На правах рукописи

Ильющенко Татьяна Александровна

ЖИВУЧЕСТЬ МНОГОЭТАЖНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КАРКАСОВ ЗДАНИЙ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

05.23.01 (2.1.1) Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Курск – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Юго-Западный государственный университет».

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

Официальные оппоненты:
Кабанцев Олег Васильевич
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры железобетонных и каменных конструкций ФГБОУ ВО НИУ «Московский государственный строительный университет»

Левитский Валерий Евгеньевич
кандидат технических наук, доцент
доцент кафедры строительных конструкций, зданий и сооружений ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный инженерно-технологический университет» (г. Брянск)

Защита диссертации состоится «25» марта 2022 г. в 16.00 на заседании объединенного диссертационного совета 99.2.026.03, 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 университета и на официальном сайте ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» http://www.swsu.ru.

Отзывы на автореферат направлять в диссертационный совет по адресу: 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет».

Автореферат разослан « » 20__ г.

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

Колесников
Александр Георгиевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время заметно участились воздействия природного, техногенного и даже террористического характера, ранее не учитывающиеся нормами проектирования, но не редко вызывающие обрушение отдельных конструкций, а в некоторых случаях и всего сооружения. Поэтому во многих странах, в том числе и в России, для повышения конструктивной безопасности зданий и сооружений, сохранения жизни и здоровья, находящихся в них людей разработаны и введены в практику проектирования нормативные документы по защите зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения при таких особых воздействиях.

До настоящего времени в нашей стране и за рубежом в научных публикациях, посвященных изучению особенностей напряженно-деформированного состояния конструкций зданий и сооружений при особых воздействиях, вызывающих в конструкциях запредельные состояния, рассматривались обычные ненапряженные железобетонные конструкции. Изучение деформирования и разрушения предварительно напряженных железобетонных конструкций не проводилось.

Степень разработанности темы. Задачи живучести сооружений и методы их защиты от прогрессирующего обрушения составляют новое направление решения общей проблемы безопасности. Исследования в этом направлении в последние два-три десятилетия все более интенсивно проводят российские и зарубежные ученые такие, как В.А. Алмазов, В.М. Бондаренко, В.Н. Байков, Г.А. Гениев, В.А. Гордон, О.В. Кабанцев, Н.И. Карпенко, Э.Н. Кодыш, В.И. Колчунов, Б.С. Расторгуев, А.Г. Тамразян, В.И. Травуш, Н.Н. Трекин, Г.И. Шапиро, В.С. Федоров, Н.В. Федорова, H.M. Elsanadedy, X. Lu, P. Ren, M. Tsai, J. Yu и др. По мере углубления этих исследований возникает ряд новых научных задач, без решения которых сложно обеспечить защиту зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения и тем более нормирования основных параметров для расчета и конструирования зданий и сооружений, устойчивых к особым воздействиям. До настоящего времени проводимые исследования в этом направлении касались в основном ненапряженных железобетонных конструкций и моделей их деформирования. В то же время одним из эффективных методов защиты конструктивных систем зданий и сооружений при особых воздействиях может стать постановка предварительно напряженной арматуры в изгибаемых и растянутых элементах каркасов зданий. Решение такой проблемы связано с созданием деформационной модели, построением критериев прочности и трещиностойкости предварительно напряженных железобетонных элементов рамно-стержневых конструктивных систем при внезапном перераспределении силовых потоков. Условию прочности и пластичности бетона и железобетона, по-разному сопротивляющихся растяжению-сжатию, посвящено большое число исследований. Был разработан ряд теорий прочности такими учеными, как П.П. Баландин, О.Я. Берг, Г.А. Гениев, Н.И Карпнко, С.Д. Пономарев, J.C. Simo, G. Meschke, J. Lee и др. Большое число экспериментальных исследований по этой проблеме было проведено А.А. Гвоздевым, В.П. Некрасовым, А.Н. Васильковым, В.И. Корсуном, И.Г. Гончаровым, W.H. King и др. Однако, во всех перечисленных исследованиях не рассматривались предварительно напряженные

железобетонные конструкции.

Цель диссертационной работы – развитие положений теории живучести железобетонных конструктивных систем зданий и сооружений с предварительно напряженными элементами и способов их защиты от прогрессирующего обрушения при особых воздействиях.

В соответствии с этой целью работы были сформулированы и решены следующие **основные задачи:**

– анализ современного состояния проблемы живучести каркасов зданий при особых воздействиях;

– построение методики расчета железобетонного каркаса многоэтажного здания с предварительно напряженными ригелями и исследование его статико-динамического деформирования для определения расчетных параметров прочности и трещиностойкости при рассматриваемом режиме нагружения;

– экспериментальное определение параметров деформирования и разрушения предварительно напряженных железобетонных многоэтажных рам при проектных и запроектных воздействиях;

– разработка алгоритма расчета параметров прочности и деформативности железобетонных предварительно напряженных рамно-стержневых конструктивных систем при рассматриваемых особых воздействиях;

– разработка рекомендаций по повышению живучести железобетонных рамно-стержневых каркасов многоэтажных зданий и сооружений с предварительно напряженными ригелями и их защиты от прогрессирующего обрушения.

Научную новизну работы составляют:

– деформационные зависимости для предварительно напряженных железобетонных элементов, критерии прочности и трещиностойкости таких элементов при режимном статическом нагружении на первом этапе и высокоскоростном динамическом догружении с разных уровней напряженного состояния на втором этапе;

– результаты экспериментального определения предельных деформаций, статической и динамической прочности, коэффициента динамичности и других расчетных параметров предварительно напряженных железобетонных элементов при рассматриваемых режимах нагружений;

– алгоритм расчета и результаты численного анализа живучести монолитных железобетонных рамно-стержневых конструктивных систем железобетонных каркасов многоэтажных зданий с предварительно напряженными ригелями при внезапном перераспределении силовых потоков после удаления одной из несущих конструкций.

Теоретическая и практическая значимость работы. Предложенная деформационная модель, критерии прочности и трещиностойкости для расчета предварительно напряженных железобетонных элементов рамно-стержневых конструктивных систем в запредельных состояниях, вызванных внезапным удалением одной из несущих конструкций, позволят создать более эффективные способы защиты таких систем от прогрессирующего обрушения. Основной

научный результат таких исследований состоит в установлении особенностей режимного статико-динамического деформирования, трещинообразования и разрушения предварительно напряженных железобетонных элементов конструктивно нелинейных систем в запредельных состояниях при внезапном изменении их напряженного состояния.

Методология и методы исследования. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования основаны на фундаментальных положениях строительной механики и механики железобетона, а также на физико-механическом и численном моделировании исследуемых железобетонных конструктивных систем при статическом и высокоскоростном динамическом нагружениях.

Положения, выносимые на защиту:

– исходные гипотезы, диаграммы состояний расчетных сечений и зависимости для определения приращений кривизн и обобщенных усилий, критерии прочности и трещиностойкости в сечениях предварительно напряженных железобетонных конструкций при мгновенном выключении из работы несущих элементов;

– расчетные параметры статико-динамического деформирования предварительно напряженных элементов монолитных железобетонных рамно-стержневых конструктивных систем;

– методика и результаты экспериментальных исследований деформирования, трещинообразования и разрушения фрагментов железобетонного каркаса с предварительно напряженными ригелями;

– результаты численного анализа деформирования и разрушения внезапно повреждаемых предварительно напряженных железобетонных конструктивных систем.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов основывается на использовании аналитических и численных методов строительной механики и механики железобетона с экспериментальной проверкой отдельных гипотез на железобетонных фрагментах рамно-стержневых конструкций и сопоставлением полученных данных с результатами теоретических исследований.

Апробация результатов исследования. Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: X Международная научная конференция «Актуальные вопросы строительной физики. Энергосбережение. Надежность строительных конструкций, экологическая безопасность» (2-5 июля 2019 года, г. **Москва**); Международная конференция «Modelling and Methods of Structural Analysis» (13-15 ноября 2019 года, г. **Москва**); Научно-практический форум Smart Build-2020 «Стройка Политеха» (25-26 сентября 2020 года, г. **Ярославль**); Международная конференция "International Conference on Materials Physics, Building Structures and Technologies in Construction, Industrial and Production Engineering" (26-28 апреля 2021 года, г. **Владимир**); Международная научная конференция «Задачи и методы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» («Золотовские чтения», 25-26 августа 2021 года, г. **Москва**).

Реализация результатов работы.

Материалы исследований использовались при выполнении НИР по теме НИИСФ РААСН 3.1.1.6 «Создание, исследование и развитие основ теории живучести железобетонных конструктивных систем зданий и сооружений с преднапряжёнными элементами и односторонними связями» (№ госрегистрации 121032400136-3), при разработке Пособия по проектированию мероприятий по защите зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения к СП 385.1325800.2018 (Часть 2), при выполнении НИР «Совершенствование методов расчета защиты железобетонных конструкций зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения с учетом деформационной модели особого предельного состояния» к СП 385.1325800.2018 с Изменением №1 в рамках государственного задания, а также при реализации проекта фундаментальных научных исследований, выполняемого в рамках гранта Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), номер научного проекта №19-38-90111 «Деформационная модель предварительно напряженного железобетона при режимном нагружении». Результаты работы внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет».

Публикации.

По теме диссертационного исследования опубликовано 10 работ, из которых 4 публикации входят в перечень изданий, утвержденных ВАК РФ, получено 2 патента на изобретение.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 4 разделов, заключения; изложена на 166 страницах, проиллюстрирована 62 рисунками и 6 таблицами. Список литературы содержит 174 источника, в том числе 66 иностранных**.**

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность рассматриваемой темы диссертационного исследования, приведены общая характеристика работы и ее основные положения, которые автор выносит на защиту.

В первой главе работы представлен обзор теоретических и экспериментальных исследований, а также нормативной отечественной и зарубежной базы с точки зрения решения проблемы защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Одним из первых зарегистрированным в мире прогрессирующим обрушением было разрушение каменной кладки колокольной башни при соборе St Mark's Campanile в июле 1902 года из-за появления трещин по причине пожара, а одним из самых ранних и известных примеров является обрушение части многоэтажного здания Ronan Point из-за взрыва газа в Лондоне в 1968 году. Что касается аварий, вызвавших прогрессирующее обрушение в России, то можно назвать разрушение кровли на Таганрогском металлургическом заводе в Ростовской области, обрушение купола «Трансвааль-парка» на юго-западе Москвы в 2004 году, обрушение Басманного рынка в Москве и др. В связи с этими и другими авариями число публикаций по проблеме живучести зданий и сооружений за последние два десятилетия увеличилось. Опубликован ряд российских и зарубежных обзорных исследований, в их числе и фундаментальные обзорные работы Бондаренко В.М., Еремеева П.Г., Кабанцева О.В., Карпенко Н.И., Кодыша Э.Н., Колчунова В.И., Травуша В.И., Тамразяна А.Г., Трекина Н.Н.,

Тура В.В., Федоровой Н.В., Шапиро Г.И., Kiakojouri, F., Sheidaii, Adam J.M., Parisi F., и др., в которых приведена основная терминология, классификация типов прогрессирующего обрушения, анализ существующих концептуально-методологических подходов к выполнению требований конструктивной безопасности при особых воздействиях, представлены известные к настоящему времени подходы к решению задач по обеспечению живучести зданий. 30 декабря 2009 г. в России вступил в силу ФЗ №384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» и разработан свод правил СП 385.1325800.2018 «Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения» (Изменение №1). Во многих зарубежных странах также вступили в силу нормативные документы схожей направленности, например UFC 4-023-03. Unified Faclities Criteria (UFC) и General Services Administration (GSA) в Америке, группа нормативных документов Eurocode в странах ЕС, National Building Code of Canada в Канаде и др., в которых также представлены общие рекомендации по расчету и защите конструктивных систем зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения.

За последние два-три десятилетия в России и за рубежом был проведен ряд теоретических исследований, направленных на обеспечение живучести зданий и сооружений и перераспределение силовых потоков в статически неопределимых конструктивных системах при внезапном удалении одного из несущих элементов. В их числе можно назвать исследования В.О. Алмазова, Н.Б. Андросовой, Г.А. Гениева, В.М. Бондаренко, Н.И. Карпенко, Э.Н. Кодыша, В.И. Колчунова, Расторгуева, А.Г. Тамразяна, В.И. Травуша, Н.Н. Трекина, В.С. Федорова, Н.В. Федоровой, Г.И. Шапиро, Б.С. Marchis A. G., Botez M. D, Marjanishvili S., Mckay A.E., Brian I. S., Fu F, Salem H. M. и др.

К настоящему времени в России и за рубежом выполнены экспериментальные исследования на особые воздействия в виде внезапного выключения одного из несущих конструктивных элементов. Известны работы Г.А. Гениева, Н.В. Клюевой, А.И. Демьянова, К.А. Шувалова, В.И. Колчунова, А.С. Бухтияровой, Н.О. Прасолова, П.А. Коренькова, С.Ю. Савина, Ву Нгок Туена, M. Sasani, Al-Ostaz A., Yi, W. J., H.M. Elsanadedy и др. Однако эти экспериментальные исследования касались ненапряженных железобетонных конструкций и конструктивных систем. В то же время предварительное напряжение может стать одним из эффективных методов защиты конструктивных систем зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Важную роль в решении таких задач могут быть исследования, связанные с созданием деформационных моделей для оценки живучести предварительно напряженных конструктивных систем при особых воздействиях.

Поэтому проведение экспериментально-теоретических исследований, направленных на определение расчетных параметров деформирования, трещинообразования и разрушения предварительно напряженных железобетонных рамно-стержневых конструктивных систем зданий при особом предельном состоянии и статико-динамических режимах нагружения представляется важной научной задачей для создания элементов теории живучести конструктивных систем из железобетона.

Во второй главе диссертации приведены аналитические зависимости и методика анализа для определения расчетных параметров диаграмм деформирования предварительно напряженных элементов монолитных железобетонных каркасов рамно-стержневых конструктивных систем. Для определения предельных кривизн при рассмотрении особого предельного состояния железобетонных конструкций и статико-динамическом режиме нагружения использован диаграммный метод. Расчетные параметры диаграмм деформирования сечений «момент-кривизна» получены на энергетической основе из условий сохранения потенциальной энергии после структурной перестройки конструктивно нелинейной системы. Кривизна в произвольном поперечном сечении предварительно напряженного железобетонного элемента определена диаграммным методом с использованием упрощенной зависимости «момент-кривизна», предложенной в работах А.Б. Голышева и Вл.И. Колчунова (рисунок 1):

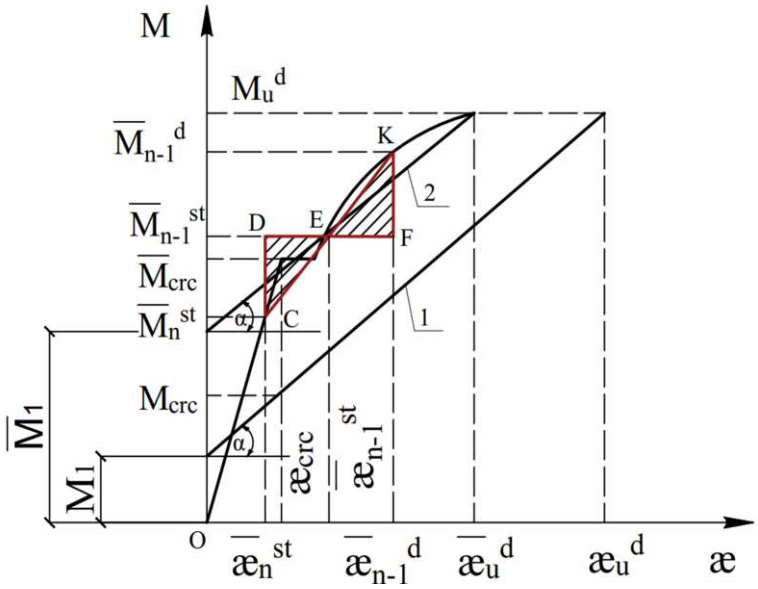

Рисунок 1. Диаграмма «момент кривизна ($M-$ æ)» статико-динамического деформирования сечения железобетонного элемента: 1- ненапряженной системы, 2 – предварительно напряженной системы

$$æ = \frac{M-M_1}{B_1}, \qquad (1)$$

где M_1 - отрезок, отсекаемый на оси моментов диаграммы «$M-$ æ», при нагрузке выше нагрузки трещинообразования ($M > M_{crc}$). В предварительно напряженном элементе отрезок M_1 обозначен через $\overline{M_1}$. Параметр B_1 характеризует жесткость железобетонного элемента, физический смысл которого обозначен на диаграмме $B_1 = tg\alpha$.

Для определения $\overline{M_1}$ в предварительно напряженных изгибаемых и внецентренно сжатых железобетонных элементах используем обозначения, принятые в общей формуле определения кривизны железобетонного элемента, и, по аналогии с M_{crc}, момент $\overline{M_1}$ представим в виде:

$$\overline{M_1} = \varphi_2 bh^2 R_{bt,ser} + \varphi_3 N_{tot}(y_{so} + r). \qquad (2)$$

В итоге окончательное выражение кривизны предварительно напряженного железобетонного элемента получено в виде:

$$æ = \frac{M_s - \varphi_2 bh^2 R_{bt,ser} + \varphi_3 N_{tot}(y_{so}+r)}{\varphi_1 E_s A_s h_0^2}. \qquad (3)$$

Уровень потенциальной энергии в предварительно напряженном железобетонном элементе конструктивной системы после внезапной структурной

перестройки при принятых диаграммах деформирования элементов «$M - æ$» (кривая 2) определяется выражением:

$$\Phi(æ)dæ = \int_0^{æ} M(æ)dæ = \int_0^{æ}(M_1 + æB_1)dæ = \frac{B_1}{2}æ^2 + M_1æ. \quad (4)$$

Условие постоянства полной энергии для рассматриваемого сечения предварительно напряженного элемента приводит к выражению:

$$\Phi\left(æ_{n-1}^{d}\right) - \Phi(æ_{n-1}^{st}) = \bar{M}_{n-1}^{st}(æ_{n-1}^{st} - æ_n^{st}). \quad (5)$$

После подстановки (5) в (4) получено квадратное уравнение относительно искомой динамической кривизны $æ_{n-1}^{d}$, решение которого записано в виде:

$$æ_{n-1}^{d} = \frac{\bar{M}_{n-1}^{st} - M_1 + \sqrt{(\bar{M}_{n-1}^{st} - M_1)^2 + \bar{B}_1^2 \cdot (æ_n^{st})^2 - 2\bar{B}_1^2 \cdot æ_n^{st} \cdot (\bar{M}_{n-1}^{st} - M_1)}}{\bar{B}_1^2}. \quad (6)$$

Аналогичным образом получено выражение для определения динамического момента в произвольном сечении n-раз статически неопределимой рамы:

$$M_{n-1}^{d} = \frac{M_{n-1}^{st} - M_1 + M_1 \cdot B_1 + \sqrt{(M_{n-1}^{st} - M_1)^2 + B_1^2((æ)_n^{st})^2 - 2B_1 \cdot (æ)_n^{st} \cdot (M_{n-1}^{st} - M_1)}}{B_1}. \quad (7)$$

Параметр живучести железобетонной статически неопределимой рамно-стержневой конструктивной системы с предварительно напряженными элементами определяется из расчета этой системы, нагруженной силами λP_i, приложенными в каждой трети пролета ригеля на расстояниях αl от опор, и усилиями предварительного напряжения в ригелях (рисунок 2). Нагрузки на ригели принимаются параметрическими и их изменение пропорционально некоторому параметру λ, названному в работе параметром живучести.

а) б)

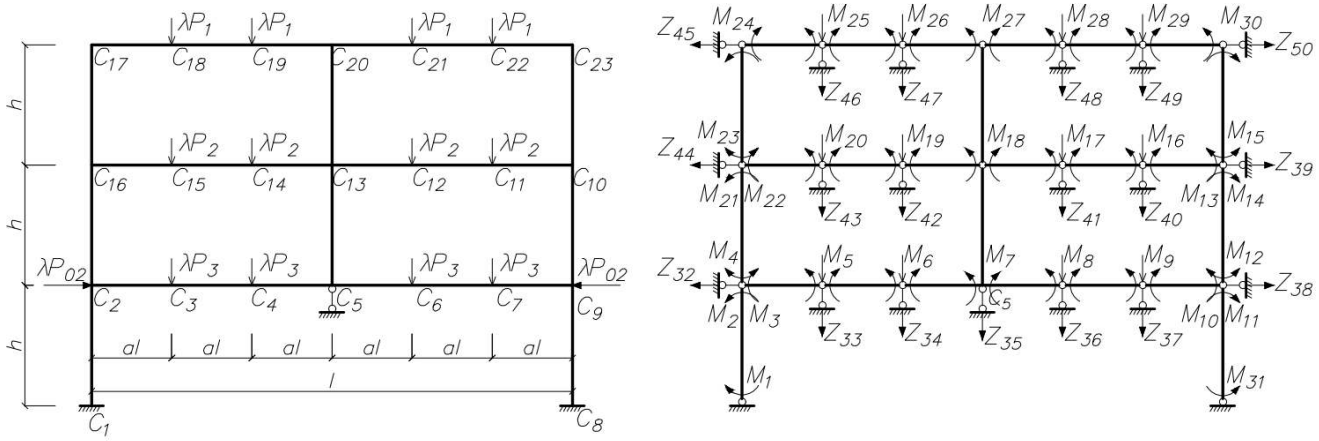

Рисунок 2. Заданная (а) и основанная (б) система смешанного метода для определения параметрической нагрузки (параметра живучести)

Расчет такой конструктивно нелинейной системы проведен с использованием варианта неординарного смешанного метода, разработанного И.Е. Милейковским и В.И. Колчуновым.

Система канонических уравнений смешанного метода для рассматриваемой рамной конструктивной системы (рисунок 1) имеет вид:

$$\left.\begin{array}{l}\sum_{j=1}^{31}\delta_{ij}\cdot M_j+\sum_{j=1}^{31}\delta'_{ij}\cdot Z_j+\sum_{j=1}^{31}\Delta_{ip}+\sum_{j=1}^{31}\delta_{ip}\cdot\lambda=0(j=1,2,\dots,n=31);\\ \sum_{i=7}^{50}r'_{ij}\cdot M_j+\sum_{i=7}^{50}r_{ij}\cdot Z_j+R_{ip}+r_{ip}\cdot\lambda=0,(i=k+1,\dots,k=50).\end{array}\right\}(8)$$

В матричной форме записи уравнения (8) записывается в виде системы:

$$\left.\begin{array}{l}A\cdot\vec{M}+B\cdot\vec{Z}+\overrightarrow{\Delta_p}+\overrightarrow{\delta_p}\cdot\lambda=0;\\ C\cdot\vec{M}+D\cdot\vec{Z}+\overrightarrow{R_p}+\overrightarrow{r_p}\cdot\lambda=0.\end{array}\right\}\quad(9)$$

Значение усилий в выключающихся связях конструктивной системы от суммарного действия заданной и параметрической нагрузок вычисляются по формуле:

$$M_j=M_{jp}+m_{jp}\cdot\lambda\ (j=1,2,\dots,k),\quad(10)$$

где $M_{jp},\ m_{jp}$ – элементы матрицы столбцов $\overrightarrow{M_p}$ и $\overrightarrow{m_p}$.

Выключение моментной или линейной связи после удаления одной из стоек рамы произойдет при достижении предельного значения усилия в этой связи (при текучести арматуры или хрупком разрушении сжатого бетона). Тогда для всех усилий в выключающихся моментных связях должна удовлетворяться система неравенств:

$$\left|M_j\right|=\left|M_{jp}+m_{jp}\cdot\lambda\right|\le M^d_{j,\text{пр}}\ (j=1,2,\dots,k),\quad(11)$$

где $M^d_{j,\text{пр}}$ – предельное значение динамического усилия в выключающейся связи, которое для предварительно напряженного ригеля определяется согласно действующим нормативным документам.

Из решения неравенства (11) находится минимальное значение параметра λ_m, при котором в наиболее нагруженной связи достигается предельное значение. Значение λ_m определяется по формуле:

$$\lambda_m=\min\left(\frac{M^d_{j,\text{пр}}\pm|M_{jp}|}{m_{jp}}\right)\ (j=1,2,\dots,k).\quad(12)$$

Методика расчетного анализа деформирования предварительно напряженных изгибаемых и внецентренно сжатых железобетонных элементов рамной системы помимо анализа кривизн этих элементов и изменения параметра λ, включает критериальный анализ предельных деформаций бетона и арматуры, трещиностойкость и несущую способность приопорных угловых зон по наклонным сечениям в запредельных состояниях с учетом обжатия предварительно напряженной арматурой. В рассматриваемой главе, на основе теории пластичности бетона и железобетона Г.А. Гениева, сформулированы критерии трещиностойкости и критерии прочности характерного плосконапряженного железобетонного элемента при наличии в нем предварительно напряженной арматуры.

В общем виде условие трещиностойкости для характерного предварительно напряженного железобетонного элемента единичных размеров при плоском напряженном состоянии в осях XOY в нормальных и сдвигающих усилиях, с учетом динамических догружений элемента, можно записано в виде (рисунок 3):

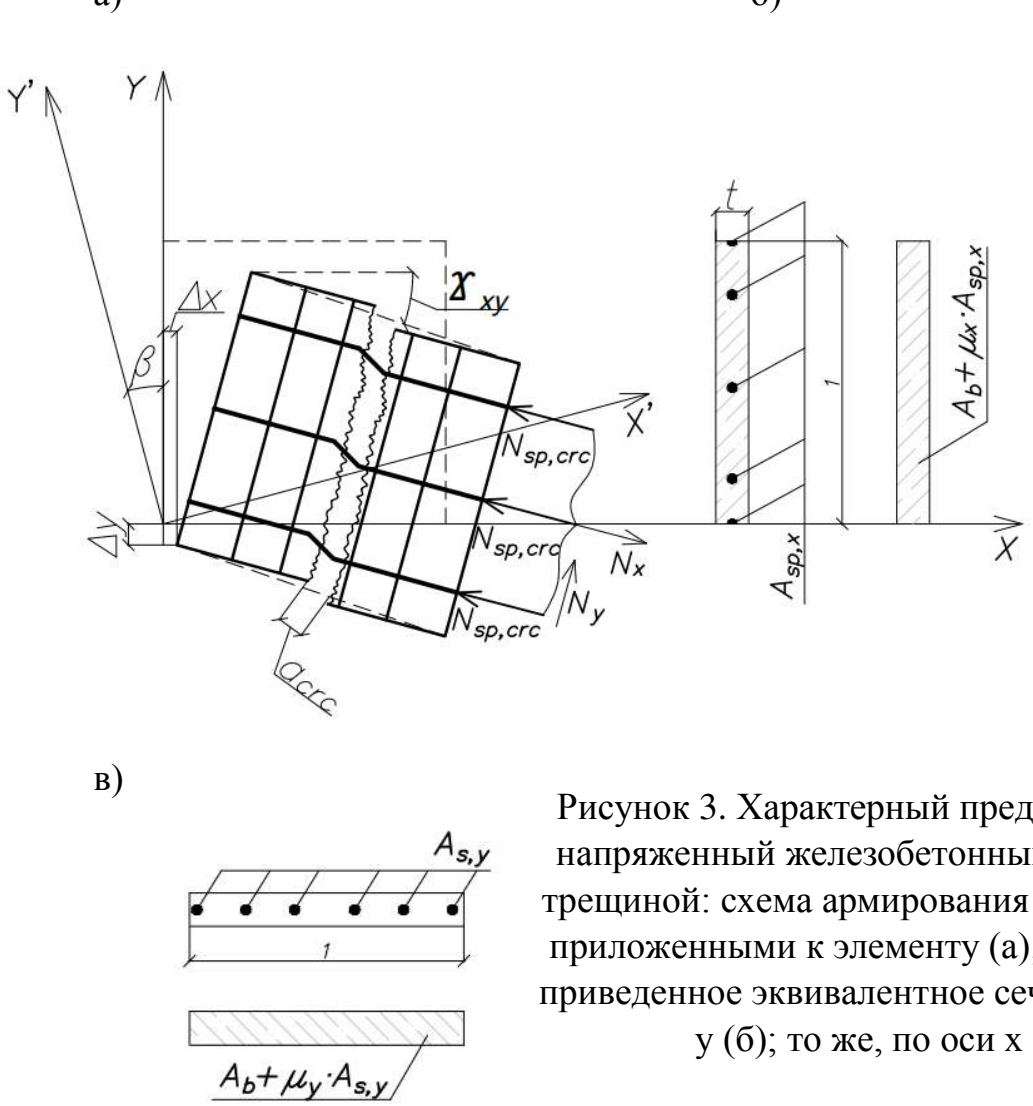

Рисунок 3. Характерный предварительно напряженный железобетонный элемент с трещиной: схема армирования с усилиями, приложенными к элементу (а); заданное и приведенное эквивалентное сечение по оси y (б); то же, по оси x (в)

$$N_x^2 + N_y^2 - (N_x \cdot N_y) + 3N_{xy}^2 - t^2(\varphi_b \cdot R_{b,ser} - \varphi_b \cdot R_{bt,ser})(N_x + N) - \\ -\mu_{x,sp}N_{sp,crc}(2N_x - N_y) - \mu_y N_{sp,crc}(2N_y - N_x) + (\mu_{x,sp}^2 - \mu_{x,sp}\mu_y + \\ +\mu_y^2)N_{sp,crc}{}^2 + t^2(\varphi_b \cdot R_{b,ser} - \varphi_b \cdot R_{bt,ser})(\mu_{x,sp} + \mu_y)N_{sp,crc} - \varphi_b \cdot R_{b,ser} \cdot \\ \cdot \varphi_b \cdot R_{bt,ser} \cdot t^2 = 0, \quad (13)$$

где t - толщина характерного плосконапряженного элемента;

φ_b-коэффициент увеличения динамической прочности бетона, принимаемый в зависимости от средней скорости деформаций бетона и времени динамического догружения элемента.

В общем случае для анализа направлений образования трещин трещиностойкости железобетонного элемента удобно представить в компонентах главных усилий N_1 и N_2. Для этого компоненты усилий N_x, N_y, N_{xy} выражены через главные усилия через N_1 и N_2, используя известные зависимости теории

упругости при повороте осей. В итоге условие трещиностойкости предварительно напряженного элемента (13) записано в виде:

$$N_1^2 - N_1N_2 + N_2^2\left[t^2 \cdot \varphi_b(R_{b,ser} - R_{bt,ser}) + \frac{\mu_x + \mu_y}{2}N_{sp,crc}\right](N_1 + N_2) - \\ -3\frac{\mu_{x,sp} + \mu_y}{2}N_{sp,crc}(N_1 + N_2)\cos\beta + (\mu_{x,sp}^2 - \mu_{x,sp}\mu_y + \mu_y^2)N_{sp,crc}^2 + \\ +t^2 \cdot \varphi_b(R_{b,ser} - R_{bt,ser})(\mu_{x,sp} + \mu_y)N_{sp,crc} - t^2 \cdot \varphi_b \cdot R_{b,ser} \cdot R_{bt,ser} = 0. \quad (14)$$

В рассматриваемой задаче трещиностойкости приопорных и пролетных участков предварительно напряженного ригеля рамы интерес представляют частные случаи этого условия:

А. Одноосное напряженное состояние: $N_2 = 0,\ \beta = 0, \mu_y = 0$

$$N_1^2\left[t^2 \cdot \varphi_b\left(R_{b,ser} - R_{bt,ser}\right) + 2\mu_{x,sp}N_{sp,crc}\right]N_1 + \mu_{x,sp}^2N_{sp,crc}^2 + \\ +t^2 \cdot \varphi_b\left(R_{b,ser} - R_{bt,ser}\right)\mu_{x,sp}N_{sp,crc} - t^2 \cdot \varphi_b \cdot R_{b,ser} \cdot R_{bt,ser} = 0. \quad (15)$$

Б. Двухосное напряженное состояние: $N_1 = N_2,\ \mu_{x,sp} = \mu_y$.

$$\mathrm{N}_1^2 - 2\left(t^2 \cdot \varphi_b(R_{b,ser} - R_{bt,ser}) + \mu_{\mathrm{x}}N_{sp,crc}\right)\mathrm{N}_1 + \mu_{\mathrm{x}}^2N_{sp,crc}^2 + \\ +2t^2 \cdot \varphi_b\left(R_{b,ser} - R_{bt,ser}\right)\mu_{\mathrm{x}}N_{sp,crc} - t^2 \cdot \varphi_b \cdot R_{b,ser} \cdot R_{bt,ser} = 0. \quad (16)$$

Аналогичным образом записано условие динамической прочности для предварительно напряженного железобетонного элемента в следующем виде:

$$N_1^2 - N_1N_2 + N_2^2\left[t^2 \cdot \varphi_b(R_b - R_{bt}) + \varphi_{s\cdot}\frac{\mu_{x,sp} + \mu_y}{2}N_{sp}\right](N_1 + N_2) - \\ -3\varphi_{s\cdot}\frac{\mu_{x,sp} + \mu_y}{2}N_{sp}(N_1 + N_2)\cos\beta + \varphi_{s\cdot} \cdot (\mu_{x,sp}^2 - \mu_x\mu_y + \mu_y^2)N_{sp}^2 + \\ +t^2 \cdot \varphi_{s\cdot} \cdot \varphi_b(R_b - R_{bt})(\mu_{x,sp} + \mu_y)N_{sp} - t^2 \cdot \varphi_b \cdot R_b \cdot R_{bt} = 0, \quad (17)$$

где $\varphi_{s\cdot}$ - коэффициент увеличения динамической прочности арматуры, принимаемый в зависимости от средней скорости деформаций арматуры и времени динамического догружения.

Аналогично, как и для условия трещиностойкости, в работе рассмотрены частные случаи условия прочности характерного предварительно напряженного железобетонного элемента.

Результаты проведенных вычислений критерия динамической трещиностойкости и критерия динамической прочности характерного предварительно напряженного железобетонного элемента на приопорном участке ригеля показаны на рисунке 4.

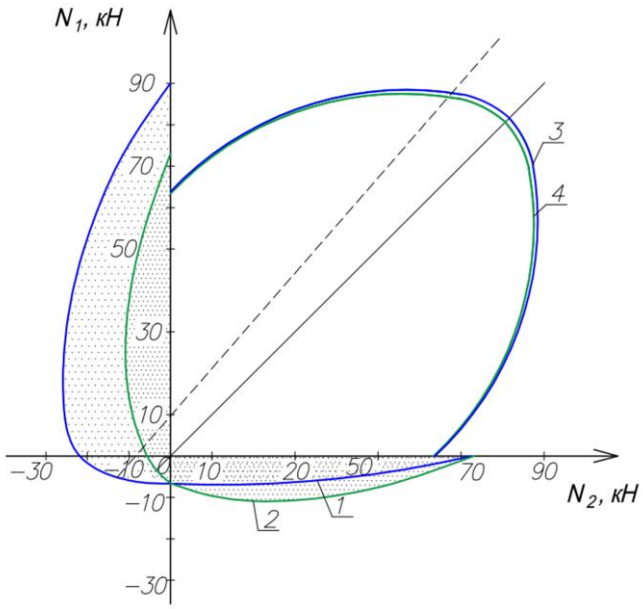

Рисунок 4. График динамического критерия трещиностойкости и критерия динамической прочности предварительно напряженного в одном направлении (1, 3) и ненапряженного (2, 4) характерного железобетонного элемента при плоском напряженном состоянии

Из рисунка видно, что в отличие от критерия трещиностойкости ненапряженного элемента, главные оси эллипса не проходят через начало координат. Разрывы эллипса связаны с тем, что при вычислении критерия динамической трещиностойкости в областях «растяжение-сжатие» и «растяжение-растяжение» (кривые 1,2) - заштрихованные участки, использованы нормативные характеристики железобетона (II группа предельных состояний), а при вычислении динамического критерия прочности обычного и предварительно напряженного железобетона в области «сжатие-сжатие» (кривые 3,4) использованы расчетные характеристики бетона и арматуры.

В обоих случаях динамическая прочность бетона и арматуры учтена с помощью коэффициентов динамической прочности φ_b и φ_s. При этом время динамического догружения элемента было принято по данным экспериментальных исследований опытных конструкций рам.

При анализе параметра живучести λ величина начального контролируемого усилия в предварительно напряженной арматуре должна быть ограничена. Для этого определено динамическое усилие в предварительно напряженной арматуре в железобетоне, как в двухкомпонентном материале, в момент образования трещин (рисунок 5):

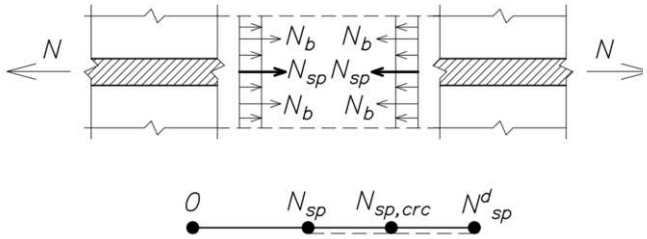

Рисунок 5. Схема статических и динамических усилий в предварительно напряженном железобетонном элементе в момент хрупкого разрушения бетона

$$N_{sp}^{d} = N_{sp} + 2N_{b}. \quad (18)$$

Исходя из зависимости (18), полное усилие в выделенном элементе, воспринимаемое бетоном N_b и предварительно напряженной арматурой N_{sp}, в момент перед образованием трещин определяется как:

$$N = N_{sp,crc} = N_{sp} + N_b. \quad (19)$$

Предельно допустимое усилие в арматуре при коэффициенте надежности II группы γ_s=1: $[N_{sp}] = R_{s,ser} \cdot \gamma_s \cdot A_{sp}$.

В третьей главе работы приведена программа, методика и результаты экспериментальных исследований живучести монолитных железобетонных рам с предварительно напряженными ригелями при особом воздействии. Испытано две серии рам: РЖ-1 – рама с внезапно выключающейся центральной стойкой; РЖ-2 - рама с внезапно выключающейся крайней стойкой (Рисунок 6).

До начала испытаний был проведен деформационный расчет опытных конструкций рам в предельном и запредельном состояниях. Расчет проводился по первичной и вторичной расчетным схемам разных уровней. Расчет по первичной расчетной схеме был выполнен на заданную статическую нагрузку от двух сосредоточенных сил в каждом пролете ригеля. Расчет по вторичной расчетной схеме был выполнен для нагруженной на первом этапе статической нагрузкой рамы и особое воздействие в виде внезапного удаления центральной и крайней стойки.

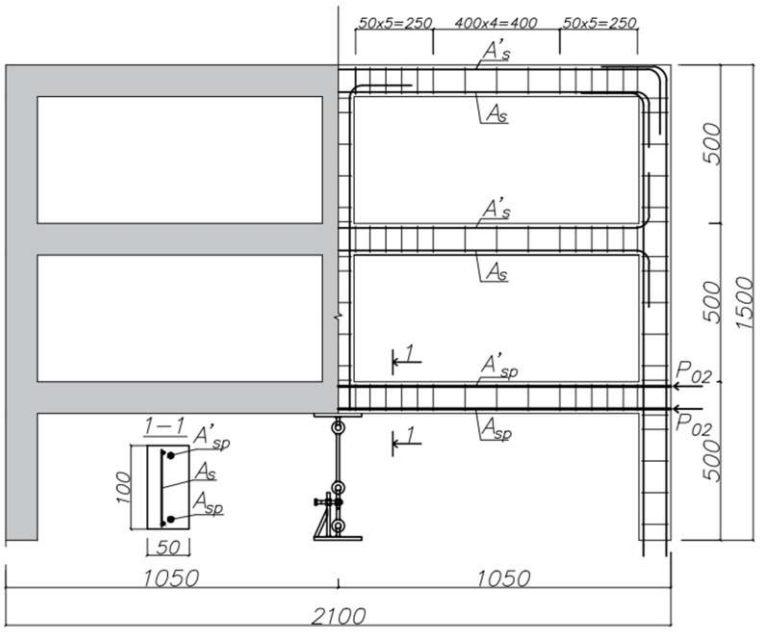

Рисунок 6. Схема опалубки (а) и армирования(б) конструкции рамы первой серии

Опытные конструкции были запроектированы и изготовлены в виде двухпролетных предварительно напряженных железобетонных рам из бетона класса В40. Сечения ригелей и колонн рам приняты 50х100 мм. Ригели рам второго и третьего этажей были армированы в верхней и нижней зонах по высоте сечения рабочей арматурой в виде одного стержня диаметром 8мм класса А500. Ригель над первым этажом рамы, с целью ее защиты от прогрессирующего обрушения, был выполнен предварительно напряженным. Предварительно напряженная арматура устанавливалась в верхней и нижней зонах из стержня диаметром 8 мм класса А600. Поперечная арматура ригелей принята из проволоки диаметром 2мм, шагом 50мм и 100мм. Такое армирование назначено по результатам расчета опытных конструкций рам на проектную испытательную нагрузку в виде сосредоточенных сил P_i, приложенных попарно к каждому ригелю симметрично на расстоянии 300мм от колонн и запроектное воздействие в виде внезапного удаления центральной стойки для рамы РЖ-1 и крайней стойки для рамы РЖ-2.

Испытания конструкций проводились на специально разработанном стенде, включающем силовую раму из металлоконструкций и рычажно-механическую систему нагрузочных устройств в виде тяжей и швеллеров для передачи нагрузки на опытную конструкцию рамы. Для нагружения испытываемых конструкций использовалась механическая рычажная установка, состоящая из рычага и распределительной балки, передающей нагрузку на раму от платформы со штучными грузами. Нагрузку прикладывали поэтапно ступенями по 0,1 от

контрольной нагрузки. При этом до появления трещин конструкцию на каждой ступени нагружения выдерживали под нагрузкой на каждом этапе не менее 10 минут.

В процессе испытаний в опытных конструкциях рам измерялись: нагрузка трещинообразования и нагрузка исчерпания несущей способности, прогибы ригелей рам, деформации бетона и арматуры, ширина раскрытия и развития трещин на всех уровнях нагружения, время динамического догружения элементов рамы.

Анализ полученных в ходе экспериментального исследования монолитных железобетонных рам с предварительно напряженными ригелями данных показал, что характер деформирования, трещинообразования и разрушения конструкций имел ряд особенностей.

Опытные диаграммы деформирования бетона сжатой зоны приопорного сечения ригеля над первым этажом рамы первой серии (РЖ-1) и центрального сечения ригеля над первым этажом рамы второй серии (РЖ-2) на первом этапе нагружения носили характер близкий к билинейному. Максимальное значение деформаций бетона до момента трещинообразования в раме первой серии составил $1{,}46 \cdot 10^{-4}$, в раме второй серии $1{,}66 \cdot 10^{-4}$. На втором участке деформирования после приложения максимальной проектной нагрузки опытные значения деформирования бетона составили $5{,}2 \cdot 10^{-4}$ и $5{,}6 \cdot 10^{-4}$ для рамы серии РЖ-1 и РЖ-2 соответственно.

На втором этапе испытаний, при динамическом догружении после удаления крайней или средней несущей стойки, в рамах обеих серий разрушение, в отличие от ненапряженных рам, испытанных в работе Ву Нгок Туена, не произошло. Деформации, возникающие в сжатом бетоне и арматуре, существенно не превысили предельно допустимые деформации, установленные критериями особого предельного состояния.

Анализируя полученный в конструкциях рам характер образования, раскрытия и развития трещин можно отметить следующее.

На первом этапе нагружения в предварительно напряженной конструкции рам РЖ-1, при нагружении суммарной проектной нагрузкой, первые трещины были обнаружены в приопорных зонах ригеля первого этажа у крайних колонн при суммарной нагрузке $\sum P_i = 28{,}1$кН. Соответственно, моменты образования этих трещин составили 0,59 и 0,66 кНм. По мере увеличения нагрузки до уровня $\sum P_i = 42{,}0$кН появились новые трещины в приопорном сечении ригелей над первым этажом и над вторым этажом у крайних колонн. На рассматриваемом этапе нагружения проектной нагрузкой образовались нормальные трещины в средней части пролета ригелей рамы.

После запроектного воздействия, вызванного внезапным удалением центральной стойки, в раме РЖ-1 из-за структурной перестройки конструктивной системы произошло раскрытие ранее образовавшихся трещин от динамического догружения элементов конструктивной системы и образование новых трещин в приопорных сечениях ригеля третьего этажа рамы. Кроме того, образовались нормальные трещины в ригелях всех этажей опытной конструкции. Наибольшая ширина раскрытия трещин после приложения особого воздействия достигла в приопорных сечениях и составила 2,00 мм и 2,09 мм. Тем не менее значительных

разрушений в опытной конструкции рамы не произошло (рисунок 7 и рисунок 9).

В предварительно напряженных конструкциях рам серии РЖ-2 на первом этапе испытаний при нагружении суммарной проектной нагрузкой первые трещины были обнаружены в приопорных зонах ригелей второго этажа у центральной колонны при аналогичной суммарной нагрузке, как и в раме РЖ-1, равной $\sum P_i$=28,1кН (рисунок 8). Соответственно момент образования этих трещин составил 0,59 кНм. По мере увеличения нагрузки до уровня $\sum P_i$=42,0кН появились новые трещины в приопорном сечении ригелей над первым этажом у крайних колонн. На этапе нагружения проектной нагрузкой перед внезапным выключением крайней колонны нормальные трещины в пролетах ригелей рамы не образовались.

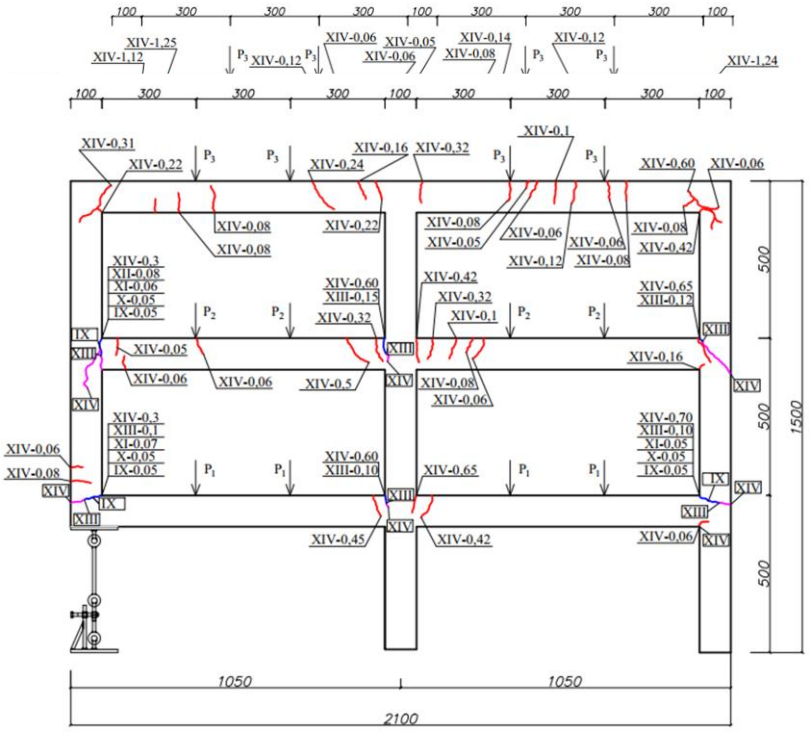

Рисунок 8. Схема образования и ширина раскрытия трещин всех типов в конструкции рамы РЖ-2 после приложения особой нагрузки

После запроектного воздействия от внезапного удаления левой стойки, в раме РЖ-2 из-за структурной перестройки конструктивной системы произошло дополнительное раскрытие ранее образовавшихся трещин. Образовывались также новые трещины в приопорных сечениях ригеля третьего этажа рамы, а также нормальные трещины в ригелях всех этажей опытной конструкции. Наибольшая ширина раскрытия трещин после приложения особого воздействия составила 0,70 мм и 0,65 мм в приопорном сечении центральной и правой колонны. При этом видимых разрушений опытная конструкция рамы не получила (см. рисунок 9).

Экспериментальные данные о перемещениях получены обработкой прогибомеров, установленных на опытных образцах рам для анализа и оценки деформационного критерия особого предельного состояния, ограничивающего предельно допустимый относительный прогиб.

Анализируя эти данные, можно отметить, что по этому критерию особого предельного состояния в обеих рамах не произошло исчерпание несущей способности. Максимальный прогиб в раме РЖ-1 составил 1/68 от длины пролета, в раме РЖ-2 1/55 от длины пролета. Это не превышает критерий особого предельного состояния, установленный СП 385.1325800.2018.

а) б)

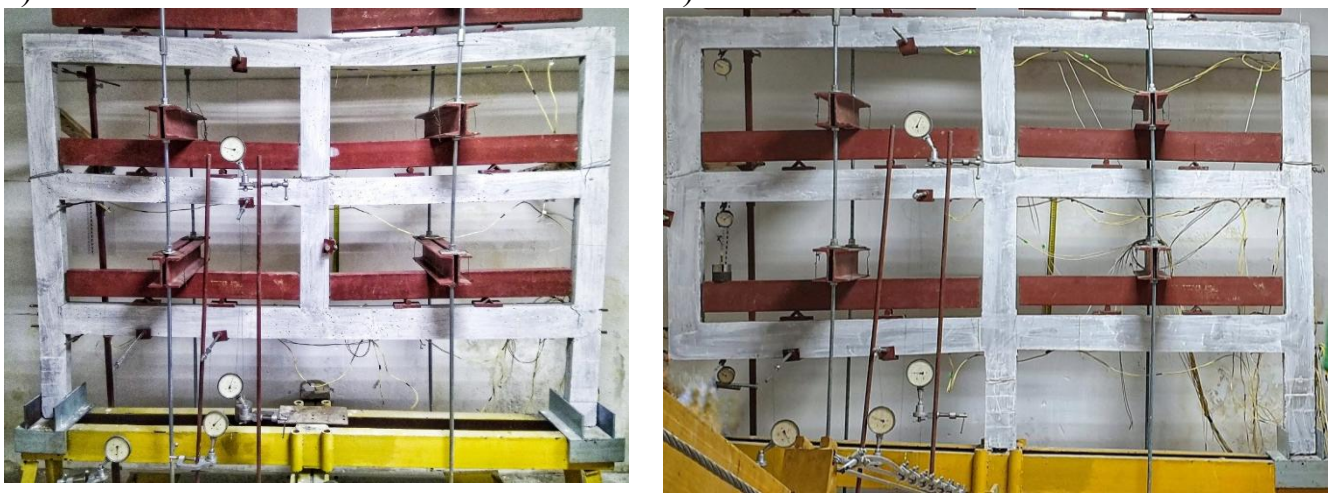

Рисунок 9. Общий вид разрушения опытных конструкций рам: а) первой серии (РЖ-1), б) второй серии (РЖ-2)

В четвертой главе диссертации приведены результаты численного анализа деформирования и разрушения рассматриваемых конструктивных систем каркасов многоэтажных зданий при мгновенном удалении из работы отдельных колонн. Расчетный анализ выполнен с использованием уровневых первичных и вторичных расчетных схем в квазистатической постановке. В частности, рассмотрен 17-ти этажный железобетонный монолитный каркас здания прямоугольной в плане формы с габаритными размерами 18,0×30,0х51,0м и высотой этажа 3,0 м. Колонны здания выполнены сечением 500х500мм и армированные продольной рабочей арматурой класса А500, диметром 32 мм. Шаг колонн в продольном и поперечном направлениях принят 6,0 м. Перекрытия и покрытие - монолитные железобетонные ребристые плиты, опирающиеся по контуру на монолитные железобетонные ригели. Толщина плит перекрытия принята 100мм. Сечения ригелей 500х250мм. Конструктивные элементы перекрытия каркаса здания армированы продольной рабочей арматурой класса А500. В запас несущей способности в расчетную схему каркаса не включены элементы, которые не являются несущими при нормальной эксплуатации. При расчете на прогрессирующее обрушение были рассмотрены два варианта удаления несущих элементов каркаса здания: удаление угловой колонны на первом этаже и удаление средней колонны на первом этаже. Ригели над первым этажом здания в продольном и поперечном направлении выполнены предварительно напряженными в верхней и нижней зонах их сечения.

Решение задачи приведено с использованием программного комплекса ЛИРА-САПР. При расчете на прогрессирующее обрушение приняты следующие нагрузки: постоянные нагрузки от собственного веса конструкций и временная длительная нагрузка 5 Кн/м^2. Для учета предварительного напряжения к каждому арматурному стержню прикладывалась продольная сжимающая сила, равная силе обжатия 260 кН. При этом коэффициент надежности по нагрузке и коэффициент надежности по ответственности приняты равными единице.

Расчет по вторичной расчетной схеме выполнен на суммарное действие испытательной нагрузки и особого воздействия, вызванного удалением угловой колонны каркаса здания. Удаление колонны в расчетной схеме моделировалось

приложением с обратным знаком реакции в этой колонне, определенной расчетом по первичной расчетной схеме (N=3770 кН).

В результате расчета максимальный прогиб в конструкции ригеля над удаляемой колонной в момент ее удаления составил 29,9 мм, относительный прогиб составил f/l= 1/200, что не превышает предельный прогиб, установленный СП 385.13255800.2018 при особом предельном состоянии.

По результатам расчета сделан вывод о том, что после запроектного воздействия, вызванного удалением угловой колонны первого этажа каркаса здания с предварительно напряженными ригелями над первым этажом, исчерпание несущей способности в зоне возможного локального разрушения каркаса здания не произошло. При этом произошло разрушение вышележащей колонны каркаса здания.

С целью проверки эффективности установки предварительно напряженной арматуры в ригелях первого этажа многоэтажного каркаса здания для его защиты от прогрессирующего обрушения был произведен расчет аналогичного каркаса здания, но с ненапряженной арматурой в ригелях всех этажей.

После запроектного воздействия, вызванного внезапным удалением угловой колонны, в каркасе с ригелями без предварительного произошло разрушение колонн на четырех этажах здания над удаляемой колонной, а также разрушение примыкающих к колонне ригелей и соседних колонн на трех этажах здания (рисунок 10,а). В раме с предварительно напряженными ригелями над первым этажом здания разрушилась только одна колонна над удаляемой конструкцией (рисунок 10,б). Эти результаты подтверждаются и сопоставлением опытных данных автора и испытаний аналогичных ненапряженных рам.(рисунок 11).

а) б)

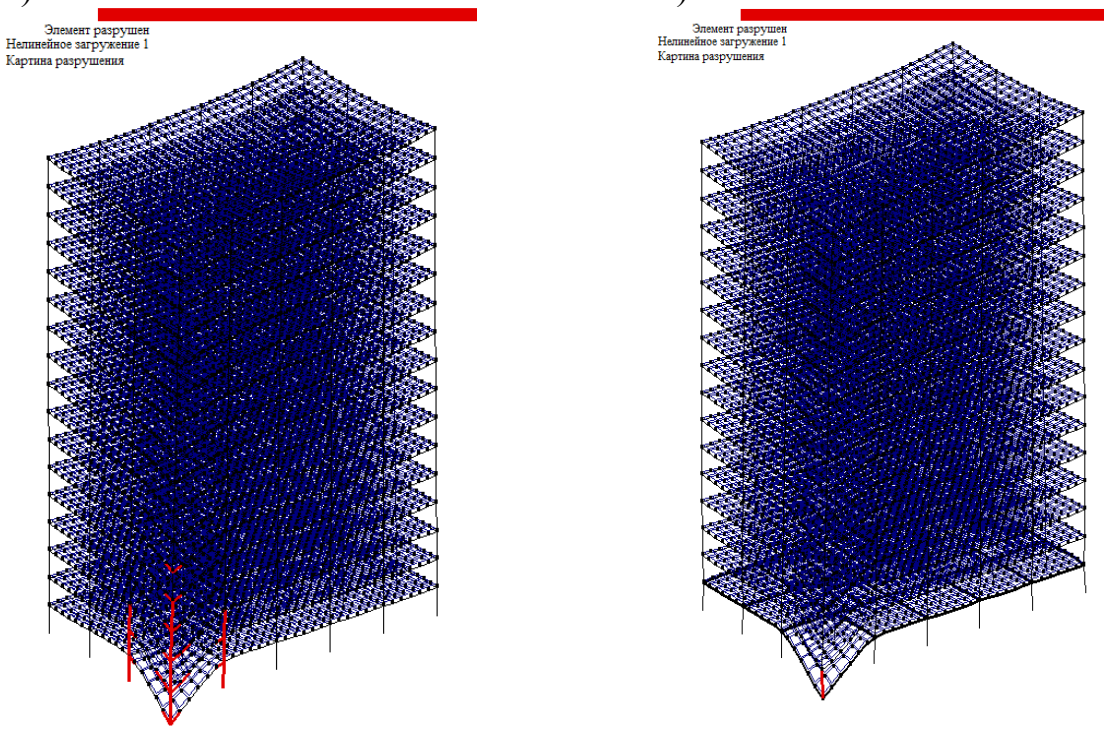

Рисунок 10. Картина разрушений в многоэтажном каркасе здания после удаления угловой колонны с ненапряженными ригелями над первым этажом (а) и с предварительно напряженными ригелями над первым этажом (б)

а) б)

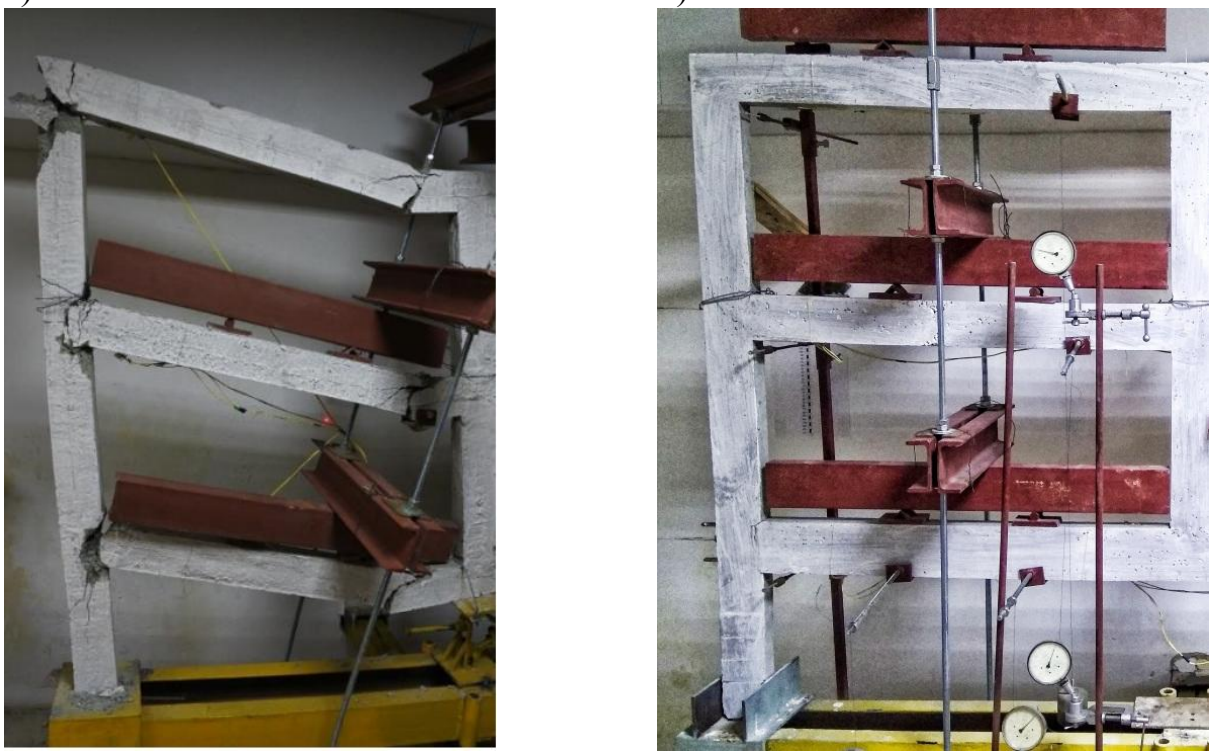

Рисунок 11. Картина разрушений в опытной железобетонной рамно-стержневой конструктивной системе после удаления центральной стойки без предварительно напряжения ригеля над первым этажом (а) и с предварительно напряженным ригелем над первым этажом (б)

Из сопоставления полученных картин разрушения одинаковых по армированию и испытанных по одинаковым схемам рам можно видеть, что предварительное напряжение ригелей рамы над первым этажом обеспечивает ее защиту при рассматриваемом особом воздействии.

В этой же главе представлены результаты аналитического анализа коэффициента динамических догружений в стержневой системе из двухкомпонентного материала – железобетона при наличии предварительного напряжения в элементах конструктивной системы. Показана необходимость учета этого коэффициента при проектировании защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения.

Также в четвертой главе разработаны рекомендации по защите монолитных железобетонных конструкций каркасов многоэтажных зданий от прогрессирующего обрушения при особых аварийных воздействиях с использованием предварительного напряжения ригелей, приоритет которых защищен патентами РФ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенными экспериментально-теоретическими исследованиями деформирования, трещинообразования и разрушения монолитных предварительно напряженных железобетонных конструкций каркасов многоэтажных зданий при особых воздействиях в виде внезапного удаления

одного из несущих элементов получены следующие новые научные и практические результаты.

1. Критическим анализом научных публикаций отечественных и зарубежных теоретических и экспериментальных исследований в области сопротивления железобетонных конструкций и конструктивных систем при особых и аварийных воздействиях в настоящее время изучен значительный диапазон видов ситуационных воздействий на здания и сооружения и предложены различные способы их защиты от прогрессирующего обрушения. Предложенная в различных странах новая терминология, варианты классификации аварийных воздействий, направления теоретических и экспериментальных исследований, общие положения к конструктивным требованиям, направленными на защиту объектов строительства, являются по содержанию принципиально схожими. В то же время, учитывая новизну рассматриваемой проблемы, многие ее направления остаются малоизученными, особенно в области экспериментального обоснования решаемых новых задач.

2. Сформулированы исходные предпосылки, позволяющие обобщить существующие расчетные модели для анализа живучести конструктивных систем, и связанные с ними положения деформационной теории пластичности железобетона на конструкции из предварительно напряженного железобетона на стадии их деформирования в запредельных состояниях. При этом деформационные соотношения для предельных напряжений (деформаций) в двухкомпонентном материале - железобетоне записаны через предельные напряжения в бетоне и эквивалентные напряжения в арматуре. Получены критерий динамической прочности и критерий трещиностойкости для характерного плосконапряженного железобетонного элемента с предварительно напряженной арматурой в одном из направлений на область существования усилий: «растяжение-растяжение» и «сжатие-растяжение». В общем виде условие трещиностойкости и условие прочности предварительно напряженного железобетонного плосконапряженного элемента представлены в виде плоской фигуры в координатах главных напряжений.

3. Приведены деформационные зависимости для определения параметров диаграмм статико-динамического деформирования элементов предварительно напряженных железобетонных рамно-стержневых конструктивных систем при их структурной перестройке, вызванной удалением одного из несущих элементов. Решение задачи выполнено диаграммным методом, с использованием двух и трёхлинейных диаграмм деформирования «момент-кривизна».

4. Из анализа расчетных и опытных диаграмм деформирования сделан вывод о том, что предложенные аналитические зависимости для расчета кривизн предварительно напряженных железобетонных элементов рамно-стержневых конструкций удовлетворительно согласуются с опытными диаграммами «момент-кривизна», полученными при рассматриваемом статико-динамическом режиме нагружения таких конструкций. При этом значения кривизн в запредельном состоянии рекомендовано использовать как один из критериев особого предельного состояния исследуемых конструкций. Установка симметричной по высоте сечения предварительно напряженной арматуры в ригелях

железобетонных многоэтажных рам оказывает значительное влияние на параметры диаграммы «момент-кривизна», их статико-динамического деформирования при рассматриваемом режиме нагружения и, как следствие, на живучесть конструктивной системы.

5. Получены результаты сравнительного анализа расчетных и опытных данных трещиностойкости и прочности для приопорной зоны предварительно напряженного ригеля опытных конструкций монолитных железобетонных рам, испытанных на заданную проектную нагрузку и особое воздействие динамического характера. Вычисленные по принятым динамическим критериям трещиностойкости направления главных растягивающих напряжений и, соответственно, главные деформации для рассматриваемого характерного элемента ригеля рамы удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными образования трещин в таких конструкциях.

6. Решена практически важная задача о назначении предельной величины начального контролируемого напряжения, которое исключает разрыв арматуры при перераспределении силовых потоков от внезапного удаления в конструктивной системе одной из конструкций.

7. Проведены экспериментальные исследования деформирования, трещинообразования и разрушения двух серий железобетонных монолитных рам с предварительно напряженными ригелями в условиях рассматриваемых режимов аварийных воздействий. В ходе экспериментальных исследований были получены следующие новые результаты:

- определены опытные параметры трещиностойкости, развития и раскрытия трещин, перемещений и деформаций при проектном и особом аварийном воздействии, вызванном внезапным удалением одной из несущих колонн;
- выявлено, что при внезапном изменении силовых потоков в конструкциях рам предварительное напряжение повышает предельную деформативность бетона наиболее напряженных зонах конструктивной системы и изменяет ее демпфирующие свойства;
- установлено, что наличие предварительного напряжения в ригелях первого этажа над удаляемой конструкцией стойки, значительно влияет на перераспределение силовых потоков в раме после особого динамического воздействия и на ее общую жесткость, трещинообразование и критерии разрушения при таких воздействиях.

8. Разработан алгоритм деформационного расчета предварительно напряженных монолитных железобетонных рамно-стержневых конструкций, нагружаемых статической внешней нагрузкой и догружаемых динамическим воздействием. С использованием этого алгоритма приведены многовариантные численные исследования напряженно деформированного состояния в элементах конструктивных систем с учетом специфики их трещинообразования и разрушения.

9. Разработаны рекомендации по защите монолитных железобетонных конструкций каркасов многоэтажных зданий от прогрессирующего обрушения при особых аварийных воздействиях с использованием предварительного напряжения ригелей, приоритет которых защищен патентами РФ.

Перспективы дальнейшей разработки темы видятся в решении теоретических задач по установлению особенностей деформирования узловых зон рамных конструкций с предварительно напряженными элементами сплошного и составного сечения, изучении изменения параметров живучести в зависимости от уровня начального напряжения.

Публикации по теме диссертации

Публикации в изданиях, индексируемых Scopus

1. Fedorova N. V., **Iliushchenko T. A**. Influence of pre-stressing over parameters of diagram of static-dynamic deformation of RC elements //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2019. – Т. 687. – №. 3. – P. 033033.
2. Kolchunov, V.I., Fedorova, N.V., Savin, S.Yu., Kovalev, V.V., **Iliushchenko, T.A**. Failure simulation of a RC multi-storey building frame with prestressed girders. Magazine of Civil Engineering. 2019. 92(8). Pp. 155–162. DOI: 10.18720/MCE.92.13.
3. Kolchunov V.I., **Iliushchenko, T.A**. Crack resistance criterion of plane stress RC elements with prestressed reinforcement // Journal of Physics: Conf. Series, 2020. Vol. 1425. P. 012095.
4. Fedorova N. V., Vu N. T., **Iliushchenko T. A**. Dynamic additional loading of the frame of a multi-story building after the failure of one of the structures //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2020. – Т. 896. – №. 1. – P. 012040.

Публикации в издания, входящих в перечень ВАК

5. Федорова Н.В., **Халина Т.А. (Ильющенко Т.А.)** Исследование динамических догружений в железобетонных конструктивных системах при внезапных структурных перестройках // Промышленное и гражданское строительство. 2017. №5. С. 32-36.
6. Федорова Н.В., **Ильющенко Т.А.**, Медянкин М.Д., Инсафутдинов А.Р. Особенности динамических догружений железобетонных элементов конструктивных систем при гипотетическом удалении одной из несущих конструкций и трещинообразования // Строительство и реконструкция. 2019. №2. С. 72-80.
7. **Ильющенко Т.А.**, Колчунов В.И., Федоров С.С. Трещиностойкость преднапряженных железобетонных рамно-стержневых конструкций при особых воздействиях // Строительство и реконструкция. – 2021. - № 1(93). – С. 74-84.
8. **Ильющенко Т.А.**, Федорова Н.В. Критерий динамической прочности предварительно напряженных железобетонных конструкций при сложном сопротивлении // Строительство и реконструкция. – 2021. - № 5(97). – С. 51-61.

Патенты

9. Колчунов В.И., Алькади С.А., **Халина Т.А. (Ильющенко Т.А.).** Способ определения параметров динамического догружения в растянутых железобетонных элементах конструктивных систем // Патент № 2672771 от 19.11.2018.
10. **Ильющенко Т.А**, Ву Нгок Туен, Фан Динь Гуок. Сборно-монолитный железобетонный каркас многоэтажного здания // Патент № 2755669 от 20.09.2021.

Подписано в печать .....20__ г.
Формат 60х90/16 Гарнитура Times New Roman. Объем 1,0 усл. п.л.
Тираж 100 экз.
Заказ № _____
Отпечатано с готового оригинал-макета …….