

На правах рукописи

САЛЬНИКОВ АЛЕКСЕЙ СЕРГЕЕВИЧ

**РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ
ТРЕЩИН В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ
ПРИ КРУЧЕНИИ С ИЗГИБОМ**

**Специальность 05.23.01 – Строительные конструкции,
здания и сооружения**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Брянск – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Брянский государственный инженерно-технологический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
академик РААСН
Колчунов Виталий Иванович

Официальные оппоненты: **Морозов Валерий Иванович**,
доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент РААСН,
заведующий кафедрой «Строительные
конструкции» ФГБОУ ВО «Санкт-
Петербургский государственный архитек-
турно-строительный университет»

Смоляго Геннадий Алексеевич,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Строительство и
городское хозяйство» ФГБОУ ВО
«Белгородский государственный техноло-
гический университет имени В.Г. Шухова»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Томский государственный
архитектурно-строительный университет»

Защита состоится «17» февраля 2018г. в 13³⁰ на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.094.03, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Юго-Западный государственный университет», федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тульский государственный университет» по адресу: 305040, г. Курск, ул. 50-лет Октября, 94, конференц-зал

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

Автореферат разослан “___” _____ 201__ г.

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

Бакаева Наталья Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Решение основных задач капитального строительства связано с дальнейшим развитием технического прогресса в области бетона и железобетона, как наиболее распространенных материалов несущих конструкций современного строительства. Одним из главных направлений в области развития технического прогресса бетона и железобетона, как отмечено целым рядом Международных конференций последних лет, является углубление и совершенствование теоретических исследований работы железобетонных конструкций при различных сочетаниях силовых воздействий. К весьма распространенному виду такого сочетания относится совместное действие на конструкцию изгибающего и крутящего моментов (балки монолитных перекрытий, бортовые элементы и опорный контур ребристых вантовых покрытий и мостов, подстропильные и подкрановые балки, контурные балки зданий с монолитным каркасом, опоры линий электропередач, железобетонные пилоны и т.д.).

Образование трещин в сечениях таких конструкций, определенное по существующей методике, в ряде случаев оказывается значительно заниженным по сравнению с опытными данными. Вследствие этого проектирование экономичных и в тоже время надежных железобетонных конструкций, работающих в условиях сложного сопротивления – кручения с изгибом, вызывает определенные трудности.

Отсутствие достаточно строгих методов расчета при составлении нормативных документов приводит к принятию расчетных положений, заведомо предполагающих необоснованный запас образования трещин в железобетонных конструкциях при кручении с изгибом.

Работа железобетонных элементов на кручение с изгибом в настоящее время изучена сравнительно мало. Об этом свидетельствует и тот факт, что в СП 63.13330.2012 отсутствуют какие-либо рекомендации по проектированию конструкций при кручении с изгибом, и приведены только общие положения их расчета, которые в ряде случаев, в частности при оценке трещиностойкости при наличии кручения, не всегда согласуются с реальной работой железобетона в стадии образования и развития трещин.

Учитывая большой объём производства и возведения железобетонных конструкций в стране, можно отметить, что даже относительно малое снижение расхода материала за счет применения более совершенных методов расчета имеет важное народнохозяйственное значение.

Степень разработанности темы. Исследованиями железобетонных конструкций (в том числе по образованию трещин) при сложном сопротивлении и кручении с изгибом занимались как отечественные, так и зарубежные ученые: П. Андерсен, Т.Н. Азизов, С.А. Арзамасцев, Е.М. Бабич, А.Я. Барашиков, З.Я. Блихарский, В.М. Бондаренко, П.Ф. Вахненко, В.А. Вернигор, А.И. Демьянов, С.С. Дюрменова, М.С. Жорняк, А.С. Залесов, Х. Ш. Каломов, Б.В. Карабанов, Н.И. Карпенко, Д.Х. Касаев, А.Н. Клюка, Вл. И. Колчунов, Г.Дж. Коуэн, А.М. Кузьменко, Н. Н. Лессиг,

И.М. Лялин, Е. Мерш, В.И. Морозов, Г. Нилендерон, В.С. Плевков, А.А. Покусаев, В.В. Родевич, Л.К. Руллэ, Г.А. Смоляго, Л.Ф. Фалеев, Э.Г.Елагин, К. Юдин, Т.С. Hsu, E. Rausch и др.

При этом, поскольку при кручении с изгибом момент образования трещин и величины угла их наклона существенно влияют на напряженное состояние, в первую очередь возникает необходимость в исследовании вопросов трещинообразования, которые к настоящему времени исследованы недостаточно.

Целью настоящих исследований является изучение процесса и разработка расчетной модели образования пространственных трещин железобетонных конструкций при кручении с изгибом в широком диапазоне отношений действующих крутящих и изгибающих моментов, пролетов их совместного действия и других значимых параметров напряженно-деформируемого состояния.

Задачи исследования:

- провести обзор существующих исследований сложного сопротивления железобетонных конструкций, подверженных кручению с изгибом;
- разработать расчетную модель образования пространственных трещин железобетонных конструкций с целью уточнения расчетных зависимостей для определения обобщенной нагрузки образования видимых трещин, координат их образования и значений угла их наклона к продольной оси при кручении с изгибом;
- разработать программу и методику экспериментальных исследований и экспериментально проверить расчетную модель трещинообразования железобетонных конструкций различных пролетов и соотношений крутящих и изгибающих моментов в условиях сложного сопротивления;
- выполнить численный и сопоставительный анализ теоретических и опытных данных образования пространственных трещин для железобетонных конструкций при изгибе с кручением.

Объект исследования – железобетонные конструкции промышленных и гражданских зданий и сооружений.

Предмет исследования – образование пространственных трещин в железобетонных конструкциях при кручении с изгибом.

Методы исследования – использован экспериментально-теоретический метод. В теоретических и численных исследованиях, выполненных в работе, использованы общие методы механики твердого деформируемого тела, сопротивления материалов и теории железобетона.

Научную новизну работы составляют:

- расчетная модель образования пространственных трещин первого, второго и третьего типов в железобетонных конструкциях при кручении с изгибом, базирующаяся на рабочих предположениях и разрешающих уравнениях, с учетом физической нелинейности, депланации поперечных сечений,

предварительного напряжения в продольной и поперечной арматуре и влияния полей местных напряжений;

- разрешающие уравнения, построенные специальным образом, так чтобы их система не превращалась в распадающуюся для функций многих переменных при отыскании минимальной обобщенной нагрузки, соответствующей образованию первой пространственной трещины первого, второго и третьего типов и координат точек их образования;

- опытные данные для проверки предлагаемой расчетной модели, включающей значения обобщенной трещинообразующей нагрузки, координаты точек образования трещин, схемы трещин и углы их наклона, а также расстояния между трещинами на разных уровнях трещинообразования;

- алгоритм расчета и результаты сопоставительного анализа теоретических и экспериментальных параметров обобщенной нагрузки образования пространственных трещин при кручении с изгибом с использованием предлагаемой расчетной модели, нормативной методики расчета, методики расчета по ЕКБ-ФИП.

Практическая значимость работы состоит в том, что разработанная расчетная модель образования пространственных трещин при кручении с изгибом за счет приближения теоретических параметров к действительным, позволяет получить более строгие решения, и выявить резервы для эффективного использования материалов при проектировании железобетонных конструкций зданий и сооружений.

На защиту выносятся:

- результаты экспериментальных исследований образования пространственных трещин железобетонных конструкций при кручении с изгибом при различных пролетах и схемах загрузки;

- расчетная модель образования пространственных трещин первого, второго и третьего типов в железобетонных конструкциях при кручении с изгибом, опирающаяся на разрешающие уравнения, построенные специальным образом, так чтобы их система не превращалась в распадающуюся при определении минимальной обобщенной нагрузки и координат точек их образования;

- алгоритм расчета и результаты сопоставительного анализа, свидетельствующие об эффективности предлагаемой расчетной модели, по сравнению с нормативной методикой расчета и методикой расчета по ЕКБ-ФИП в широком диапазоне изменения расчетных параметров.

Достоверность результатов работы обеспечивается построением расчетной модели образования пространственных трещин железобетонных конструкций при кручении с изгибом на основе закономерностей механики твердого деформируемого тела, теории железобетона и реальных условий деформирования; сравнительным анализом результатов расчета рассматриваемых конструкций с использованием разработанной модели с данными эксперимента, а также с расчетами по нормативной методике и

методике ЕКБ-ФИП, получивших наибольшее распространение в практике проектирования.

Личный вклад диссертанта состоит в следующем:

- предложена расчетная модель образования пространственных трещин первого, второго и третьего типов в железобетонных конструкциях при кручении с изгибом, с учетом физической нелинейности, депланации поперечных сечений, предварительного напряжения в продольной и поперечной арматуре и влияния полей местных напряжений;

- построены разрешающие уравнения для определения минимальной обобщенной нагрузки, соответствующей образованию первой пространственной трещины первого, второго и третьего типов и координат точек их образования;

- получены новые опытные данные, включающие значения обобщенной трещинообразующей нагрузки, координаты точек образования трещин по осям, схемы трещин и углы их наклона;

- разработан расчетный алгоритм и проведен сопоставительный анализ теоретических и экспериментальных параметров обобщенной нагрузки образования пространственных трещин при кручении с изгибом с использованием предлагаемой расчетной модели, нормативной методики расчета и методики расчета по ЕКБ-ФИП.

Реализация работы. Данная работа выполнялась в рамках организации тематического направления научных исследований РААСН: 7. Развитие теоретических основ строительных наук. Номер и наименование темы по плану РААСН: 7.1.7 Расчет динамических догрузений в арматуре преднапряженных железобетонных элементов составного сечения при внезапном выключении и трещинообразовании элементов в конструктивной системе. Результаты теоретических и экспериментальных исследований внедрены при проектировании железобетонных каркасов жилых и гражданских зданий в г. Брянске, в том числе: 16-ти этажного жилого дома №8 по ГП многофункционального комплекса и использованы в виде рекомендаций ООО «ГПИСТРОЙМАШ» при расчетах зданий Мещовского комбината транспортного литья и вагонно-ремонтного предприятия «Грязи Липецкой области», а также внедрены в учебный процесс строительного факультета кафедры «Строительные конструкции» Брянского государственного инженерно-технологического университета (ФГБОУ ВО «БГИТУ») при изучении дисциплин «Строительные конструкции», «Железобетонные и каменные конструкции», «Развитие теории и методов расчета строительных конструкций» (направление подготовки 08.04.01).

Апробация работы. Результаты экспериментальных и теоретических исследований докладывались на научном семинаре кафедры «Строительные конструкции» Брянского государственного инженерно-технологического университета (ФГБОУ ВО «БГИТУ»), кафедры «Уникальных зданий и сооружений» Юго-Западного государственного университета (ФГБОУ ВО «ЮЗГУ»); на 42-ой Международной научно-практической конференции

«Неделя науки в Инженерно-строительном институте Санкт-Петербургского государственного политехнического университета – Гражданское строительство» (г. Санкт-Петербург, ФГБОУ ВО «СПбГПУ», 3–4 декабря 2014 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 8 печатных работ, включая семь статей, опубликованных в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК, 1 научной статьи в периодическом издании входящем в наукометрическую базу данных Web of Science.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка использованной литературы из 197 наименований, 1 приложения. Полный объем работы составляет 190 страниц, в том числе 133 страницы основного текста, который иллюстрируется 48 рисунками, содержит 7 таблиц, 32 полных страницы с рисунками и таблицами, 25 страниц списка использованной литературы и 3 страницы приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность исследований по рассматриваемой теме, приведены общая характеристика диссертационной работы и основные положения, выносимые автором на защиту.

В **первой главе** рассмотрены и проанализированы существующие методы расчета и результаты исследований железобетонных конструкций при кручении с изгибом, проведенные как российскими, так и зарубежными учеными.

Вторая глава содержит результаты теоретических исследований трещинообразования железобетонных конструкций при кручении с изгибом.

В основу построения расчетной модели трещинообразования при кручении с изгибом для пространственных трещин первого типа, положены следующие расчетные предпосылки:

- образование первой пространственной трещины первого типа (пересекающей только продольную арматуру при $M > M_{crc}$, $M_t > M_{t,crc}$ и $Q \geq Q_{crc}$), второго или третьего типа (пересекающих только поперечную арматуру при $M < M_{crc}$, $M_t > M_{t,crc}$ и $Q > Q_{crc}$ и ориентированных при дальнейшем развитии в направлении точки приложения сосредоточенной силы или с произвольной ориентацией, соответственно) происходит в произвольной точке A , расположенной на нижней грани, боковых гранях, или в произвольной точке сложной фигуры поперечного сечения (рис. 1).

- в качестве критерия образования пространственной трещины принимается условие достижения главными деформациями удлинения бетона ε_{bt} своих предельных значений $\varepsilon_{bt,ul}$;

- эпюры касательных напряжений при кручении τ_t ; положительные и отрицательные зоны депланации поперечных прямоугольных сечений и аппроксимация фигуры поперечного сечения с помощью квадратов $ABCDEFGH$ и вписанных кругов, выполняются в соответствии со схемами рис. 2, а, б.

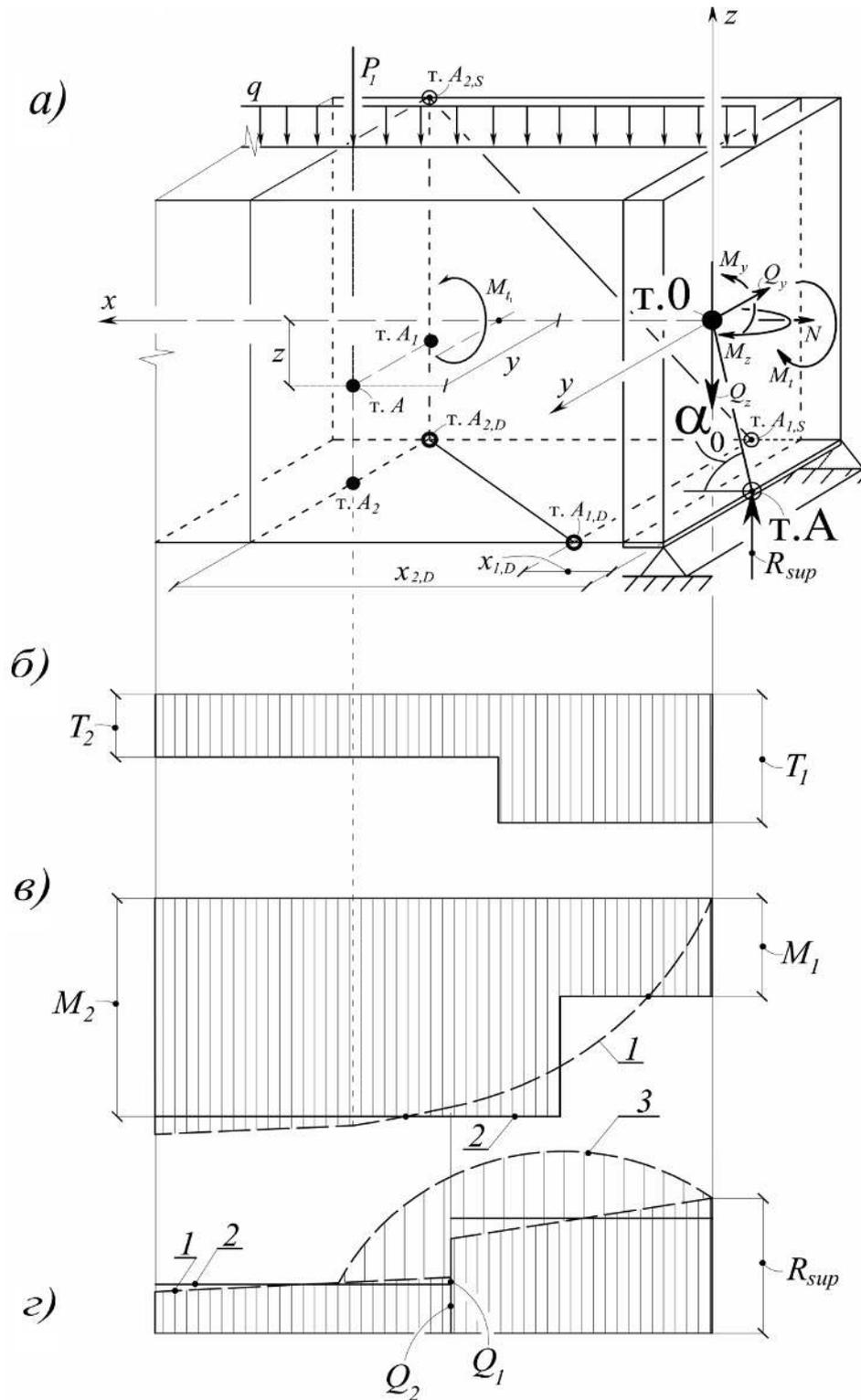


Рисунок 1. Расчетная схема к образованию пространственных трещин первого, второго и третьего типов: *а* – схема усилий и выбор системы координат к образованию первой пространственной трещины; *б*, *в*, *г* – эпюры M_x , M_y и Q_z соответственно; 1 – действительная эпюра; 2 – принимаемая для расчета; 3 – эпюра поперечных сил от местного поля касательных напряжений

– эпюры нормальных σ_x и касательных напряжений τ_{zx} в поперечном сечении, проходящем через точку *A*, аппроксимируются между точками 1 и 2 (рис. 2, *в*, *г*) линейными зависимостями.

Для оценки сопротивления стержневых железобетонных конструкций образованию первой пространственной трещины используются следующие уравнения:

1. Уравнение связи между нормальными напряжениями σ_x в поперечном сечении, расположенном на расстоянии x от опоры и обобщенной внешней нагрузкой, выраженной через опорную реакцию R_{sup} в момент образования первой пространственной трещины:

$$R_{sup} = \frac{\sigma_x \cdot A_{red} \cdot 0,85I_{red} - N \cdot 0,85I_{red} - P_0 \cdot e_{0,p} \cdot A_{red} \cdot 0,5h}{x \cdot 0,5h \cdot A_{red} + \varphi_x \cdot 0,85I_{red}}, \quad (1)$$

где A_{red}, J_{red} - площадь и момент инерции приведенного сечения; $P_0, e_{0,p}$ - усилие предварительных напряжений и эксцентриситет его приложения; φ_x - коэффициент учета местных нормальных напряжений σ_x в направлении оси x от опорных реакций; N - продольная сила.

2. Уравнение для определения касательных напряжений кручения τ_t в поперечном сечении, расположенном на расстоянии x от опоры записывается в соответствии со схемой рис. 2.

$$\tau_t = \tau_{t,j} = \frac{M_{t,j}}{I_{t,j}} \sqrt{(\zeta z)^2 + y^2} \leq \tau_{t,u}. \quad (2)$$

Здесь момент инерции при кручении в общем случае произвольного поперечного сечения, состоящего из прямоугольников, равен сумме моментов инерции квадратов, на которые разбиваются прямоугольники с их последующей аппроксимацией кругами, вписанными в эти квадраты:

$$I_t = I_{t,1} + I_{t,2} + \dots + I_{t,j} = \sum I_{t,j}. \quad (3)$$

При этом накладываемая часть пересекающихся участков при суммировании входит со знаком «минус», а угловые участки в виду их незначительного влияния на значения касательных напряжений не учитываются, а каждый из моментов кручения $M_{t,j}$, приходящихся на вписанные круги, соответственно определяются по формулам:

$$M_{t,1} = M_t \frac{I_{t,1}}{I_t}; \quad M_{t,2} = M_t \frac{I_{t,2}}{I_t}; \quad \dots M_{t,j} = M_t \frac{I_{t,j}}{I_t}. \quad (4)$$

В формулах (3) и (4) $I_{t,j}$ - момент инерции вписанного в соответствующий квадрат круга. Нижний круг используется, как правило, для трещин первого типа, средний - для трещин второго и третьего типов (см. рис. 2, б).

ζ - коэффициент перехода к местным осям; $\tau_{t,u}$ - предельное касательное напряжение, вызванное кручением.

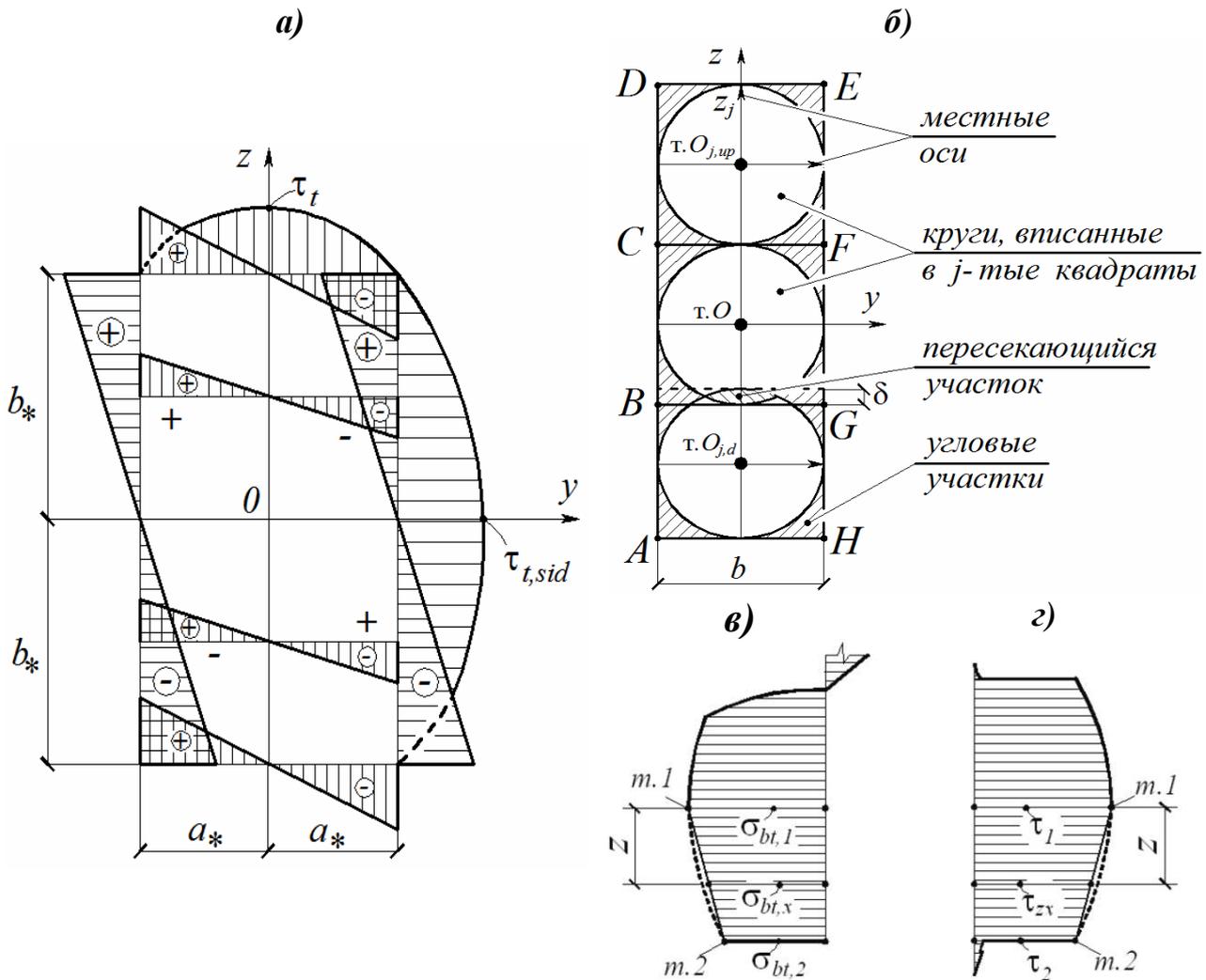


Рисунок 2. Эпюры касательных напряжений при кручении τ_t с положительными и отрицательными зонами депланации поперечных сечений (а), схема аппроксимации фигуры $ABCDEFGH$ поперечного сечения с помощью квадратов и вписанных кругов (б), и эпюры нормальных $\sigma_{bt,i}$ (в) и касательных τ_{zx} (г) напряжений в поперечном сечении, проходящем через точку A

С целью учета пластических деформаций, моменты инерции сечения в стадии трещинообразования упрощенно рекомендуется принимать равными:

$$I_{t,j} = 0,85 \cdot I_{t,j,red} ; \quad I_j = 0,85 \cdot I_{j,red} . \quad (5)$$

Для расчетных зависимостей, в которые параметр $I_{t,j}$ не входит, эту же рекомендацию применительно к стадии образования трещин, можно распространить на модуль деформаций E и модуль сдвига G .

Для трещин второго и третьего типов из уравнения (2) определяется неизвестная координата y :

$$y = \frac{\sqrt{\tau_t^2 \cdot I_{t,j}^2 - M_{t,j}^2 \cdot (\zeta \cdot z)^2}}{M_{t,j}} \leq 0,5b . \quad (6)$$

3. Уравнение для определения касательных напряжений τ_{xz} в поперечном сечении, расположенном на расстоянии x от опоры. При этом

уравнения связи между касательными напряжениями в поперечном сечении железобетонного стержня и обобщенной нагрузкой учитывают поперечную силу от опорной реакции и поперечную силу воспринимаемую отгибаемыми стержнями. Из этого уравнения определяется неизвестная координата z образования пространственных трещин второго и третьего типов:

$$z = \frac{(R_{sup} - Q_{inc})B_1 + \frac{R_{sup}}{A_{red}} \cdot \varphi_{xz} - \tau_{xz}}{(R_{sup} - Q_{inc}) \cdot B_2} \leq 0,5h, \quad (7)$$

где φ_{xz} – коэффициент учета местных касательных напряжений τ_{xz} в направлении оси z от опорных реакций.

Применительно к трещинам первого типа отпадает необходимость в определении координаты z , поскольку уравнение вырождается в равенство $z = -0,5h$. В этом случае уравнение (7) используется для определения τ_{zx} .

После алгебраических преобразований, применительно к трещинам первого типа, получено:

$$\tau_{zx} = (R_{sup} - Q_{inc}) (-0,5h \cdot B_2 - B_1) - \frac{R_{sup}}{A_{red}} \cdot \varphi_{zx} \leq \tau_u. \quad (8)$$

В формулах (7) и (8) параметр B_1 определяется по формуле:

$$B_1 = \frac{S_{n,ax}}{0,85I_{red} \cdot b}. \quad (9)$$

Параметр B_2 , для таврового сечения (полка сверху), и таврового сечения (полка снизу), определяется соответственно по формулам:

$$B_2 = \frac{1}{0,85I_{red} \cdot b \cdot (h - z_d - h'_f)}; \quad (10)$$

$$B_2 = \frac{1}{0,85I_{red} \cdot b \cdot (z_d - h_f)}. \quad (11)$$

В формулах (8) – (11) z_d – расстояние от центра тяжести сечения до нижней грани, параметр h'_f для прямоугольных сечений принимается равным $(h - z_d)/3$, а параметр h_f принимается равным $z_d/3$; τ_u – предельное касательное напряжение, вызванное поперечными силами.

4. Уравнение связи внешней нагрузки, выраженной через опорную реакцию R_{sup} и нормальными напряжениями σ_z , записывается с учетом местных полей напряжений от опорной реакции и приложенной к конструкции сосредоточенной силы, а также с учетом предварительного напряжения в хомутах и отгибах. Из этого уравнения, применительно к пространственным трещинам первого, второго и третьего типов определяется неизвестное σ_z :

$$\sigma_z = \frac{R_{sup}}{A_{red}} \cdot (\varphi_z + k \cdot \varphi_{2,z}) + B_3. \quad (12)$$

Здесь

$$B_3 = \frac{\sigma_{sw,p} \cdot A_{sw,p}}{s_{sw,p} \cdot b} + \frac{\sigma_{inc,p} \cdot A_{inc,p}}{s_{inc,p} \cdot b} \cdot \sin \theta, \quad (13)$$

φ_z – коэффициент учета местных нормальных напряжений σ_z в направлении оси z от опорных реакций; $k \cdot \varphi_{2,z}$ – коэффициент учета местных нормальных напряжений σ_z в направлении оси z от сосредоточенных сил.

5. Используя предпосылку о достижении главными деформациями удлинения бетона своих предельных значений ($\varepsilon_{bt,ul}$) при образовании пространственных трещин первого типа и используя следующие зависимости для напряжений и деформаций:

$$\varepsilon_y = -\frac{\mu}{0,85E}(\sigma_x + \sigma_z); \quad \varepsilon_x = \frac{1}{0,85E}[\sigma_x + \sigma_{x,d} - \mu\sigma_z]; \quad \varepsilon_z = \frac{1}{0,85E}[\sigma_z - \mu\sigma_x];$$

$$\varepsilon_{x,d} = \frac{w}{x} \text{ (деформации депланации поперечного сечения конструкции);}$$

$$w = \frac{M_t}{G \cdot I_t} \cdot f(x, z); \quad f(x, z) = \beta_t \cdot x \cdot z, \quad \beta_t = \frac{a_*^2 - b_*^2}{a_*^2 + b_*^2}, \quad \sigma_{x,d} = \varepsilon_{x,d} \cdot 0,85E,$$

после алгебраических преобразований, получена формула для определения осевых деформаций удлинения бетона в направлении оси x :

$$\varepsilon_x = \frac{\gamma_{xz}^2 (\varepsilon_y - \varepsilon_{bt,ul}) + 4\varepsilon_{bt,ul}^3 - 4\varepsilon_{bt,ul}^2 (\varepsilon_y + \varepsilon_z) + \varepsilon_{bt,ul} (4\varepsilon_z \varepsilon_y - \gamma_{xy}^2) + \varepsilon_z \cdot \gamma_{xy}^2}{4(\varepsilon_z \varepsilon_{bt,ul} - \varepsilon_{bt,ul}^2 + \varepsilon_y \varepsilon_{bt,ul} - \varepsilon_y \varepsilon_z)}. \quad (14)$$

Тогда, используя связь $\sigma_x - \varepsilon_x$, для нормальных напряжений σ_x можно записать:

$$\sigma_x = \varepsilon_x \cdot 0,85E - \sigma_{x,d} + \mu\sigma_z. \quad (15)$$

Применительно к трещинам второго и третьего типов, используются иные уравнения. В частности, для определения нормальных напряжений σ_x принимается условие достижения главными растягивающими напряжениями значений, равных R_{bt} . Тогда, из уравнения для определения главных растягивающих напряжений, принимая во внимание, что $\sigma_y = 0$, $\tau_{zy} = \tau_{yz} = 0$, $\tau_{yx} = \tau_x$, $S_1 = \sigma_x + \sigma_z$, $S_2 = \sigma_x \sigma_z - \tau_{zx}^2$; $S_3 = 0$, после алгебраических преобразований получено:

$$\sigma_x = \frac{\tau_{zx}^2 + R_{bt} \cdot \sigma_z - R_{bt}^2}{\sigma_z - R_{bt}}. \quad (16)$$

Из уравнения для определения главных деформаций удлинения бетона, принимая их равными $\varepsilon_{bt,ul}$, находятся угловые деформации γ_{xz} . В итоге, используя связь $\tau_{xz} - \gamma_{xz}$, для касательных напряжений τ_{xz} в поперечном сечении получено следующее уравнение:

$$\tau_{xz} = \pm \frac{0,85E}{(1 + \mu)} \sqrt{\frac{4\varepsilon_{bt,ul} \varepsilon_x \varepsilon_z - 4\varepsilon_{bt,ul}^2 (\varepsilon_x + \varepsilon_z) + 4\varepsilon_{bt,ul} \varepsilon_x \varepsilon_y \varepsilon_z \cdot (\varepsilon_z + \varepsilon_x) - \varepsilon_y (4\varepsilon_{bt,ul}^2 + 4\varepsilon_x \varepsilon_z)}{(\varepsilon_{bt,ul} - \varepsilon_y)}} \leq \tau_u. \quad (17)$$

6. Заметим, что касательные напряжения при кручении τ_t применительно к трещинам первого типа определяются в соответствии с формулой (2), а применительно к трещинам второго и третьего типов, τ_t определяются из соотношения между изгибающим и крутящим моментами $M_{bend} / M_t = \eta$:

$$\tau_t = \tau_{t,j} = \frac{(R_{sup} \cdot x)_j \cdot \sqrt{(\zeta \cdot z)^2 + y^2}}{I_{t,j} \cdot \eta} \leq \tau_{t,u}. \quad (18)$$

7. Используя полученные уравнения и соотношения между изгибающим (M_{bend}) и крутящим (M_t) моментами $M_{bend} / M_t = \eta$, применительно к трещинам второго и третьего типов составлена функция многих переменных $F(R_{sup}, y, z, \sigma_z, \sigma_x, \tau_{zx}, \tau_t, x, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6, \lambda_7)$, которая имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} & F(R_{sup}, y, z, \sigma_z, \sigma_x, \tau_{zx}, \tau_t, x, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6, \lambda_7) = \\ & = \frac{\sigma_x \cdot A_{red} \cdot 0,85I_{red} - N \cdot 0,85I_{red} - P_0 \cdot e_{0,p} \cdot A_{red} \cdot z}{x \cdot z \cdot A_{red} + \varphi_x \cdot 0,85I_{red}} + \left[y - \frac{\sqrt{\tau_t^2 \cdot I_{t,j}^2 - M_{t,j}^2 (\zeta \cdot z)^2}}{M_{t,j}} \right] \lambda_1 + \\ & + \left[z - \frac{\left((R_{sup} - Q_{inc}) B_1 + \frac{R_{sup}}{A_{red}} \cdot \varphi_{xz} - \tau_{zx} \right)}{\left((R_{sup} - Q_{inc}) \cdot B_2 \right)} \right] \lambda_2 + \left[\sigma_z - \frac{\left(\frac{R_{sup}}{A_{red}} \cdot (\varphi_z + k \cdot \varphi_{2,z}) + B_3 \right)}{\left(\frac{R_{sup}}{A_{red}} \right)} \right] \lambda_3 + \\ & + \left[\sigma_x - \frac{\tau_{zx}^2 + R_{bt} \cdot \sigma_z - R_{bt}^2}{\sigma_z - R_{bt}} \right] \lambda_4 + \\ & + \left[\tau_{zx} - \frac{0,85E}{(1+\mu)} \sqrt{\frac{4\varepsilon_{bt,ul} \varepsilon_x \varepsilon_z - 4\varepsilon_{bt,ul}^2 (\varepsilon_x + \varepsilon_z) + 4\varepsilon_{bt,ul} \varepsilon_x \varepsilon_y \varepsilon_z \cdot (\varepsilon_z + \varepsilon_x) - \varepsilon_y (4\varepsilon_{bt,ul}^2 + 4\varepsilon_x \varepsilon_z)}{(\varepsilon_{bt,ul} - \varepsilon_y)}} \right] \lambda_5 + \\ & + \left[\tau_t - \frac{(R_{sup} \cdot x)_j \cdot \sqrt{(\zeta \cdot z)^2 + y^2}}{I_{t,j} \cdot \eta} \right] \lambda_6 + \left[R_{sup} - \frac{\sigma_x \cdot A_{red} \cdot 0,85I_{red} - N \cdot 0,85I_{red} - P_0 \cdot e_{0,p} \cdot A_{red} \cdot z}{x \cdot z \cdot A_{red} + \varphi_x \cdot 0,85I_{red}} \right] \lambda_7. \quad (19) \end{aligned}$$

Выполняя дифференцирование функции (19) по соответствующим переменным и приравнявая производные нулю, получена дополнительная система уравнений с использованием множителей Лагранжа λ_i . Из решения дополнительной системы уравнений, получена формула для определения координаты x точки образования пространственной трещины:

$$x = \frac{M_{t,j} \cdot I_{t,j} \cdot \eta \sqrt{(\zeta \cdot z)^2 + y^2} \cdot \sqrt{\tau_t^2 \cdot I_{t,j}^2 - (\zeta \cdot z)^2}}{\tau_t \cdot R_{sup} \cdot y}. \quad (20)$$

Аналогичным образом составлена функция многих переменных F_1 , и после ее дифференцирования по соответствующим переменным и приравнивания производных нулю, определена координата x точки образования пространственной трещины первого типа.

$$x = \frac{0,85I_{red} [\varphi_x + \varphi_z + k \cdot \varphi_{2,z} - \mu \cdot \varphi_z - \mu \cdot k \cdot \varphi_{2,z}]}{0,5h \cdot A_{red}}. \quad (21)$$

Все разрешающие уравнения и определяемые из них параметры оказываются «замкнутыми» в единое решение задачи по определению минимальной обобщенной нагрузки и координат образования пространственных трещин различных типов в железобетонных конструкциях при кручении с изгибом. После определения абсциссы x точки A (см. рис. 1), в которой образуется пространственная трещина первого, второго или третьего типа и вычисления обобщенной нагрузки трещинообразования, выраженной в виде функции через опорную реакцию R_{sup} определяется пространственное расположение главных площадок, в окрестности этой точки и направление развития пространственной трещины. При этом направляющие косинусы l , m , n находятся из уравнений связи напряженного состояния на главных и осевых площадках и условия равенства единице квадратов направляющих косинусов.

В третьей главе диссертации приведены методика, конструкция установки и результаты испытаний, выполненных для проверки предлагаемой расчетной модели.

Программа экспериментальных исследований включала лабораторные испытания трех серий железобетонных конструкций. Объем и основные параметры экспериментальных конструкций приведены в таблице 1.

Таблица 1

Серии, объем и характеристики экспериментальных конструкций

№ серии	Шифр конструкции	Кол-во	h , мм	b , мм	l , мм	Плечо кручения, мм	Примечания
1	2	3	4	5	6	7	8
I	КИП –I–2,0	2	252	97,4	2002	350	Шифр конструкции включает: К – кручение, И – изгиб, П – прямоугольное сечение, номер серии: I, II, III: пролет конструкции 0,8; 1,2; 1,6м. Арматура хомутов Ø6A240C; продольная растянутая и сжатая арматура – 2Ø10A400C; класс бетона– B20. Схема испытания двухконсольная, с опорой в середине.
	КИП –I–2,0	2	248	97,6	1996	350	
	КИП –I–2,0	2	246	98,4	1998	350	
	КИП –I–2,0	2	253	97,6	2004	350	
II	КИП –II–1,6	2	251	97,9	1598	320	
	КИП –II–1,6	2	247	98,9	1596	320	
	КИП –II–1,6	2	246	98,7	1603	320	
	КИП –II–1,6	2	253	98,1	1602	320	
III	КИП –III–1,2	2	249	99,0	1196	290	
	КИП –III–1,2	2	251	99,0	1198	290	
	КИП –III–1,2	2	248	97,2	1204	290	
	КИП –III–1,2	2	252	98,5	1202	290	

Количество испытываемых конструкций принято с учетом варьирования пролета образца, класса бетона и плеча приложения

нагрузки (от половины ширины образца до точки приложения силы траверсы). Механические характеристики арматуры опытных конструкций определялись в соответствии с действующими стандартами. При этом было испытано по пять стержней длиной 400 мм каждого диаметра ($\text{Ø}6\text{A}240\text{C}$, $\text{Ø}10\text{A}400\text{C}$).

Железобетонные образцы испытывались в горизонтальном положении (со свободным доступом к растянутой зоне), что позволило детально изучить картину образования, развития и раскрытия трещин (рис. 3 и рис. 4). Испытательная установка позволила реализовать намеченную схему нагружения с заданным пролетом и варьированием плеча приложения нагрузки.

При проведении экспериментальных исследований использовались электротензорезисторы базой 20 мм и индикаторы часового типа с ценой деления 0,001 мм, рис. 3, *a–в*.

Механические приборы с ценой деления 0,001 мм на базе 250 мм были установлены на бетон и арматуру с помощью специальных гаек с резиновыми трубками для исключения влияния окружающего бетона (см. рис. 3, *a*). В качестве прогибомеров использовались индикаторы часового типа с ценой деления 0,01 мм, установленных под опорой в середине и на консолях в точках плеча кручения, соответственно.

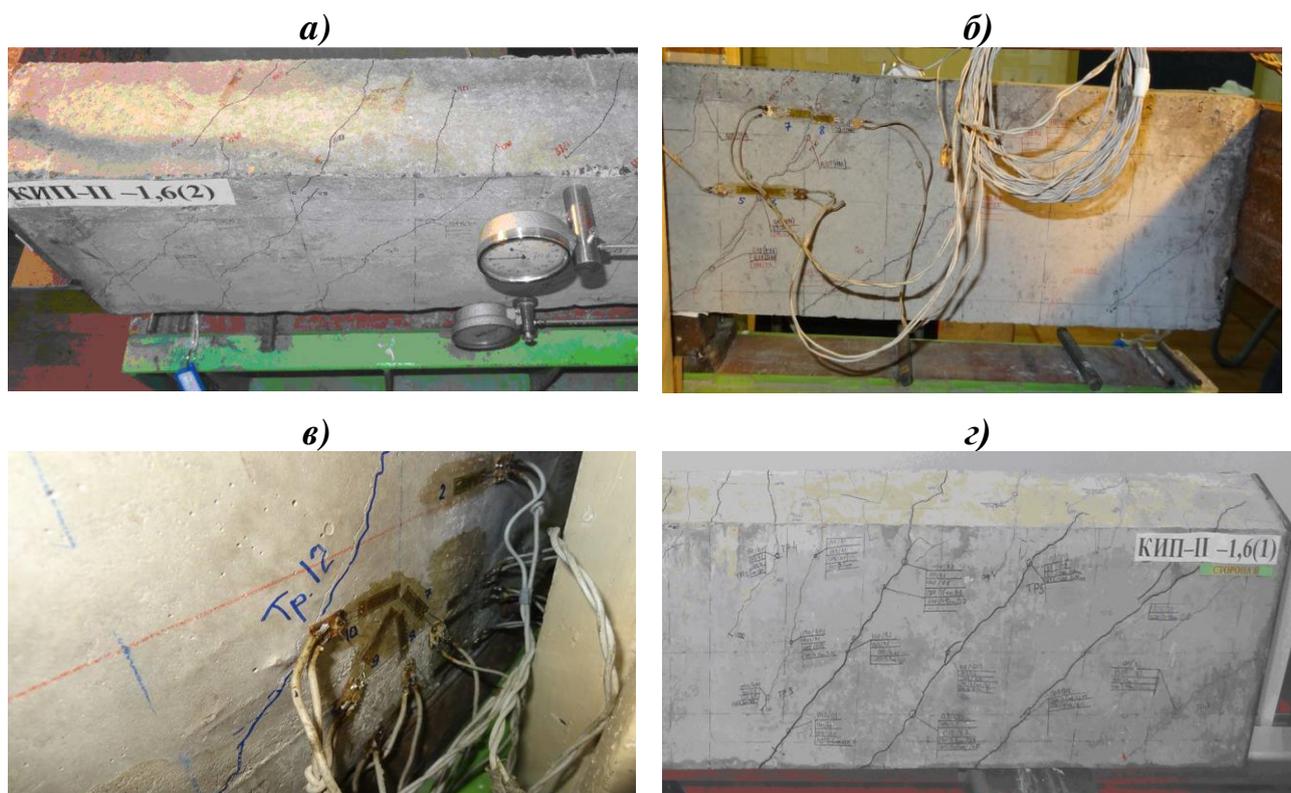


Рисунок 3. Общий вид установки механических приборов (*a*), отдельных электротензорезисторов (*б*), розеток и цепочек электротензорезисторов (*в*) на опытные железобетонные конструкции и картина пространственных трещин (*г*)

Для повышения достоверности экспериментальных данных работа электротензорезисторов дублировалась (там, где это возможно) с помощью механических приборов.

С целью извлечения максимума информации каждый образец испытывался с доведением до разрушения.

Нагружение железобетонных конструкций осуществлялось ступенями, составляющими $0,1M_{crc}$. Отсчеты по механическим приборам и тензорезисторам снимались на каждом этапе дважды после приложения нагрузки и выдержки.

Перед ожидаемым моментом трещинообразования растянутая зона каждой балки тщательно осматривалась, появление трещин фиксировалось визуально и с помощью микроскопа МПБ-3М с 30-ти кратным увеличением.

Картина трещин, их раскрытие и развитие на каждой ступени наносилась на специальные планшеты. Ширина раскрытия трещин замерялась на уровне оси продольной рабочей арматуры и рабочих поперечных стержней, а также в нескольких местах вдоль профиля трещины, по направлению развития трещины.

Экспериментальными исследованиями выполнена проверка предложенной расчетной модели и принятых рабочих гипотез, а также получены опытные данные о расчетных параметрах при сложном напряженно-деформированном состоянии в исследуемых областях опытных конструкций при действии изгибающего, крутящего моментов и поперечной силы, основные из которых приведены на рис.4 и в таблице 2.

Четвертая глава диссертации посвящена численному и сопоставительному анализу проведенных теоретических и экспериментальных исследований.

Анализ и обработка накопленного опытного материала экспериментальных исследований автора позволила построить графики зависимостей трещинообразующей экспериментальной и теоретической обобщенной нагрузки $R_{sup,crc}$ от пролета экспериментальных конструкций (рис. 5). Их анализ показывает, что с увеличением пролета образца от 1200 мм до 2000 мм, значение трещинообразующей нагрузки нелинейно уменьшается до 46 %. При этом расчет по предлагаемой методике не только качественно подтверждает такую закономерность, замеченную в опытах, но и количественно: теоретическая кривая практически совпадает с экспериментальными данными. Отклонения опытных и расчетных значений для испытанных конструкций составило не более 8%.

При проведении сопоставительного анализа отношений теоретической и опытной нагрузки образования пространственных трещин железобетонных конструкций при кручении с изгибом, была обработана достаточно представительная статистическая выборка накопленного опытного материала, включающая 184 опыта различных авторов: опыты Чиненкова Ю.В. (рис. 6), опыты Бахотского И.В., Тимофеева Н.И., Дюрменовой С.С. Сопоставление выполнялось по предлагаемой и нормативной методикам, а также по широко применявшейся при анализе опытных данных методике ЕКБ-ФИП.

Кроме этого проведено сопоставление экспериментальных данных, выполненных автором (см. табл. 2), с их теоретическими значениями, вычисленными по предлагаемой методике. Для опытных конструкций

Таблица 2.

Экспериментальные параметры образования пространственных трещин при кручении с изгибом

№ <i>n/n</i>	Шифр конструкции	$R_{supи,exp}$, кН	$\frac{R_{sup,срс,exp}}{R_{supи,exp}}$	$R_{sup,срс,exp}$, кН	x_{exp} , см	y_{exp} , см	z_{exp} , см
1	2	3	4	5	6	7	8
1	КИП –I–2,0(1)АЛ	12,3	0,35	4,305	36,4	4,95	-5,9
2	КИП –I–2,0(1)АП	12,8	0,31	3,97	-48,3	4,87	-5,8
3	КИП –I–2,0(2)АЛ	11,8	0,38	4,48	32,6	4,95	-6,5
4	КИП –I–2,0(2)АП	13,2	0,36	4,75	-47,6	4,97	-5,9
5	КИП –I–2,0(3)АЛ	13,4	0,36	4,82	32,9	4,92	-5,9
6	КИП –I–2,0(3)АП	12,8	0,32	4,10	-48,1	4,85	-5,7
7	КИП –I–2,0(4)АЛ	11,9	0,39	4,64	51,3	4,81	-7,0
8	КИП –I–2,0(4)АП	12,8	0,34	4,35	-39,4	4,87	-7,1
9	КИП –II –1,6(1)АЛ	15,8	0,38	6,00	31,8	4,87	-6,4
10	КИП –II –1,6(1)АП	17,2	0,34	5,85	-37,7	4,85	-6,8
11	КИП –II –1,6(2)АЛ	16,4	0,31	5,08	39,1	4,98	-5,4
12	КИП –II –1,6(2)АП	15,7	0,29	4,55	-31,1	4,93	-5,8
13	КИП –II –1,6(3)АЛ	15,5	0,32	4,96	39,1	4,95	-6,2
14	КИП –II –1,6(3)АП	16,1	0,33	5,31	-41,1	4,89	-6,4
15	КИП –II –1,6(4)АЛ	15,8	0,38	6,00	38,2	4,88	-7,9
16	КИП –II –1,6(4)АП	16,3	0,36	5,87	-42,3	4,89	-7,1
17	КИП –III –1,2(1)АЛ	19,4	0,34	6,60	31,7	4,93	-7,4
18	КИП –III –1,2(1)АП	18,8	0,33	6,20	-33,4	4,98	-7,1
19	КИП –III –1,2(2)АЛ	17,9	0,32	5,73	25,7	4,98	-5,8
20	КИП –III –1,2(2)АП	18,4	0,33	6,07	-28,3	4,94	-6,4
21	КИП –III –1,2(3)АЛ	19,7	0,33	6,50	34,1	4,86	-5,3
22	КИП –III –1,2(3)АП	18,6	0,32	5,95	-27,4	4,84	-5,8
23	КИП –III –1,2(4)АЛ	18,5	0,29	5,37	32,8	4,93	-6,4
24	КИП –III –1,2(4)АП	19,7	0,31	6,11	-29,8	4,89	-6,9

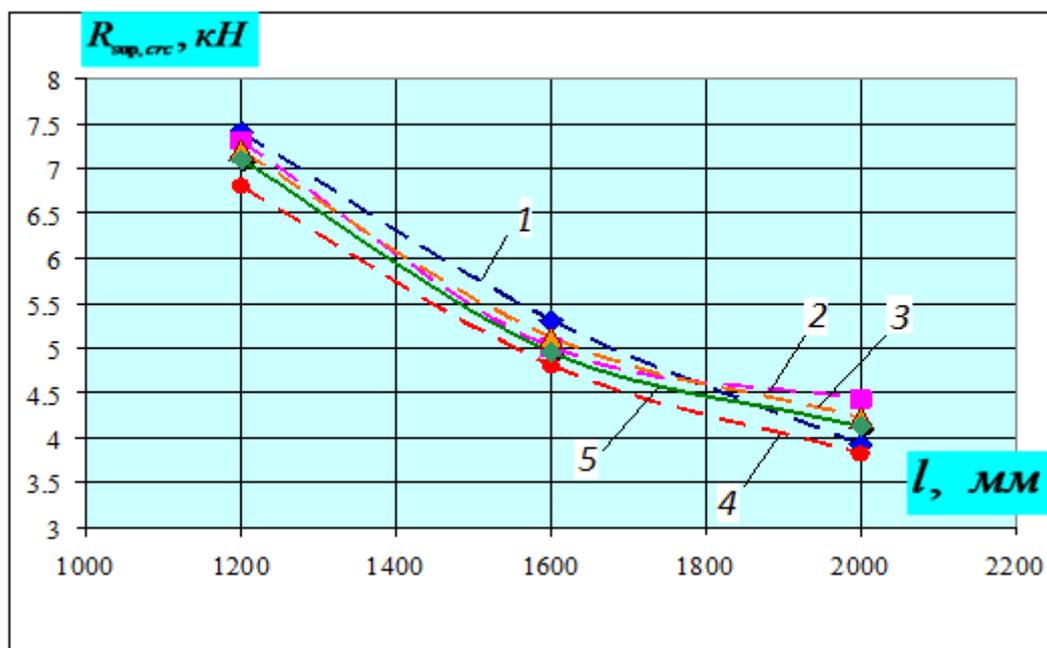


Рисунок 5. График зависимости трещинообразующей экспериментальной и теоретической обобщенной нагрузки $R_{sup,crc}$ от пролета конструкций: 1,2,3,4 – соответственно, первая, вторая, третья и четвертая группа экспериментальных образцов; 5 – теоретическое значение

Чиненкова Ю.В. отклонение значений трещинообразующей нагрузки составило от 1 до 16 %, при варьировании отношений крутящего момента к изгибающему M_t/M_{bend} от 0,1 до 0,4 и классов бетона от В15 до В50. удовлетворительное согласование опытных и расчетных значений теоретической и опытной нагрузкок образования пространственных трещин в сложнапряженных железобетонных конструкциях при кручении с изгибом получено при сопоставительном анализе опытных данных для фибробетонных конструкций Бахотского И.В. (1..12%), для натуральных железобетонных конструкций Тимофеева Н.И. (2..11%) и для опытных железобетонных конструкций Дюрменовой С.С. (2..19 %).

Результаты сопоставительного анализа теоретической и опытной трещинообразующей нагрузки приведены в табл. 3.

Таблица 3

Полученные статистики по различным расчётным методикам

Расчётная методика	Количество опытов	Статистики		
		\bar{X}	σ	C_v
Предлагаемая	184	0,989	0,115	11,63 %
Методика норм	184	0,892	0,167	18,72%
Методика ЕКБ-ФИП	184	0,793	0,142	17,95%

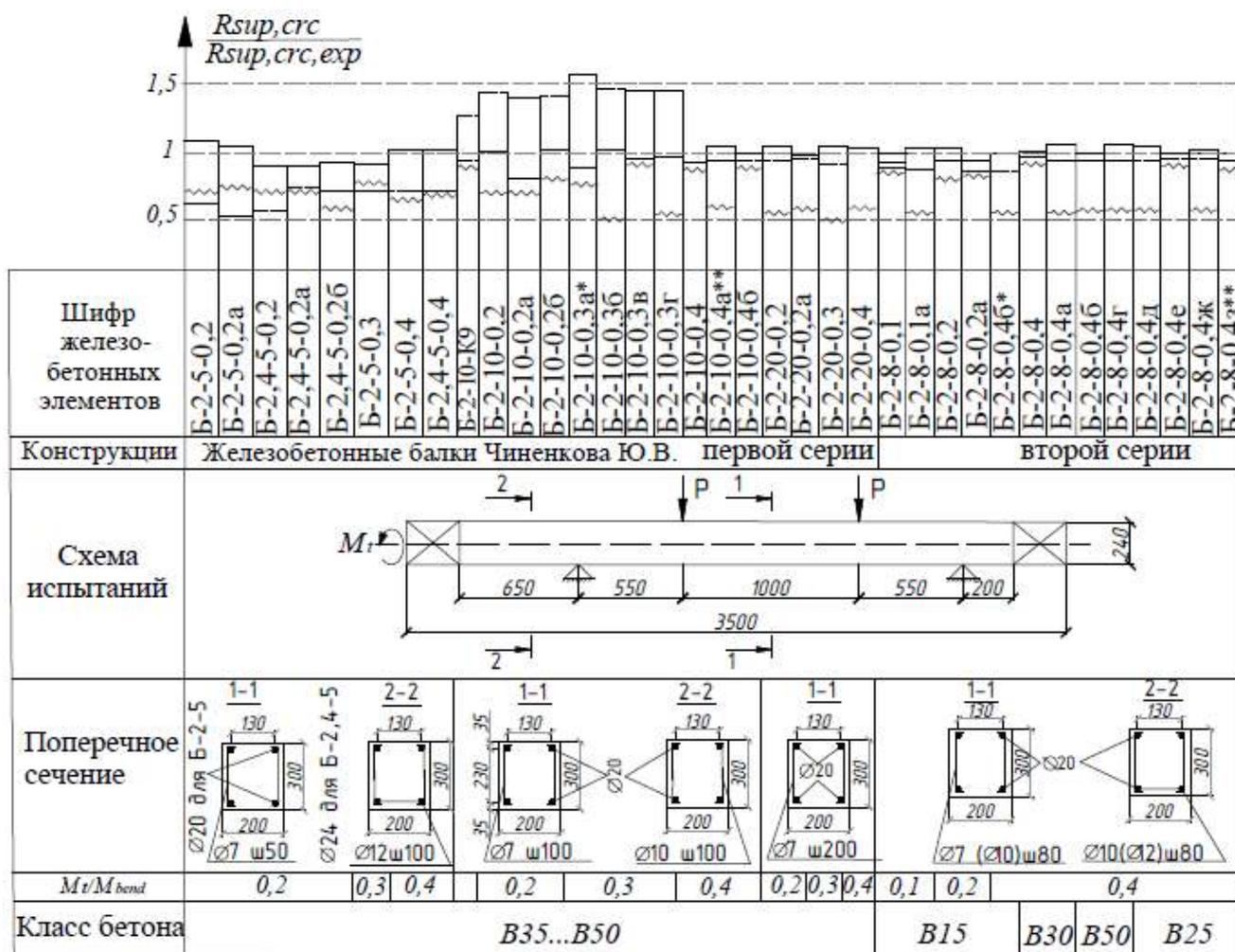


Рисунок 6. Диаграммы сравнения теоретической и опытной трещинообразующей нагрузки железобетонных конструкций Чиненкова Ю.В. при кручении с изгибом по различным методикам: — по предлагаемой методике; - - - - по нормативной методике; ~~~~~ по методике ЕКБ-ФИП

Как видно из табл. 3 предлагаемый способ расчёта имеет заметные преимущества по сравнению с другими известными способами расчета.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенного анализа существующих научных исследований и нормативных документов, научных разработок отечественных и зарубежных ученых, посвященных исследованию железобетонных балок в условиях сложного сопротивления – кручения с изгибом и выполненных в данной работе экспериментально-теоретических исследований можно сделать следующие выводы:

1. В настоящее время в России и за рубежом отсутствуют достаточно строгие рекомендации и соответствующие нормативные документы по определению предельных состояний первой и второй групп для железобетонных конструкций, работающих в условиях сложного напряженно-

деформированного состояния изгиба с кручением. Действующие нормативные документы опираются либо на слишком упрощенные модели и не отражают действительного сопротивления, либо не дают четкого алгоритма их расчета, и в первую очередь в исследовании вопросов трещинообразования, поскольку при кручении с изгибом момент образования трещин и величины угла их наклона существенно влияют на дальнейшее напряженно-деформированное состояние конструкции.

2. В проведенном исследовании обобщена классификация пространственных трещин в железобетонных стержневых конструкциях при кручении с изгибом; построена расчетная модель образования пространственных трещин первого, второго и третьего типов при кручении с изгибом, базирующаяся на критерии образования пространственной трещины в виде условия достижения главными деформациями удлинения бетона ε_{bt} своих предельных значений $\varepsilon_{bt,ul}$. В расчетных зависимостях учитывается физическая нелинейность, депланации поперечных сечений, предварительное напряжение в продольной и поперечной арматуре и влияния полей местных напряжений.

3. Проведенные экспериментальные исследования предоставили возможность проверки достоверности предложенного расчетного аппарата трещинообразования железобетонных конструкций при кручении с изгибом, подтвердили справедливость принятых рабочих гипотез, позволили проверить значения обобщенной трещинообразующей нагрузки $R_{sup,crc}$, координат точек образования трещин, а также получить схемы развития и раскрытия трещин на разных уровнях трещинообразования, вплоть до момента разрушения конструкций.

4. Построены экспериментальные зависимости обобщенной нагрузки трещинообразования $R_{sup,crc}$ от пролета конструкций, из которых следует, что с увеличением пролета образца от 1200 мм до 2000 мм, значение трещинообразующей нагрузки нелинейно уменьшается до 46 %.

5. Разработан алгоритм расчета и выполнен сопоставительный анализ теоретических и экспериментальных параметров образования пространственных трещин при кручении с изгибом, который показал, что расчет по предлагаемой методике не только качественно подтверждает закономерности, полученные в опытах, но и количественно хорошо согласуется с опытными данными.

6. Выполненные сопоставительные расчеты опытных значений обобщенной нагрузки образования пространственных трещин $R_{sup,crc}$ при кручении с изгибом с вычисленными по предлагаемой методике расчета, а также по нормативной методике и методике ЕКБ-ФИП в широком диапазоне изменения схем нагружения, классов бетонов, при различных схемах армирования и характеристиках поперечного сечения по обозначенным методикам, показали, что предлагаемая методика дает наилучшее приближение к опытным значениям: коэффициент вариации составил $C_V = 11,63\%$, а значение среднего $X=0,989$. Это является следствием учета в предлагаемой методике практически всех важнейших параметров, оказывающих влияние на образование пространственных трещин железобетонных конструкций,

подвергнутых кручению с изгибом. Численными исследованиями также установлено, что при определении координат образования первой пространственной трещины, предлагаемая расчетная модель дает следующие результаты: отклонение по оси x составляет от 2% до 26%, по оси y – от 1% до 9%, а по оси z – от 1% до 17%.

Результаты выполненных исследований могут быть использованы при совершенствовании нормативной базы строительного проектирования, в частности, при подготовке новой актуализированной редакции СП 63.13330.2012 «СНИП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения», а также в практике проектирования различных типов железобетонных конструкций, испытывающих сложное сопротивление – кручение с изгибом.

В качестве **предложений для дальнейшего развития исследований**, представленных в работе, следует отметить необходимость разработки расчетной модели и методики расчета ширины раскрытия пространственных трещин для железобетонных конструкций при сложном сопротивлении.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в ведущих журналах и изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. **Сальников А. С.** Расчетная модель образования пространственных трещин первого вида при кручении с изгибом / **А. С. Сальников**, В.И. Колчунов, И. А. Яковенко // Промышленное и гражданское строительство. – 2015. – №3. – С. 35–40.

2. **Сальников А.С.** Методика расчета предельной нагрузки и координат образования пространственной трещины первого вида в железобетонных конструкциях при кручении с изгибом / **А.С. Сальников**, В.И. Колчунов // Строительство и реконструкция. – 2015. – №6(62). – С. 49– 56.

3. **Сальников А.С.** Метод определения минимальной нагрузки и координат образования пространственной трещины в железобетонных конструкциях при кручении с изгибом / **А.С. Сальников**, Н.В. Ключева, Вл.И. Колчунов // Промышленное и гражданское строительство. – 2016. – №1. – С. 52–57.

4. Колчунов В. И. Экспериментальные исследования трещинообразования железобетонных конструкций при кручении с изгибом / В. И. Колчунов, **А. С. Сальников** // Строительство и реконструкция. – 2016. – №3(65). – С. 24– 32.

5. Колчунов Вл. И. Результаты экспериментальных исследований трещинообразования железобетонных конструкций при кручении с изгибом Вл. И. Колчунов, **А. С. Сальников** // Строительство и реконструкция. – 2016. – № 6 (68). – С. 22–28.

6. Демьянов А.И. Расчетные модели статико-динамического деформирования железобетонной конструкции при кручении с изгибом в момент образования пространственной трещины / А.И. Демьянов, В.И.

Колчунов, А.С. Сальников, М.М. Михайлов // Строительство и реконструкция. – 2017. – №3(71). – С. 13–22.

7. Демьянов А.И. Экспериментальные исследования железобетонных конструкций при кручении с изгибом и анализ их результатов / А.И. Демьянов, А.С. Сальников, Вл. И. Колчунов // Строительство и реконструкция. – 2017. – №4(72). – С. 17– 26.

Публикации в изданиях, индексируемых Web of Science:

8. **Salnikov A.**, Kolchunov Vl., Yakovenko I. The computational model of spatial formation of cracks in reinforced concrete constructions in torsion with bending (2015), Applied Mechanics and Materials Vols. 725-726 (2015) pp. 784–789.

Подписано в печать 15.12.2017. Тираж 100 экз.

Усл. печ. л. 1,0 Формат 60×84/16. Заказ №

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии «Деловая Типография» ИП Бескровный Александр Васильевич
г. Курск, ул. К. Маркса, 61Б.
E-mail: zakaz-zachetka@mail.ru