатов расчета и эксперимента.

В последние годы начали проводиться исследования, посвященные изучению напряженно-деформированного состояния железобетонных составных конструкций с податливыми швами сдвига – работы В. М. Бондаренко, Н. И. Карпенко, С. Н. Карпенко, В. И. Колчунова, Я. Е. Колчина, Е. А. Король, Р. Л. Маиляна, А. И. Мальганова, Г.А. Смоляго, Г. В. Мурашкина, Н. М. Онуфриева, Л. А. Панченко, А. И. Попеско, Е. А. Скобелевой, Н. М. Сняtkова, И. А. Яковенко и др.).

В работах В.М. Бондаренко, А.Б. Гольшева, Вл.И. Колчунова, И.А. Яковенко обращено внимание на весьма существенные эффекты напряженно-деформированного состояния, происходящие в железобетоне в результате нарушения его сплошности, которые объясняют физический смысл многих явлений, замеченных в опыте.

Построению расчетной модели деформативности железобетонных составных конструкций при наличии наклонных трещин посвящена **вторая глава** диссертационной работы. На основании углубленного исследования природы и характера трещинообразования построена расчетная модель пяти блоков для определения трещиностойкости и деформативности железобетонных составных конструкций при наличии наклонных трещин (рис. 1), позволяющая описывать трещины, начинающиеся с растянутой зоны и развивающиеся к источнику нагружения (веер 1), а также наклонные трещины, образующиеся в окрестности нейтральной оси, и развивающихся как в сторону сжатой, так и растянутой зон (веер 2).

Из условий равновесия и деформирования блоков получены разрешающие уравнения. При этом, для учета влияния местного напряженно-

деформированного состояния, привлекаются формулы клина. Вводятся также в необходимые ограничения в виде неравенств.

Последовательно перемещаясь от одной трещины к другой, используемая расчетная модель позволяет определить усилия в продольной и поперечной арматуре в любой трещине (рис. 2).

В процессе нагружения имеет место несколько уровней.

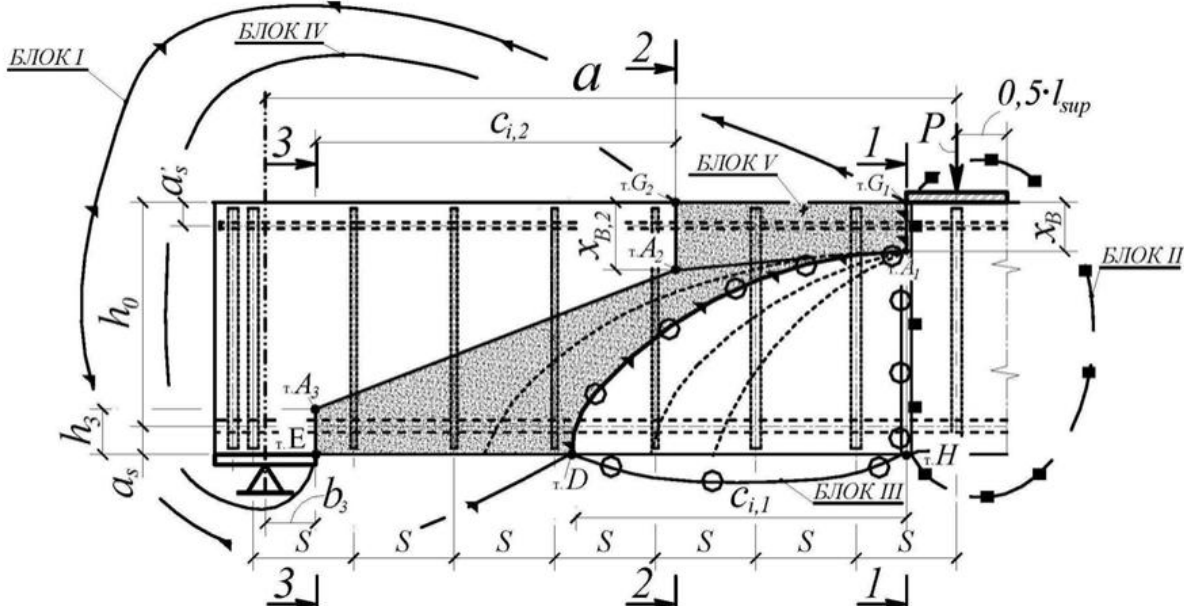


Рис. 1. Общая схема блоков и расчетные сечения, используемые для решения задачи трещиностойкости и деформативности железобетонных составных конструкций

Расстояние между наклонными трещинами первого и второго видов первого уровня, $l_{cr,1}$, расположенными вдоль продольной арматуры определяются из следующего соотношения (см. рис. 2. в):

$$l_{cr,1} = \frac{a \cdot (M_l - M_{cr})}{M_l} \quad (1)$$

Появление последующего уровня трещинообразования соответствует нагрузке, при которой соблюдается неравенство

$$l_{cr,i} \leq \eta \cdot l_{cr,i-1}, \quad (2)$$

где η – параметр, с помощью которого определяется соотношение между длиной участков, на которые разделяется расстояние между трещинами предыдущего уровня.

Расстояние между трещинами последующего уровня вдоль осей поперечной арматуры определяется с использованием расчетных схем второго уровня, которые охватывают представительный объем бетона длиной Δx , соизмеримой с расстоянием между хомутами (рис. 3):

$$l_{cr} = \frac{2(\ln B_4 - B t_*)}{-B}, \quad (3)$$

где параметры B , B_2, B_3, B_4 выражены в виде функций от предельных деформаций удлинения бетона, параметров, учитывающих эффект нарушения сплошности (через $\sigma_{bt,c}$ и ΔT), геометрических параметров, параметров сцепления арматуры и бетона.

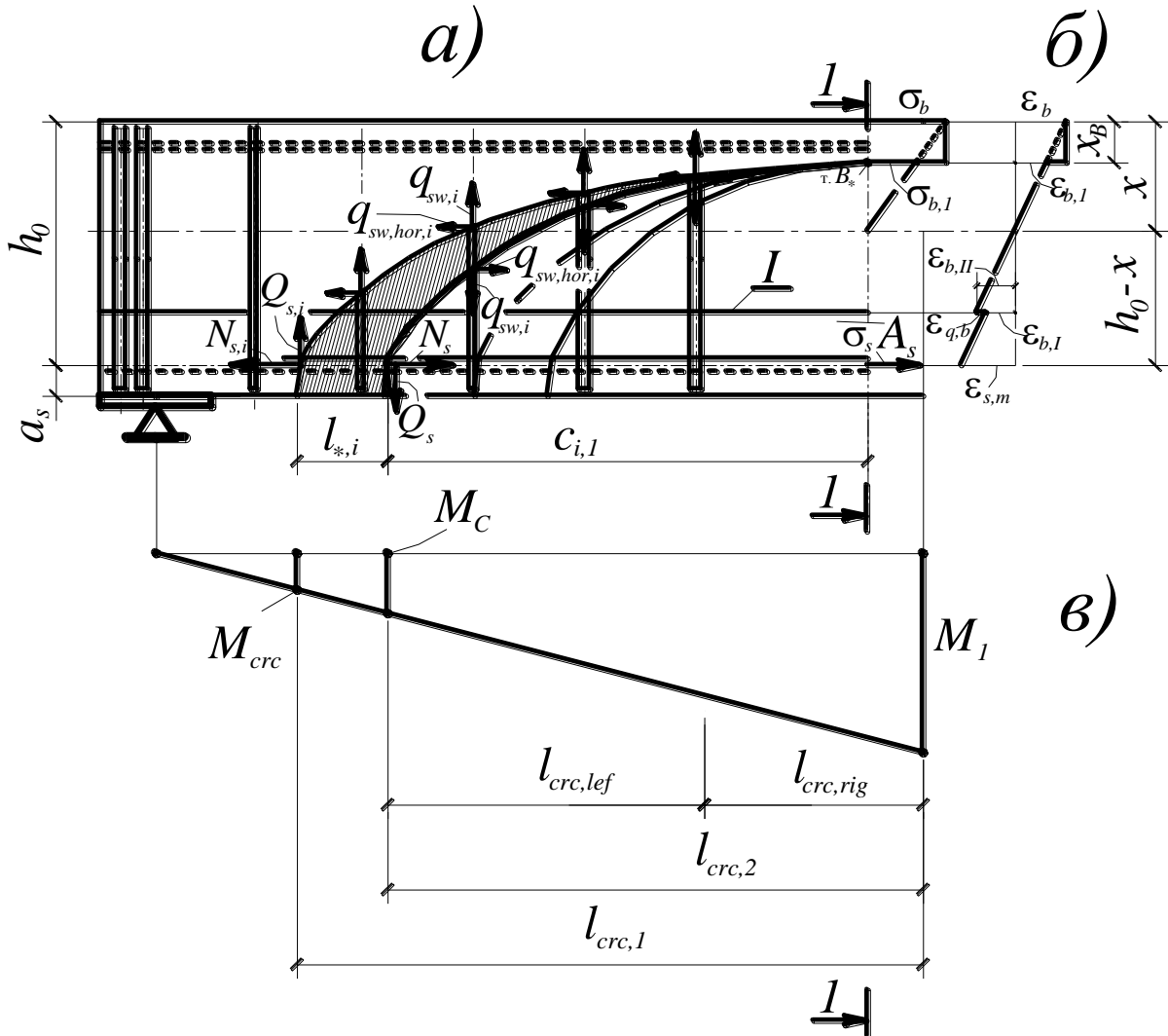


Рис. 2. Расчетная схема для определения усилий в сжатом бетоне, продольной и поперечной арматуре в трещинах, образующих веер 1, прилегающий к сосредоточенной силе: а – схема последовательного выделения арок, прилегающих к опасной наклонной трещине и к смежным трещинам; б – эпюра средних деформаций в сечении 1–1; в – схема для определения последующих уровней расстояния между трещинами I – шов между бетонами

Таким образом, трещинообразование продолжается до момента разрушения. При этом выделяется не один (как это принято в ряде известных методик), а несколько уровней трещинообразования:

$$\left. \begin{aligned} l_{crc} &> l_{crc,1} - \text{трещин нет;} \\ l_{crc,1} &\geq l_{crc} > l_{crc,2} - \text{первый уровень;} \\ l_{crc,2} &\geq l_{crc} > l_{crc,3} - \text{второй уровень;} \\ &\dots\dots\dots \\ l_{crc} &\geq 6t_* - \text{последний уровень.} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Располагая уровнями трещинообразования вдоль продольной и поперечной арматуры в пролете «среза», строится веер трещин первого, второго и третьего видов, прилегающий к сосредоточенной силе и к опоре. Степень реализации наклонных трещин (пересекут ли эти трещины поперечную арматуру) определяются из рассмотрения напряженно-деформированного состояния бетона вдоль хомутов. При этом деформации растянутого бетона

$$\begin{aligned} \varepsilon_{bt}(y) &= \sigma_{sw} A_{sw} \cdot \frac{1}{D_{13}} - \sigma_{sw}(y) A_{sw} \cdot \frac{1}{D_{13}} + \frac{D_{14}}{D_{13}} \cdot y + \frac{D_{15}}{D_{13}} = \\ &= \varepsilon_{sw} \cdot E_{sw} \cdot A_{sw} \cdot \frac{1}{D_{13}} - \varepsilon_{sw}(y) \cdot E_{sw} \cdot A_{sw} \cdot \frac{1}{D_{13}} + \frac{D_{14}}{D_{13}} \cdot y + \frac{D_{15}}{D_{13}}, \end{aligned} \quad (5)$$

где параметры $D_1 \dots D_{12}$ выражены в виде функций от усилий в арках, параметров бетона, армирования и сцепления.

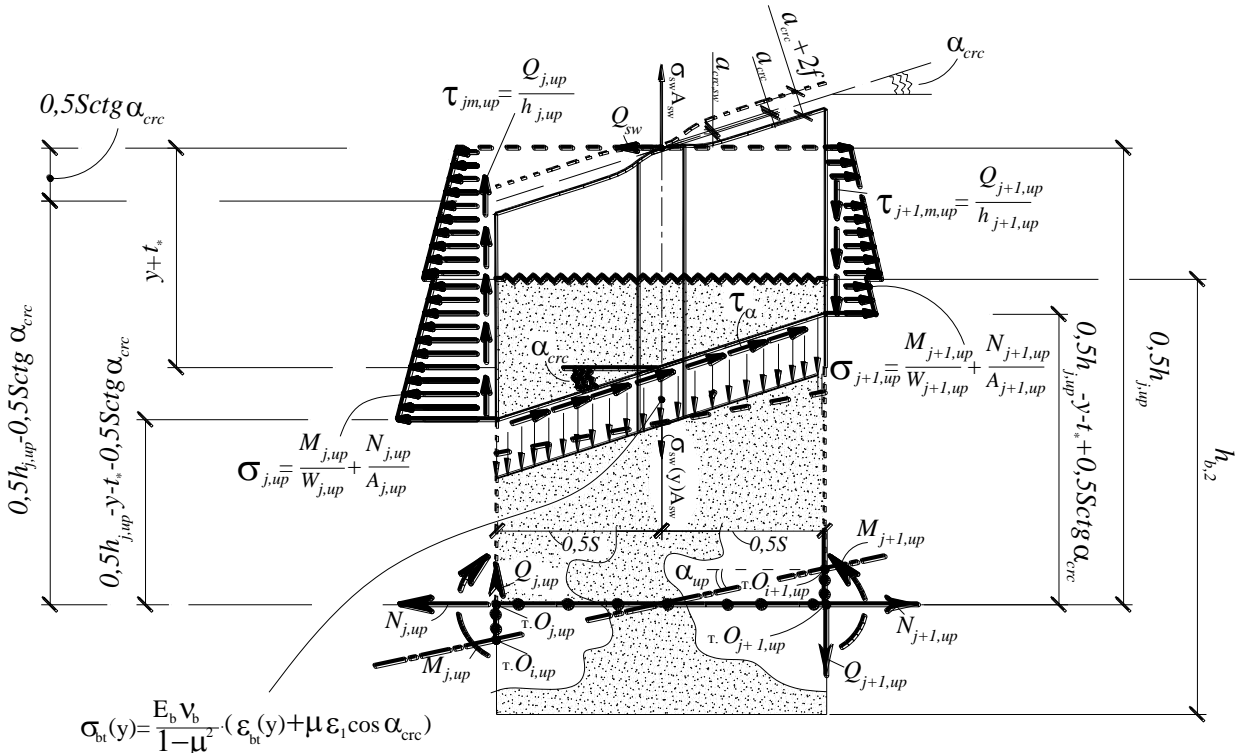


Рис. 3. Расчетная схема второго уровня для представительного объема бетона между хомутами к определению деформаций растянутого бетона $\varepsilon_{bt}(y)$ вдоль оси поперечной арматуры на i -ом уровне образования наклонных трещин первого, второго или третьего типа

Из физических соображений в формуле для определения ширины раскрытия трещин логично использовать урвневое (дискретное) значение l_{crc} (в соответствии с неравенствами (2), (4). Под раскрытием трещин на участках, расположенных по обе стороны от трещины понимается накопление относительных условных сосредоточенных взаимных смещений арматуры и бетона с учетом дополнительного деформационного воздействия в трещине, связанного с нарушением сплошности материала. В итоге:

$$a_{crc} = -\frac{2\Delta T}{G} - \frac{2B_{a,2}}{B} - \frac{2B_2}{B} \ln \left(1 + \frac{B_{a,2} \cdot A_{sw} E_{sw}}{q_{sw} S + B_{a,1} A_{sw} E_{sw}} \right). \quad (6)$$

Проекции наклонных трещин первого, второго и третьего типов, с максимальной шириной раскрытия, определяются из условия экстремума функций многих переменных $F_{1,2} = f(q_{sw}, x_B, \sigma_s, x, \sigma_b, \sigma_{s,l}, \sigma_{b,l}, C_2, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6, \lambda_7)$ и $F_3 = f(q_{sw}, x_{B,2}, \sigma_{s,3}, c_2, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$, соответственно, и вытекающих из этого условия равенств нулю частных производных. Физическая интерпретация полученных решений заключается в том, что они позволяют отыскивать проекции наклонных трещин первого, второго и третьего типа с максимальной шириной раскрытия.

После определения наиболее опасных наклонных трещин проверяется наличие смежных трещин и трещин последующих уровней.

Применительно к расчету деформативности железобетонных конструкций при наличии наклонных трещин, вырезаются вертикальные единичные полосы $dx=1$ (рис. 4), которые рассчитываются по схеме составного стержня с податливыми швами – трещинами (в местах пересечения полосы наклонная трещина принимается горизонтальной). Расчетная схема единичной полосы предполагает наличие таких параметров, как расстояния между наклонными трещинами и ширина их раскрытия.

Выделенная двумя поперечными сечениями вертикальная полоска длиной $dx=1$, может рассматриваться в виде консольного составного стержня.

Дифференциальные уравнения составных стержней имеют общие интегралы, которые с учетом предложенного упрощения порядка дифференциальных уравнений, составного консольного стержня, имеют вид:

$$T = \pm \xi_m e^{\gamma \xi_m z} \int \frac{\Delta(z)}{e^{\gamma \xi_m z}} d(z) \pm C e^{\gamma \xi_m z}. \quad (7)$$

При суммарном действии M, N, Q , используя для рассматриваемой расчетной схемы теорему о среднем, в пределах малых гибкостей, будем иметь (см. рис. 5):

$$T = \frac{1}{2\gamma} \left(-\frac{N_{0,1}}{\varphi_{b,1} E_{b,1} A_{b,1}} + \frac{N_{0,2}}{\varphi_{b,2} E_{b,2} A_{b,2}} + M_0 \cdot \eta \right) (e^{\gamma \xi_m l} - 1) + \frac{P\eta}{2\gamma} \left(l + \frac{1}{\gamma \xi_m} - \frac{e^{\gamma \xi_m l}}{\gamma \xi_m} \right); \quad (8)$$

$$\tau = \frac{\xi_m}{2} \left(-\frac{N_{0,1}}{\varphi_{b,1} E_{b,1} A_{b,1}} + \frac{N_{0,2}}{\varphi_{b,2} E_{b,2} A_{b,2}} + M_0 \cdot \eta - \frac{P\eta}{\gamma \xi_m} \right) \cdot [e^{\gamma \xi_m} - 1], \quad (9)$$

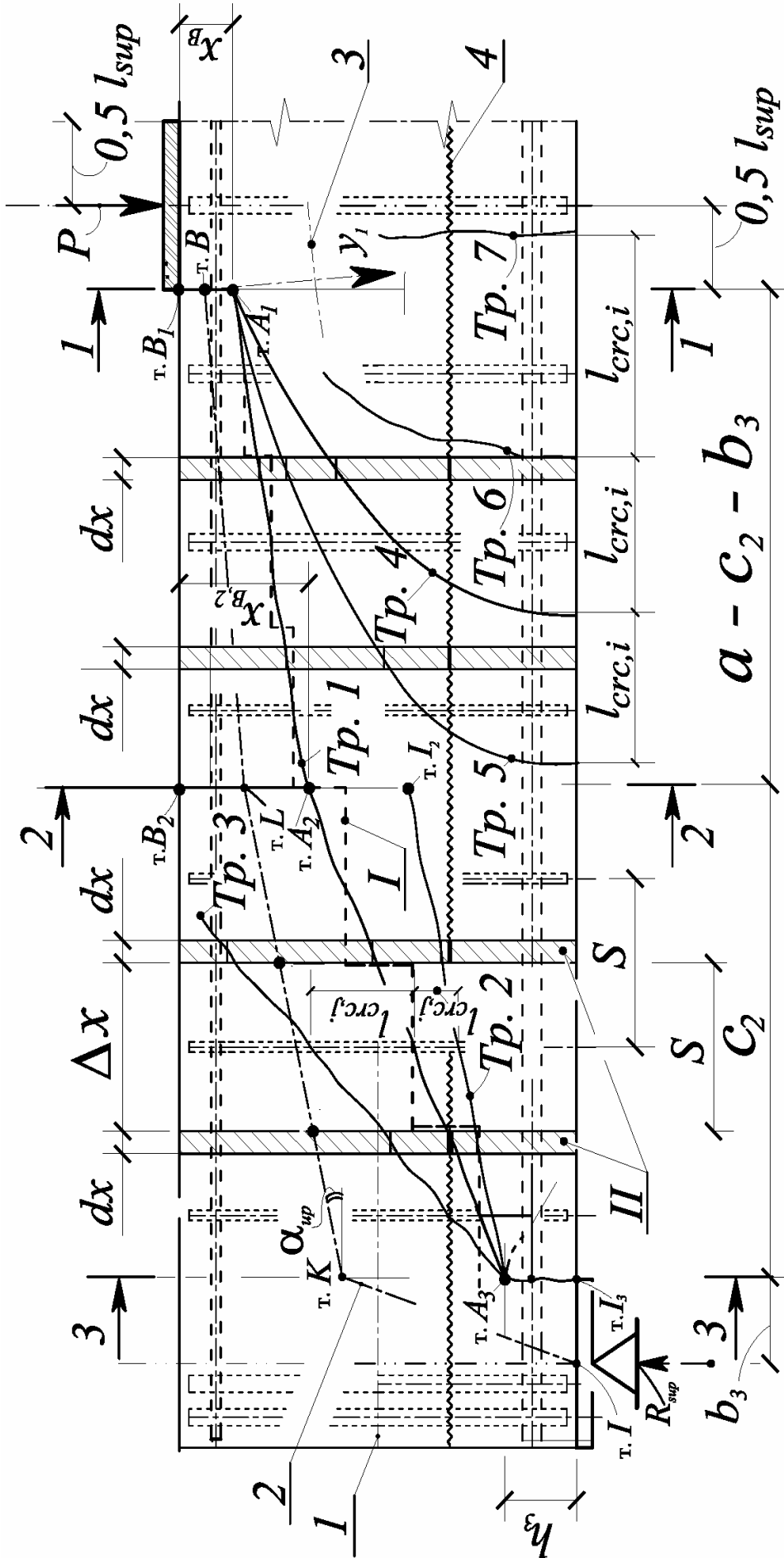


Рис. 4. Схема трещин в железобетонных составных конструкциях, выделение полосок Δx для представительного объема бетона, формирующего расчетную схему второго уровня при определении $l_{crc,i}$ (рис. 3) и элементарных полосок $dx = 1$ для определения жесткостей поперечных сечений (рис. 5)
 1 – геометрическая ось; 2 – ось образующейся припорной арки; 3 – нейтральная ось в окрестности сечения 1–1;
 4– шов между бетонами; I –полоски Δx ; II – элементарные полоски $dx = 1$

где ξ_m – условный погонный модуль сдвига шва контакта, вычисляемый как произведение модуля сдвига на ширину шва контакта ($\xi_m = G_b \cdot b$, где G_b – модуль сдвига, b – ширина шва контакта); при использовании эквивалентных жесткостных характеристик для железобетонных составных конструкций $\lambda = \sqrt{\xi \cdot \gamma}$; γ , Δ , определяются по известным формулам теории составных стержней, а при наличии трещин в растянутой зоне железобетонной конструкции, – по формулам:

$$\Delta = -\frac{N_{0,1}}{(E_{b,1}A_{b,1})_{ekv}} + \frac{N_{0,2}}{(E_{b,2}A_{b,2})_{ekv}} - \frac{f(x_{crc})}{\rho}; \quad (10)$$

$$\lambda = \sqrt{\xi \gamma} = \sqrt{\xi \left[\frac{1}{(E_{b,1}A_{b,1})_{ekv}} + \frac{1}{(E_{b,2}A_{b,2})_{ekv}} + \frac{f^2(x_{crc})}{M \cdot \rho} \right]}. \quad (11)$$

Здесь для выбранных поперечных сечений: $N_{0,1}$, $N_{0,2}$ – продольные силы от внешней нагрузки в 1-ом и 2-ом железобетонном стержне соответственно; $(E_{b,1}A_{b,1})_{ekv}$, $(E_{b,2}A_{b,2})_{ekv}$ – эквивалентные жесткости сечений отдельных железобетонных стержней; ρ – радиус кривизны для железобетонного составного стержня; $\sum EI = M \cdot \rho$; $E_i I_i = M_i \cdot \rho$; M – полный момент в составном стержне; ξ – жесткость шва, определяемая на основании экспериментальных исследований составных призм, в том числе армированных; при этом $\xi = \xi_m / 2bt^*$, t^* – высота пограничного слоя в зоне контакта элементов составного стержня; $(E_{b,i}A_{b,i})_{ekv}$, $f(x_{crc})$ – параметр, зависящий от усредненной высоты сжатой зоны бетона в блоке между трещинами.

Расчет по деформативности железобетонных составных конструкций при наличии наклонных трещин осуществляется с использованием кривизны в n выбранных сечениях, определяемой следующим образом.

В окрестностях сделанных сечений выделяются единичные полоски (см. рис. 4 и 5). Перемещения от раскрытия трещин в пределах такой полоски раскладываются на горизонтальные и вертикальные составляющие. Для выделенных единичных полосок составного стержня определяется работа внутренних сил, состоящая из работы внутренних усилий в составляющих стержнях, работы податливых поперечных связей и связей сдвига.

Учитывая внутренние усилия M и N в составляющих стержнях как во внецентренно-сжатых элементах, можно записать приходящуюся на единицу длины работу внутренних усилий в i -ом стержне в виде:

$$A_i = \frac{2M_i^2}{3E_i I_i}. \quad (12)$$

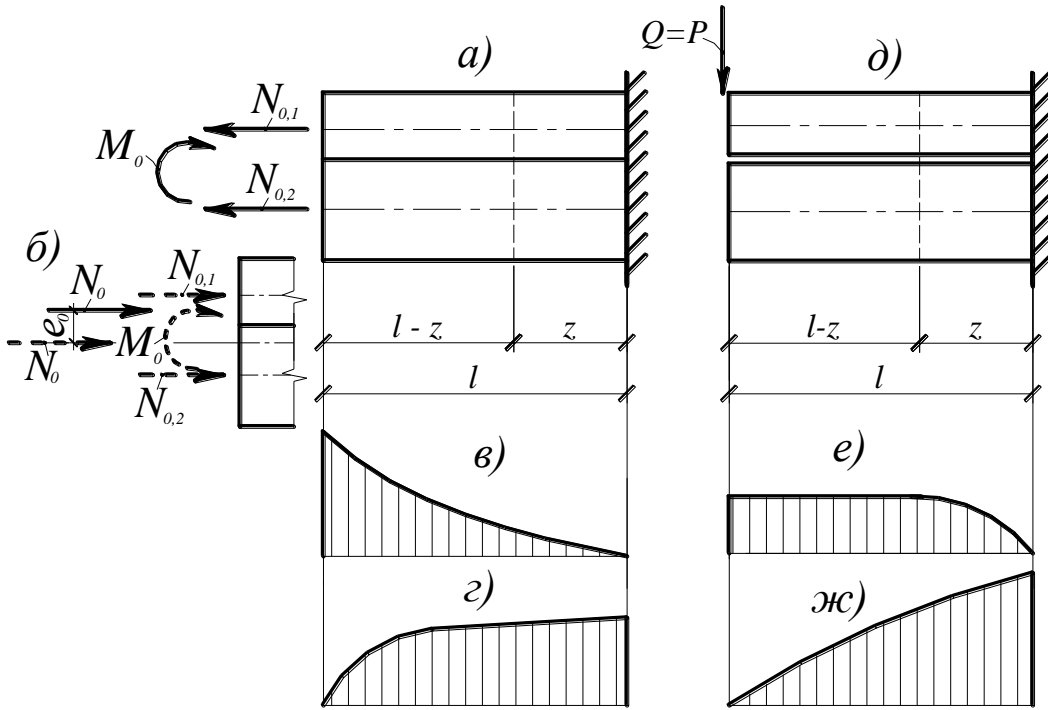


Рис. 5. Статические схемы внецентренного сжатия железобетонной составной консоли (а), (б), эпюры касательных напряжений τ и сдвигающих сил T вдоль поверхности шва (в), (г), соответственно: д, е, ж – то же, при изгибе железобетонной составной консоли сосредоточенной силой

Здесь

$$M_i = M_{0i} + N_{0i} \cdot e_i - T_{i-1} \cdot a_{i-1} - T_i \cdot b_i + S_{i-1} \cdot 0,5 - S_i \cdot 0,5, \quad (13)$$

где M_{0i} и N_{0i} – изгибающий момент и продольная сила в i -м стержне от действия нагрузки без учета усилий в связях; e_i – эксцентриситет силы N_{0i} относительно изогнутой оси i -го стержня; T_{i-1} , S_{i-1} , T_i , S_i – погонные сдвигающие и поперечные усилия в $i-1$ -м и i -м швах соответственно; a_{i-1} , b_i – расстояние от $i-1$ -го и i -го шва до нейтральной оси i -го стержня.

Здесь, в целях упрощения вычислений и единства методического подхода, используемого в дальнейшем для расчета систем железобетонных конструкций, под жесткостью стержневого железобетонного элемента B_i будем понимать коэффициент пропорциональности между полным изгибающим моментом и кривизной. Тогда, выразив в формуле (12) жесткость $E_i I_i$ через кривизну χ_i и просуммировав работу внутренних усилий по всем составляющим стержням в единичной полоске, прилегающей к сечению k , получим:

$$A_k = \frac{2}{3} \sum_{i=1}^{n+1} M_i \chi_i. \quad (14)$$

Работа податливых поперечных связей и связей сдвига единичной полоски, прилегающей к сечению k , для рассматриваемой задачи примет вид:

$$B_k = \frac{2}{3} \sum_{i=1}^n q_{1sw,i} a_{crc,i} \sin \alpha_i + \frac{2}{3} \sum_{i=1}^n q_{sw,i} a_{crc,i} \cos \alpha_i, \quad (15)$$

где $q_{1sw,i}$ и $q_{sw,i}$ – соответственно горизонтальная и вертикальная составляющие погонного усилия в i -м шве в сечении k ; $a_{crc,i}$ – ширина раскрытия i -й трещины в сечении k ; α_i – угол наклона i -й трещины в сечении k .

В итоге суммарная работа внутренних сил для единичной полосы, прилегающей к сечению k , равна сумме выражений (14) и (15).

Располагая количественным значением суммарной работы $A_{k,\Sigma}$, можно заменить единичную полосу составного стержня на эквивалентную единичную полосу железобетонного стержня сплошного сечения, внутренняя работа которой равна $A_{k,\Sigma}$. При этом для k -го сечения значение кривизны может быть определено из выражения:

$$\chi_k = \frac{3A_{k,\Sigma}}{2(M_{0,k} + N_{0,k} y_k)}, \quad (16)$$

где $M_{0,k}$ – суммарный момент в сечении k , приведенный к внешнему; y_k – расстояние от точки приложения равнодействующей продольной силы $N_{0,k}$ до изогнутой оси стержня на участке с наклонными трещинами ($M_{0,k}$ и $N_{0,k}$ уточняются в процессе итераций как внешние воздействия).

После нарушения сплошности железобетонного элемента ширина раскрытия трещин учитывается в формулах перемещений как сосредоточенная деформация сдвига.

Перемещение изогнутой оси, определяющее прогиб железобетонного элемента, включает также деформации сосредоточенного сдвига. Эти деформации, а также сосредоточенные угловые деформации непосредственно включаются в уравнения прогибов и углов поворота железобетонного элемента.

Достаточно точное решение для определения деформаций можно получить, если принять кусочно-линейную интерполяцию кривизны между выбранными сечениями, что равносильно аппроксимации изогнутой оси железобетонного стержня кубическим сплайном.

Разбив произвольно нагруженный железобетонный стержень на n участков, для i -го участка с абсциссами граничных точек b_i и b_i+l_i можно записать (рис.6):

$$\chi(z) = \chi_i + \frac{\chi_{i+1} - \chi_i}{l_i} (z - b_i). \quad (17)$$

После подстановки этого выражения в дифференциальное уравнение сжато-изогнутого стержня ($y_i'' = \chi$) и использования рекуррентных зависимостей в форме метода начальных параметров, получено уравнение изогнутой оси стержня и уравнение углов поворота в следующем виде:

$$y_i = y_1 + \varphi_1 l \frac{i-1}{n} + \frac{l^2}{n^2} \left[\frac{(3i-4) \frac{M_1}{B_1} + \frac{M_i}{B_i}}{6} + \sum_{j=2}^{i-1} \frac{M_j}{B_j} (i-j) \right] + \delta_i \quad (18)$$

$$\varphi_i = \varphi_1 + \frac{l}{n} \left[\frac{M_1}{2B_1} + \frac{M_i}{2B_i} + \sum_{j=2}^{i-1} \frac{M_j}{2B_j} \right] + \Theta_i. \quad (19)$$

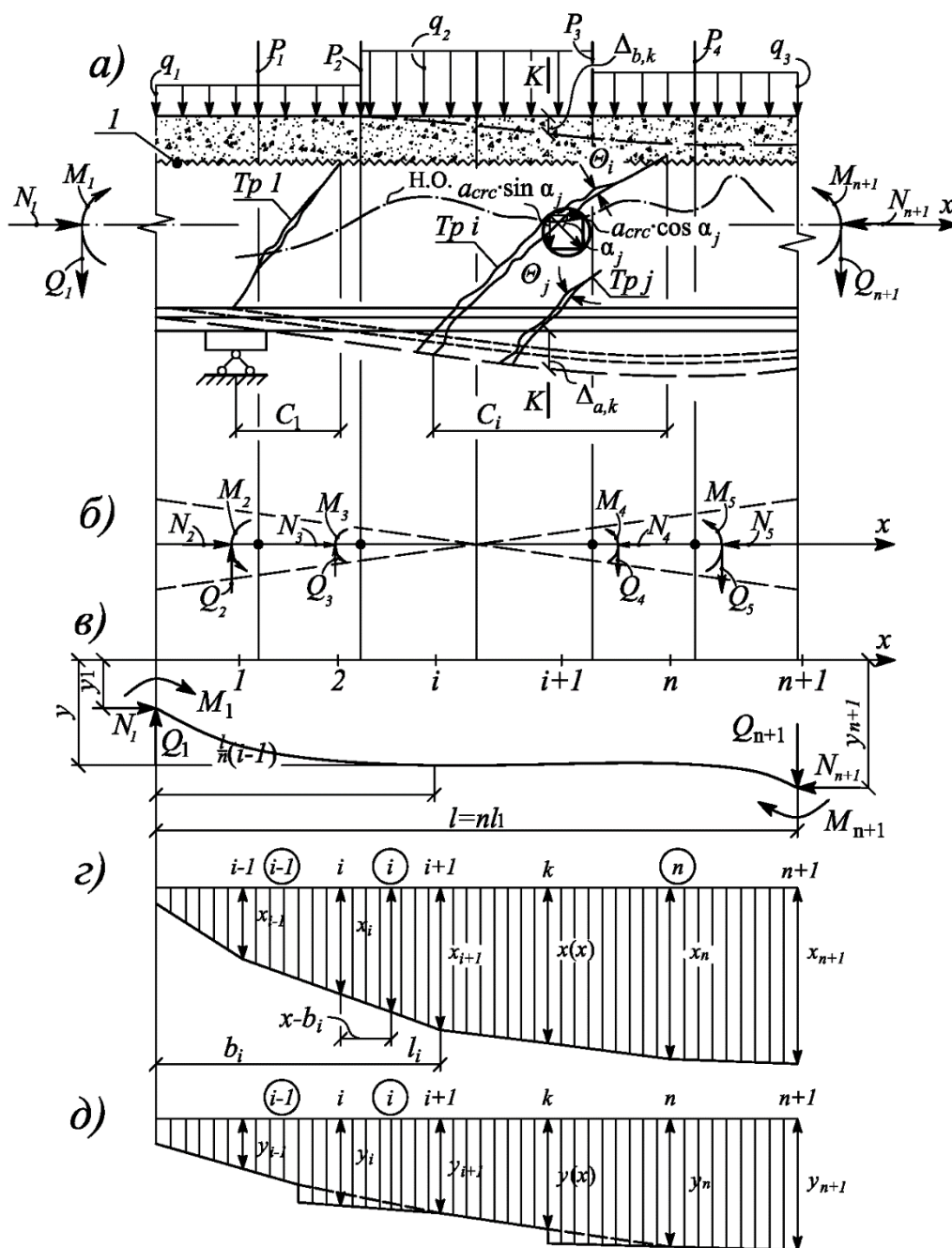


Рис. 6. К расчету железобетонных составных конструкций по деформациям при наличии наклонных трещин: *a* — схема нагружения, трещин и перемещений в сечении *k*; *b* — схема приведения внутренних усилий M, N, Q к геометрической оси; *c* — изогнутая ось стержня; *d* — эпюра кривизн; *d* — эпюра прогибов; 1 — шов между бетонами

Здесь с помощью параметров δ_i и Θ_i соответственно учитываются сосредоточенные деформации сдвига (как вертикальные составляющие ширины раскрытия трещин, накапливаемые от верхней грани до изогнутой оси) и сосредоточенные угловые деформации в *i*-м сечении (см. рис. 6, *a*).

В третьей главе диссертации приведена программа исследований, которая включала испытания пяти серий железобетонных конструкций. Количество испытываемых конструкций принято с учетом варьирования диаметра и шага хомутов, продольного армирования, класса основного и дополнительного бетонов и пролета «среза» ($a/h_0 = 1; 1,5; 2; 2,7$).

При разработке методики экспериментальных исследований предусматриваются четыре группы электротензорезисторов. Первая группа электротензорезисторов устанавливалась по высоте поперечного сечения, а также на берегах шва и в слоях, прилегающих к шву между бетонами на расстоянии 10 мм между их центрами. В первой группе также была предусмотрена подгруппа электротензорезисторов, устанавливаемая цепочкой в пазы (размером $3 \times 4 \times 300$ мм) рабочих арматурных стержней.

Вторая группа электротензорезисторов устанавливалась в виде мембранных розеток на бетоне в прилегающих к шву слоях «старого» и «нового» бетонов. Они предназначались для исследования сложного напряженно-деформируемого состояния слоев «старого» и «нового» бетонов, прилегающих к шву их контакта.

Третья группа электротензорезисторов устанавливалась на уровне оси арматуры над опасной кривой трещиной в сжатом бетоне, в том числе на бетон на берегах трещин после их образования. В данной группе, присутствовали также электротензорезисторы в виде «ловушки» на пути распространения нормальных и наклонных трещин.

Четвертая группа электротензорезисторов использовалась в форме розеток с их установкой на опытные составные призмы размерами $400 \times 100 \times 100$ с каждой стороны шва контакта бетонов.

Для электротензометрических измерений была использована система СИИТ-3.

Устанавливались и механические приборы для измерения прогибов и средних деформаций. Для крепления их к рабочей арматуре приваривались специальные гайки, на которые перед бетонировкой надевались резиновые трубки.

Во время выдержки под нагрузкой периодически отмечали развитие трещин по высоте и измеряли ширину раскрытия трещин вдоль всего профиля трещины. Зарисовка трещин производилась на специальных планшетах в масштабе 1:1, что позволило проводить анализ полной картины образования, развития и раскрытия нормальных и наклонных трещин на различных ступенях нагружения (рис. 7, б).

При анализе картины деформаций бетона вдоль оси растянутой арматуры на берегах трещин, совмещенной со схемой расположения трещин по отношению к электротензорезисторам, была выявлена соизмеримость деформации укорочения с деформациями сжатой зоны бетона.

Экспериментальными исследованиями установлено, что параметр ширины раскрытия нормальных и наклонных трещин на уровне оси арматуры в 1,5–2 раза меньше, чем на незначительном (40 мм) удалении от оси. Это

Четвертая глава диссертации посвящена численным исследованиям составных железобетонных конструкций. Разработан алгоритм и проведен расчет с анализом перераспределения усилий в статически неопределимых системах с составными железобетонными конструкциями, работающих с трещинами.

Алгоритм расчета деформативности (перемещений) железобетонных конструкций на участках с наклонными трещинами включает следующие основные этапы:

1. На участках совместного действия M , N и Q с использованием уравнений трещинообразования устанавливается количество уровней наклонных трещин, определяются расстояния между ними вдоль оси продольной и поперечной рабочей арматуры и величина их раскрытия.

2. Выполняется расчет образовавшихся в расчетной схеме арочных блоков по известным формулам строительной механики. При этом с использованием принятых гипотез в пределах поперечного сечения каждого блока в продольной и поперечной арматуре определяется величина «нагельного эффекта». Определение напряженно-деформированного состояния осуществляется для n сечений ($n \geq 4$), на которые разбивается для расчета рассматриваемый участок с наклонными трещинами. Полученные внутренние усилия в образовавшихся железобетонных блоках заменяются дополнительными внешними усилиями относительно изогнутой оси.

3. С использованием расчетной схемы единичных полосок составного железобетонного стержня с трещинами выполняется расчет и определяются кривизны (жесткости) выбранных n сечений железобетонных составных конструкций на участках наклонных трещин.

Несмотря на то, что предлагаемая методика ориентирована на нормативные документы и обладает инженерной обобщимостью выполняемых этапов расчета, при расчете деформативности составных балок с трещинами максимально использовался прикладной пакет математических программ MSExcel. Результаты сопоставительного анализа прогибов, определенных по нормативной методике, показали что, если в середине опытной конструкции они различаются лишь в пределах 10 %, то в зоне наличия наклонных трещин такое различие может достигать 35 % (рис. 8).

Результаты сопоставительного анализа прогибов представительной статистической выборки из 148 опытов приведены в таблице.

Таблица

Сопоставление данных расчетных методик

Расчётная методика	Количество опытов	Результаты статистической обработки данных		
		\bar{X}	σ	C_v
Предлагаемая методика	184	1,0536	0,089	8,45%
Методика норм	184	0,881	0,2594	29,44%

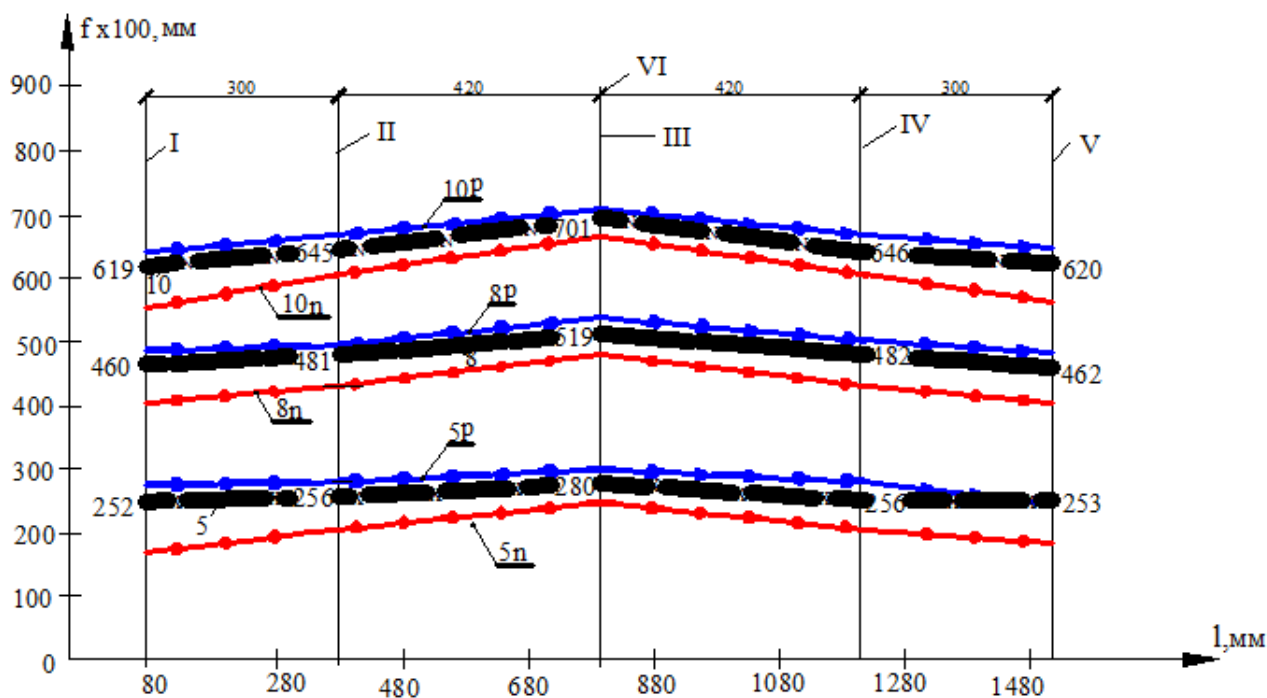


Рис. 8 - График прогибов опытного образца БС-III-2,7-100-Ø10(n1):

5, 8, 10 – экспериментальные кривые при нагрузке (кН): 85; 110,5; 119; соответственно; 5n, 8n, 10n – расчетные кривые по нормативной методике; 5p, 8p, 10p – то же по предлагаемой методике; I, II, III, IV, V – оси установки прогибомеров П1, П2, П3, П4, П5 соответственно; VI – ось, проходящие через середину пролета опытного образца

Как видно из таблицы, предлагаемая методика расчёта имеет заметные преимущества по сравнению с нормативной, о чём свидетельствует коэффициент вариации $C_v = 8,45\%$ и значение среднего \bar{X} , близкого к единице. Использование разработанной методики при проектировании составных железобетонных конструкций позволяет выявить скрытые возможности их рационального армирования, связанные с учетом специфики деформирования и трещинообразования приопорных зон таких конструкций.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Основной результат диссертационной работы – решение важной научно-технической задачи построения расчетной модели деформативности железобетонных составных конструкций при наличии наклонных трещин на основе проведенных экспериментально-теоретических исследований.

1. Построена расчетная модель деформативности железобетонных составных конструкций, объединяющая формирование различных видов наклонных трещин (в том числе, имеющих максимальное раскрытие), включающая расчетную схему пяти блоков и соответствующие разрешающие

уравнения. При этом расчетная схема учитывает условные сосредоточенные сдвиги в швах между бетонами, швах-трещинах, параметры сцепления и несовместности деформаций бетона и арматуры, многоуровневый процесс развития трещин и эффект нарушения сплошности бетона.

2. Разработанная методика расчета и полученные экспериментальные данные в значительной мере дополняют накопленный экспериментальный материал и обеспечивают проверку предложенной расчетной модели при различных схемах нагружения, характере армирования, классах бетона.

3. Разработан алгоритм расчета, позволяющий сохранить физический смысл и инженерную обзримость вычисляемых параметров напряженно-деформированного состояния и деформативности железобетонных составных конструкций при наличии наклонных трещин.

4. Проведенный расчет с использованием предложенной расчетной модели позволяет вскрыть существенное влияние наклонных трещин на жесткость составных конструкций, наличие не одного, а нескольких уровней появления трещин, вплоть до разрушения; существенное (в 1,5 – 2 раза) увеличение ширины раскрытия трещин на некотором (порядка 40 мм) удалении от оси арматуры. При этом также установлено, что размещенные на берегу трещин электротензорезисторы вдоль оси арматуры испытывали деформации укорочения, соизмеримые с деформациями сжатой зоны бетона, что подтвердило наличие эффекта нарушения сплошности в железобетоне.

Результаты сопоставительного анализа деформативности и перемещений с использованием накопленного банка опытных данных железобетонных составных конструкций в широком диапазоне изменения класса и вида бетонов, при различных схемах армирования, наличия предварительного напряжения и продольной силы, показали существенное различие теоретических прогибов, рассчитанных по нормативной методике и опытных значений в зоне наклонных трещин. Так, если в середине опытной конструкции они различаются лишь в пределах 10 %, то в зоне наклонных трещин такое различие может достигать 35 %. Это позволяет выявить скрытые возможности рационального армирования в статически неопределимых системах железобетонных составных конструкций, которые были «невидимыми» при использовании существующих методов расчета и подтверждает эффективность предложенной расчетной модели.

Публикации по теме диссертации

Статьи в журналах, включенных в перечень ВАК

1. Баширов, Х.З. Напряженно-деформированное состояние железобетонных составных конструкций в зоне нормальных трещин [Текст] /Х.З. Баширов, Вл.И. Колчунов, И.А. Яковенко, **И.С. Горностаев**//Строительство и реконструкция. - 2013. - №2. – С.11-20.

2. Баширов, Х.З. Методика экспериментальных исследований прочности, жесткости и трещиностойкости железобетонных составных конструкций по наклонным сечениям [Текст] /Х.З. Баширов, К.М. Чернов, А.А. Дородных, **И.С. Горностаев**// Промышленное и гражданское строительство. - 2013. - № 5. – С. 16-19.

3. Горностаев, И.С. Анализ и результаты экспериментальных и численных исследований деформативности железобетонных составных балок [Текст] /**И.С. Горностаев** // Строительство и реконструкция. - 2014. - №4. – С.3-10.

4. Ключева, Н.В. Методика расчета деформативности стержневых железобетонных составных конструкций с использованием программного комплекса «Мираж-2014» [Текст] / Н.В. Ключева, Вл. И. Колчунов, И.А. Яковенко, **И.С. Горностаев** // Промышленное и гражданское строительство. - 2014. - №10 – С.21-26.

5. Ключева, Н.В. Деформативность железобетонных составных конструкций с наклонными трещинами [Текст] / Н.В. Ключева, Вл. И. Колчунов, И.А. Яковенко, **И.С. Горностаев** //Строительная механика и расчет сооружений. – 2014. - №5. – С.60-66.

Статьи в других печатных изданиях

6. Баширов, Х.З. К расчету прогибов обычных и составных внецентренно сжатых железобетонных конструкций [Текст] /Х.З. Баширов, И.А. Яковенко, **И.С. Горностаев**// Железобетонные конструкции: исследования, проектирование, методика преподавания: сборник докладов Международной научно-методической конференции, посвященной 100- летию со дня рождения В.М. Байкова (4-5 апреля 2012 г. Москва) / под ред. А.Г. Тамразяна. - Москва: МГСУ. - 2012. - С.46-55.

Издатель Александр Воробьев
Лицензия ИД № 00283 от 1 октября 1999 г.,
выдана Министерством Российской Федерации
по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций
Подписано в печать 24.02.2015. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № ____.
Отпечатано на полиграфической базе
Издателя Александра Воробьева: г. Орел, ул. Нормандия-Неман, 99.
Тел.: (4862) 76-17-15, 54-15-48.
E-mail: orlik_id@orel.ru www.orlik-id.orel.ru