На правах рукописи

Фан Динь Гуок

СТАТИКО-ДИНАМИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКТИВНЫХ СИСТЕМ С КОСВЕННЫМ АРМИРОВАНИЕМ ПРИ ОСОБЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2022 г.

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет».

Научный руководитель: **Федорова Наталия Витальевна**
доктор технических наук, профессор.

Официальные оппоненты: **Крылов Сергей Борисович**
Член-корреспондент РААСН, доктор техгических наук, заведующий лабораторией механики железобетона НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство».
Мурашкин Василий Геннадьевич
кандидат технических наук, доцент, заместитель директора ООО «РИЭЛТСТРОЙ».

Ведущая организация: Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений (АО ЦНИИПромзданий).

Защита диссертации состоится «10» декабря 2022 г. в 12.00 часов на заседании объединённого 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 «___»_____2022 г.

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

Колесников
Александр Георгиевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В последние годы во всем мире участились воздействия природного, техногенного и даже террористического характера. Такие особые воздействия на здания и сооружения до недавнего времени не учитывались нормами проектирования. Тем не менее, эти воздействия не редко приводили к повреждениям несущих конструкций, иногда вызывали и обрушение отдельных частей, а в некоторых случаях и всего сооружения. Поэтому во многих странах мира, в том числе и в России, для повышения механической безопасности зданий и сооружений, сохранения жизни и здоровья, находящихся в них людей разработаны и введены в практику проектирования нормативные документы нового поколения по защите зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения при таких воздействиях.

В научных публикациях рассматривались и решены отдельные задачи, связанные с этой проблемой, изучены ряд новых особенностей напряженно деформированного состояния конструкций зданий и сооружений при таких воздействиях, вызывающих в конструкциях запредельные состояния. Рассматривались и конструктивные системы железобетонных каркасов многоэтажных зданий из обычных и предварительно напряженных конструкций. Изучение деформирования, разрушения и живучести железобетонных рам и рамно-стержневых каркасов зданий с элементами косвенного армирования при обозначенных особых воздействиях не проводилось.

Степень разработанности темы диссертации. Задачи живучести сооружений в предельных и запредельных состояниях и методы–защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения составляют новое направление в исследованиях строительных конструкций и решении общей проблемы их механической безопасности. Решением задач этого направления одними из первых в мире еще в 90-е годы прошлого столетия начали заниматься российские 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, А.Р. Туснин Г.И. Шапиро, В.С. Федоров, Н.В. Федорова и др. Среди зарубежных исследований можно отметить работы H.M. Elsanadedy, X. Lu, P. Ren, M. Tsai, J. Yu, J.L. Gross, W. McGuire и др. На основе исследований этих и других авторов был получен ряд новых научных результатов в отношении безопасности зданий и сооружений, в том числе и в случае особого или аварийного воздействия. Однако эти результаты позволяют решить только отдельные задачи механической безопасности и живучести конструктивных систем зданий и сооружений. Исследование статического и динамического деформирования железобетонного каркаса, армированного одновременно обычной и косвенной арматурой, под действием аварийной нагрузки не проводилось.

Цель диссертационной работы. Целью настоящей работы является исследование деформирования и разрушения железобетонных элементов конструктивных систем с косвенным армированием в запредельных состояниях, вызванных особыми воздействиями, и развитие элементов теории живучести таких конструктивных систем.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- обзор и анализ современного состояния исследований по проблеме живучести и механической безопасности железобетонных рамно-стержневых конструктивных систем зданий и сооружений;
- обзор и анализ современного состояния исследований деформирования косвенно армированных железобетонных конструкций;
- разработка методики расчета косвенно армированных железобетонных элементов при их статико-динамическом деформировании;
- разработка методики и выполнение экспериментальных исследований по оценке несущей способности и деформативности косвенно армированных железобетонных элементов конструктивных систем, находящихся в запредельных состояниях, вызванных особым воздействием – внезапным удалением из системы одной из конструкций;
- разработка алгоритма и выпонение численного анализа живучести железобетонных косвенно армированных рамно-стержневых конструктивных систем при внезапном выключении из работы одного из элементов;
- оценка эффективности и достоверности предложенных методики и алгоритма расчета и разработка рекомендаций по защите от прогрессирующего обрушения железобетонных конструктивных систем многоэтажных зданий.

Научная гипотеза. Пологается, что введение косвенного армирования в наиболее напряженные зоны изгибаемых элементов железобетонных каркасов зданий с изменяющимися силовыми потокоми существенно влияет на деформативные, прочностные и диссипативные характеристики сечений этих элементов в запредельных состояниях.

Научная новизна работы состоит в:

- разработке методики и получении новых экспериментальных данных по определению параметров живучести фрагментов монолитного железобетонного каркаса с косвенным армированием;
- построении аналитических зависимостей для определения параметров живучести железобетонных монолитных рамно-стержневых конструктивных систем с косвенным армированием при внезапном выключении одного из несущих элементов;
- разработке алгоритма и проведении численных исследований параметров живучести железобетонных монолитных рамно-стержневых конструктивных систем с косвенным армированием.

Объект исследования. Объектом исследования являются железобетонные элементы в составе монолитных конструкций, армированные одновременно обычной и косвенной арматурой в условиях особого воздействия.

Предмет исследования. Предметом исследования являются параметры статико - динамического деформирования сечений конструктивных систем с косвенным армированием в предельных и запредельных состояниях.

Теоретическая значимость результатов работы. Предложенные и подтвержденные экспериментально аналитические зависимости для определения параметров живучести железобетонных монолитных рамно-стержневых конструктивных систем с косвенным армированием при внезапном выключении

одного из несущих элементов позволяют установить особенности режимного статико-динамического деформирования, трещинообразования и разрушения таких физически и конструктивно нелинейных систем в запредельных состояниях при внезапном изменении их напряженно-деформируемого состояния.

Практическая значимость и реализация результатов работы. Предложенная методика и алгоритм расчета железобетонных рамных систем с косвенным аритрованием на живучесть может быть использована при разработке методов защиты таких конструкций от прогрессирующего обрушения.

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:

- результаты анализа современного состояния исследований по проблеме живучести и безопасности железобетонных рамно-стержневых конструктивных систем зданий и сооружений;
- построенные криволинейные и линеаризованные диаграммы деформирования косвенно армированного бетона;
- методика и алгоритм расчета деформирования, разрушения и параметр живучести железобетонных рам с косвенным армированием при внезапном удалении в них одного из элементов, с учетом трещинообразования и нелинейной работы материала;
- методика и результаты экспериментальных исследований параметров деформирования и разрушения железобетонных рам с косвенным армированием после внезапного удаления одного из вертикальных элементов;
- результаты численного статико-динамического анализа деформирования и разрушения конструкций железобетонных рам с косвенным армированием элементов после внезапного удаления одной из конструкций, а также рекомендации по защите железобетонных конструкций рассматриваемого типа от прогрессирующего обрушения.

Личный вклад автора в научные результаты, полученные в данной работе, включает выбор тематики и методов исследования, сбор и анализ ранее проведенных исследований по рассматриваему направлению, разработка программы проведения экспериментальных испытаний, обработка и анализ результатов исследований, разработка расчетных моделей и методики расчета параметров деформирования и живучести монолитных железобетонных рам с косвенным армированием при особом аварийном воздействии.

Обоснованность и достоверность научных положений базируется на использовании общепринятых допущений строительной механики и теории железобетона, с экспериментальной проверкой отдельных гипотез на железобетонных фрагментах рамно-стержневых конструкций и сопоставлением полученных данных с результатами теоретических и экспериментальных исследований автора, других ученых.

Апробация результатов. Результаты исследований докладывались и получили поддержку на научно-технических мероприятиях, среди которых: семинар молодых ученых в рамках XXIII Международной научной конференции «Строительство - формирование среды жизнедеятельности» (Вьетнам, г. Ханой, 23–26 сентября 2020 г.), президентский форум и Международный консорциум архитектурно-строительных университетов «Один пояс – один путь» (Beit and Road Architecturai Univwrsity International Consortium – BRAUIC) (30 октября 2020 года), IX Международная научная конференция «Задачи и методы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» («Золотовские чтения», 25-26 августа 2021 года), посвященная 100-летнему юби-лею НИУ МГСУ, International Scientific Siberian Transport Forum TransSiberia – 2021, научно-практический семинар, посвященном 95 – летию со дня рождения д.т.н., проф., заслуженного деятеля науки России, чл. корр. РААСН Г.А. Гениева «Прочность и деформативность строительных конструкций в условиях новых вызовов» (НИУ МГСУ, 21 января 2022 г.).

Внедрение результатов работы. Элементы научных исследований были внедрены в учебный процесс Юго-Западного государственного университета (ЮЗГУ, г. Курск), а также использованы ООО КРЫМСПЕЦПРОЕКТом при проектировании железобетонных каркасов многоэтажных зданий.

Публикации по результатам исследований. Основные результаты проведенных исследований Фан Динь Гоуком опубликованы в 9 научных работах, в том числе 4 из них опубликованы в центральных научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 4 - в изданиях, индексируемых в Scopus, 1 опубликована в других научных журналах и изданиях и др. Получено два патента РФ на изобретения.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем работы 177 страниц, включающей 87 рисунков и 14 таблиц. Количество источников использованной литературы – 203, в том числе 78 зарубежных. Количество приложений – 1.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе работы приведен обзор теоретических и экспериментальных исследований в области механической безопасности и живучести зданий и сооружений при особых и аварийных воздействиях. Рассмотрена текущая ситуация по проблеме, описаны особенности зарегистрированных в мире прогрессирующих обрушений зданий и сооружений, вызванных непропорциональным начальным запускающим событием по отношению к окончательному ущербу, описаны и критически проанализированы известные в мировой практике методы зашиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения при особых аварийных воздействиях. В связи с продолжающимися во всем мире авариями от таких воздействий, число публикаций по проблеме живучести зданий и сооружений за последние два десятилетия растет в геометрической прогрессии. За последнее время опубликован

ряд новых российских и зарубежных научных работ, включая и обзорные исследования по рассматриваемой проблеме. В их числе можно привести 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., Крылова С.Б., Kiakojouri, F., Sheidaii, Adam J.M., Parisi F., и др. В этих и ряде других публикаций, приведена предлагаемая терминология, классификация типов и видов прогрессирующего обрушения, дан анализ существующих концептуально-методологических подходов к выполнению требований механической безопасности при особых воздействиях, представлены различные подходы к решению задач по обеспечению живучести зданий.

К настоящему времени в России и за рубежом выполнены также отдельные экспериментальные исследования на особые воздействия по сценарию внезапного удаления из конструктивной системы одного из несущих элементов. Известны работы Г.А. Гениева, Т.А. Ильющенко, Н.В. Клюевой, А.И. Демьянова, К.А. Шувалова, В.И. Колчунова, А.С. Бухтияровой, Н.О. Прасолова, П.А. Коренькова, Ву Нгок Туена, M. Sasani, Al-Ostaz A., Yi, W. J., H.M. Elsanadedy и др. Однако в этих экспериментальных исследованиях не изучались железобетонные конструктивные системы каркасов зданий, армированные одновременно обычной и косвенной арматурой.

В рассматриваемой главе проанализированы различные концепции по оценке запредельных состояний, режимы нагружения конструкций при особых и аварийных воздействиях, показаны способы учета прочностных и деформативных характеристик материалов, дан критический обзор наиболее распространенных способов расчета зданий и сооружений на устойчивость к прогрессирующему обрушению, принятых в различных странах, включая и принятые в нормативных документах этих стран.

В отдельном подразделе приведен обзор ранее выполненных научных исследований деформирования отдельных типов железобетонных конструкций с косвенным армированием, на основе которого сделан вывод о возможности и целесообразности применения косвенного армирования в конструктивных системах каркасов зданий, которое в дополнение к традиционному армированию стержнями может обеспечить защиту конструктивных систем от последствий особых и аварийных воздействий.

В связи с изложенным обоснована необходимость проведения экспериментально-теоретических исследований деформирования и разрушения железобетонных элементов конструктивных систем с косвенным армированием при обозначенных воздействиях и развитие отдельных положений элементов теории живучести таких конструктивных систем, для их защиты от прогрессирующего обрушения.

Во второй главе диссертации приведены аналитические зависимости для определения диаграмм деформирования «момент - кривизна» железобетонного изгибаемого элемента с косвенным армированием и определения параметра живучести железобетонных монолитных рамно-стержневых конструктивных систем при внезапном выключении одного из несущих элементов Расчетные параметры диаграмм деформирования сечений «момент-кривизна» в произвольном поперечном сечении изгибаемого элемента с косвенным армированием определены диаграммным

методом с использованием упрощенной зависимости «момент-кривизна», предложенной А.Б. Голышевым и Вл.И. Колчуновым (рисунок 1). В соответствии с этим, значение кривизны элемента с трещинами вычисляется по формуле:

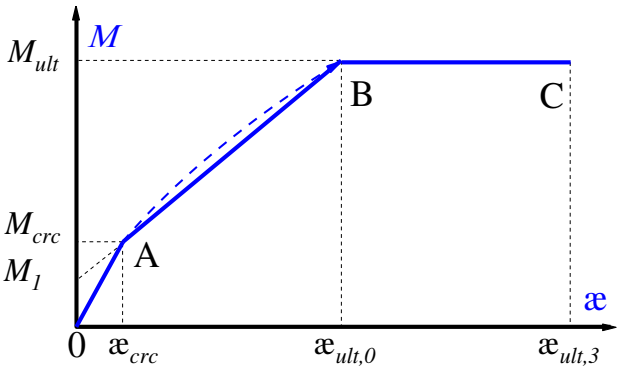


Рисунок 1 - Диаграмма «момент-кривизна» ($M-æ$) железобетонного изгибаемого элемента с косвенным армированием

$$æ_{AB}=\frac{M-\varphi_1.b.h^2.R_{bt,ser}}{\varphi_2.E_s.A_s.h_0^2}=\frac{M-M_1}{B_1} \qquad (1)$$

где: B_1 – жесткость элемента в сечении с трещиной. Значение момента M_1 определяется отрезком, отсекаемым продолжением прямой АВ на диаграмме «момент-кривизна» при статическом нагружении элемента до пересечения с осью моментов. Значение коэффициентов φ_1 и φ_2 зависящих от характеристик элемента (армирования $\mu\alpha$ и формы сечения φ_f), вычисляются по формулам:

$$\varphi_1=\frac{0,8.W_{pl}}{b.h^2}.\frac{1}{1+\frac{\psi_b.\mu.\alpha}{(\varphi_f+\xi).\nu}}; \qquad \varphi_2=\frac{z}{h_0}.\frac{1}{1+\frac{\psi_b.\mu.\alpha}{(\varphi_f+\xi).\nu}}. \qquad (2)$$

В работе критериально приведены этапы деформирования, возникающие при вычислении значения кривизны железобетонных элементов с косвенным армированием сжатой зоны, соответствующие отрезкам 0А, АВ, ВС графика рисунка 1.

Определение динамической кривизны изгибаемого железобетонного элемента конструктивной системы при его статико-динамическом деформировании выполнено на энергетической основе.

Условие стационарности полной удельной потенциальной энергии относительно точки “X” статического равновесия на соответствующих кривых деформирования $M^d(æ)$ и $M^c(æ)$ записано в виде (рисунок 2):

$$\Phi\left(æ_{n-1}^d\right)-\Phi\left(æ_{n-1}^c\right)=M_{n-1}^c(æ_{n-1}^d-æ_n^c). \qquad (3)$$

Здесь через Φ обозначен уровень потенциальной энергии в догружаемой после структурной перестройки конструктивной системе для произвольного сечения элемента, в общем случае определяемый выражением:

$$\Phi(æ)=\int_0^{æ}M(æ)\cdot dæ. \qquad (4)$$

В результате соответствующих преобразований, из соотношения (3), что эквивалентные площади двух замкнутых фигур F(akx) и F(xcf) равны (см. рисунок 2) при $M_{n-1}^c<\frac{M_{ult}^d+M_n^c}{2}$ для динамической кривизны нагруженного элемента получено:

$$tg(\alpha^d) = \frac{M^d_{n-1} - M^c_n}{æ^d_{n-1} - æ^c_n} = \frac{M^d_{0,ult} - M_{crc}}{æ_{ult,0} - æ_{crc}}$$
$$\Rightarrow æ^d_{n-1} = \frac{2.(M^c_{n-1} - M^c_n)(æ_{ult,0} - æ_{crc})}{\varphi^d_M . M^c_{ult} - M_{crc}} + æ^c_n. \quad (5)$$

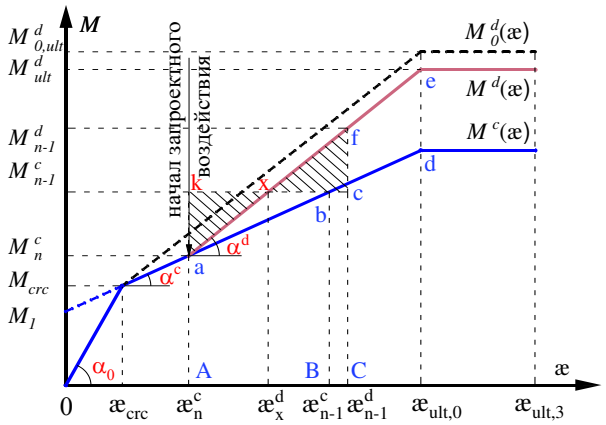


Рисунок 2-Расчетная диаграмма «$M - æ$» режимного статико-динамического деформирования сечения изгибаемого железобетонного элемента при $M^c_{n-1} < \frac{M^d_{ult} + M^c_n}{2}$

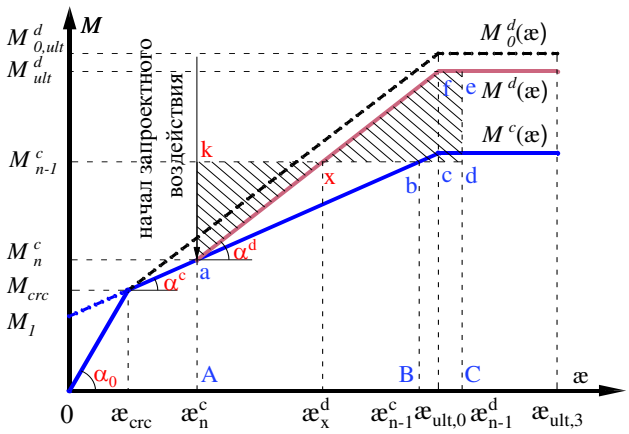


Рисунок 3-Расчетная диаграмма «$M - æ$» режимного статико-динамического деформирования сечения изгибаемого железобетонного элемента при $M^c_{ult} > M^c_{n-1} > \frac{M^d_{ult} + M^c_n}{2}$

При $M^c_{ult} > M^c_{n-1} > \frac{M^d_{ult} + M^c_n}{2}$ динамическая кривизна определяется по формуле (рисунок 3):

$$æ^d_{n-1} = \frac{(æ_{ult,0} - æ^c_n).(2M^c_{n-1} - M^c_n - M^d_{ult})}{2.(M^d_{ult} - M^c_{n-1})} + æ_{ult,0}, \quad (6)$$

$$M^d_{ult} = \frac{(\varphi^d_M . M^c_{ult} - M_{crc}).(æ_{utl,0} - æ^c_n)}{(æ_{utl,0} - æ_{crc})} + M^c_n \quad (7)$$

где φ^d_M – коэффициент увеличения динамического момента, зависящий от времени динамического догружения и коэффициентов динамической прочности арматуры φ^d_s и бетона φ^d_b.

В работе, на основе деформационной модели теории пластичности бетона и железобетона Г.А. Гениева, для определения предельного сжимающего напряжения σ_x (предельных деформаций) в сечении характерного одноосно сжатого и объемно деформируемого характерного элемента сжатого железобетона, армированного сжатой продольной арматурой и косвенной арматурой в виде сеток (рисунок 4), получена система из двух нелинейных уравнений вида:

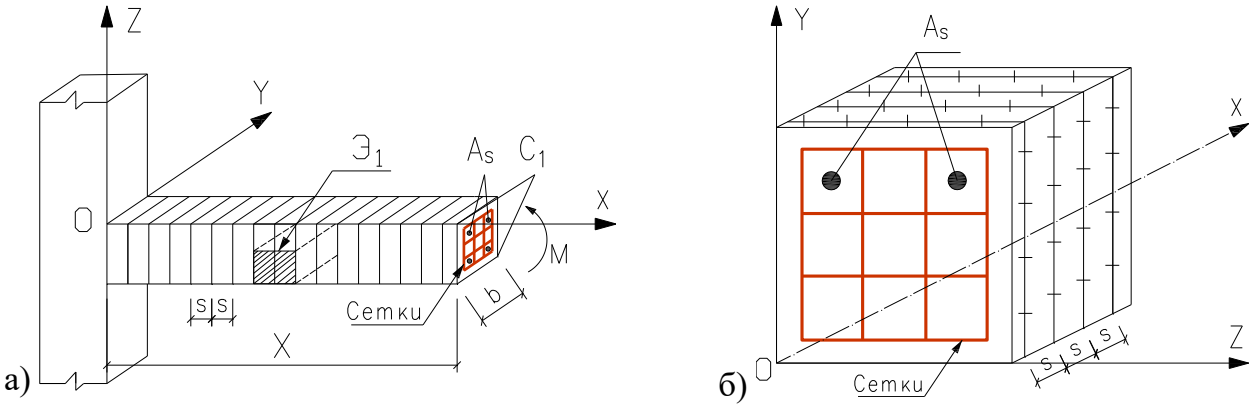


Рисунок 4 - Фрагмент приопорного узла ригеля железобетонной рамы с элементом Э1 в сжатой зоне (а) и схема характерного обьемно деформируемого расчетного элемента Э1 с косвенным армированием (б)

$$\mu\sigma_s = \frac{\dfrac{\nu E_s}{E_b(\Gamma)}\sigma_x + \dfrac{g_0\Gamma^2}{3}}{\dfrac{(1-\nu)E_s}{E_b(\Gamma)} - \dfrac{1}{\mu}}. \tag{8}$$

$$\sigma_x(\mu) = \frac{\sqrt{36(\alpha\mu-2)^2.(5\alpha\mu-6)^2.(R_b^2+R_{bt}^2)+72.(5\alpha\mu-6)^2.(7\alpha^2\mu^2-12\alpha\mu+4)R_bR_{bt}}}{144(\alpha\mu-1)^2} + \frac{6(\alpha\mu-2).(5\alpha\mu-6).(R_b-R_{bt})}{144(\alpha\mu-1)^2} \tag{9}$$

С использованием полученных формул были проведены вычисления и построена зависимость предельной прочности бетона от коэффициента косвенного армирования «$\sigma_x - \mu$» (Рисунок 5, кривая 1).

Здесь же приведен аналогичный график «$\sigma_x - \mu$» (кривая 2) изменения предельной прочности бетона, построенный с использованием формул действующих норм [СП 63.13330.2018] .

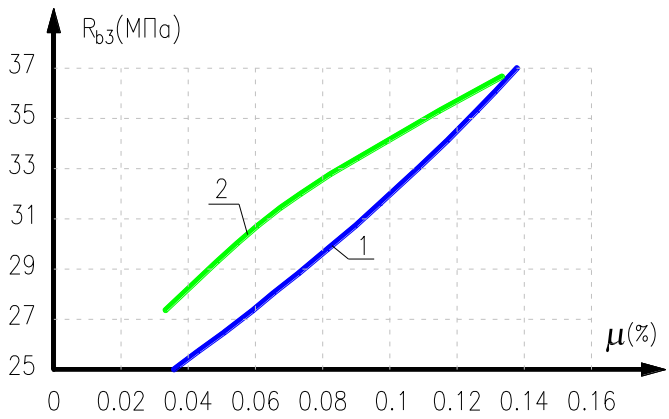


Рисунок 5 - Зависимость предельной прочности бетона от коэффициента косвенного армирования

В настоящей работе под термином «***живучесть***» конструктивной системы понимается способность этой системы к перераспределению нагрузки между ее несущими элементами при внезапном удалении из работы одного из ее несущих элементов. Количественно значение живучести железобетонной статически неопределимой рамно-стержневой конструктивной системы с косвенно армированными элементами, будем определять параметром живучести λ. Значение этого параметра для рассматриваемой рамно-стержневой конструктивной системы, нагруженной внешними силами λP_i, приложенными на расстояниях αl от опор (рисунок 6,а) выполнено с использованием варианта неординарного смешанного метода, разработанного И.Е. Милейковским и В.И. Колчуновым. Нагрузки на ригели

рамной статически неопределимой системы принимаются параметрическими и их изменение пропорционально параметру живучести λ.

Первоначальная исходная рамная система описывается в виде шарнирностержневой модели, в которой места возможного выключения связей меняют на неизвестные угловые $M_j\,(j=1,2,...,k)$ и линейные $Z_i\,(i=k+1,k+2,...,n)$. Предлагаемый вариант является оптимальным для решения рассматриваемого класса задач с точки зрения автоматизации такого расчета: не происходит изменения основной системы уравнений, но в независимости от расположения сечения в котором связь выключается, число неизвестных всегда уменьшается на единицу.

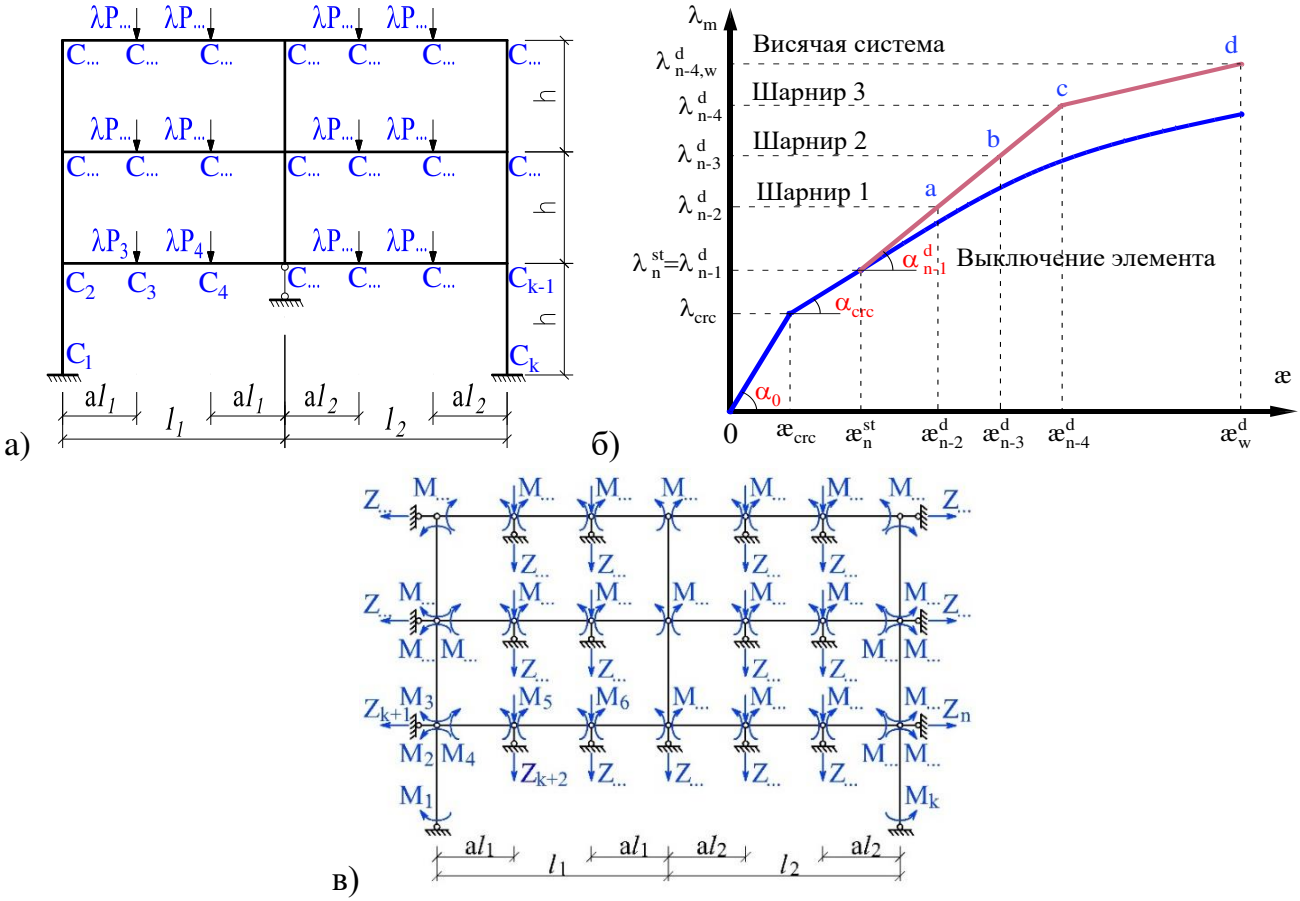


Рисунок 6 - Схема нагруженной рамы (а) и диаграммы состояний сечения железобетонного элемента «относительная параметрическая нагрузка λ - кривизна æ» физически и конструктивно нелинейной системы при статическо-динамическом режиме нагружении (б); основная система (в).

Таким способом определяется значение относительной параметрической нагрузки $\lambda_m P_i$, при которой в наиболее напряженном сечении элементов рамы наступает один из критериев особого предельного состояния при статико-динамическом режиме нагружения исследуемой конструкции. Индекс m определяет уровень относительной нагрузки $\lambda_m P_i$, при которой в результате мгновенного удаления одной из стоек исследуемой железобетонной статически неопределимой рамной системы наиболее напряженное сечение воспринимает предельный момент, после чего образуется первый пластический шарнир (см. рисунок 6,б). Дальнейшее параметрическое нагружение и распространение динамического догружения на оставшиеся элементы рамной конструкции приводит к образованию второго, а затем и третего шарниров (соответственно точки $\lambda^d_{n-2}, \lambda^d_{n-3}, \lambda^d_{n-4}$ на диаграмме рисунка 6, б).

Система канонических уравнений рассматриваемого варианта смешанного метода для рассматриваемой конструктивной системы (см. рисунок 6,а) в матричной форме записи имеет вид:

$$\begin{Vmatrix} A & B \\ -B^T & 0 \end{Vmatrix} \cdot \begin{Vmatrix} \vec{M} \\ \vec{Z} \end{Vmatrix} + \begin{Vmatrix} \vec{\Delta}_q \\ \vec{R}_q \end{Vmatrix} + \begin{Vmatrix} 0 \\ \vec{r}_p \end{Vmatrix} . \lambda = 0 . \qquad (10)$$

Решая систему уравнений (10) и определив неизвестные, вычисляются усилия в выключающихся связях конструктивной системы от суммарного действия заданной и рассматриваемой параметрической нагрузок:

$$M_j = M_{jq} + m_{jp} . \lambda, \ (j = 1, 2, ..., k) , \qquad (11)$$

где M_{jq} и m_{jp} - элементы матрицы столбцов $\vec{M}_p$ и $\vec{m}_p$.

На основе построенных статико – динамических диаграмм деформирования сечений железобетонного элемента с косвенным армированием и диаграммы состояний сечения нагружаемого элемента конструктивной системы, проводится критериальная проверка живучести физически и конструктивно нелинейной рамы при выключении из работы одного из опорных вертикальных элементов. Пластический шарнир образуется в некотором сечении j после внезапного удаления одной из опор тогда, когда при предельном значении момента $M^d_{j,ult}$ в сжатом бетоне или растянутой арматуре деформации достигнут предельных значений. При этом для всех усилий в выключающихся моментных связях рамы будет удовлетворяться система неравенств:

$$\left| M_j \right| = \left| M_{jq} + m_{jp} . \lambda \right| \le M^d_{j,ult} , \ (j = 1, 2, ..., k) , \qquad (12)$$

где $M^d_{j,ult}$ - предельные значение динамического усилия в выключающейся связи.

В третьей главе диссертации приведены программа, методика и результаты экспериментальных исследований живучести монолитных железобетонных рам с косвенно армированными ригелями при особом воздействии в виде внезапного удаления одной из несущих стоек. На первом этапе проведены испытания образцов бетонных призм с косвенным армированием при режимном нагружении и получены данные о параметрах деформирования и разрушения образцов призм с косвенной арматурой при их статико-динамическом нагружении. Методика проведения экспериментальных исследований включала использование специальной установки, позволяющей не только фиксировать уровень приложенной к образцу статической нагрузки, но и после перестановки образца в динамическую установку, без снятия статической нагрузки осуществлять динамический удар. Для определения призменной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона бетона при статическом нагружении использовалась гидравлическая испытательная машина Instron 1000 HDX.

Испытаниями установлено, что уровень нагружения статической нагрузкой перед приложением ударной нагрузки влияет на статико – динамическую прочность армированного бетона. Установка косвенной арматуры позволяет существенно увеличить пластичность и повысить прочность армированных призм при различных режимах их нагружения. При этом показатели предельной деформативности армированного бетона также изменяются.

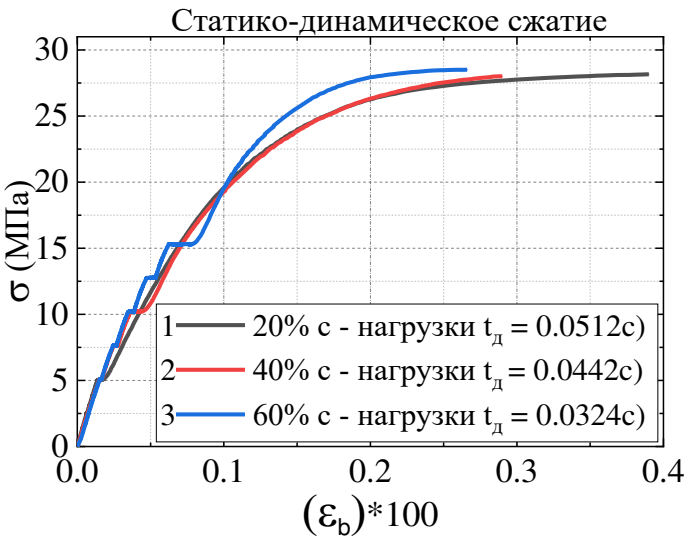


Рисунок 7 - Диаграмма «напряжения - деформации» бетонных призм с сетками при статико-динамическом нагружении

Так, если догружение призм, армированных косвенной арматурой производилось с уровня нагружения статической нагрузкой от 0,4 до $0{,}7\sigma_{max}$, то наблюдается заметное снижение деформативности по мере увеличения уровня нагружения статической составляющей нагрузки (рисунок 7).

Из диаграммы также ясно видно, что чем короче время приложения динамической нагрузки, тем меньше значение относительной деформации.

Второй этап испытаний включал испытания двухпролетных трехэтажных монолитных железобетонных рам, моделирующих фрагмент каркасов многоэтажных зданий. Испытано три конструкции опытных рам (рисунок 8). В первой РЖ-1 и второй РЖ-2 рамах отсутствала средняя стойка, а в третьей раме РЖ-3 отсутствовала крайняя стойка. Основные характеристики ригелей опытных конструкций рам приведены в таблице 1.

До начала испытаний был проведен расчет опытных конструкций рам по предложенной методике и с использованием ПК ЛИРА САПР, 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.

Весь процесс тестирования сводился к двум основным этапам. На первом этапе: конструкция рамы подвергалась статическим нагрузкам в соответствии с рассчитанными ступенями нагружения. На втором этапе: статически нагруженная конструкция рамы подвергалась высокоскоростному догружению - внезапному удару путем внезапного удаления колонны.

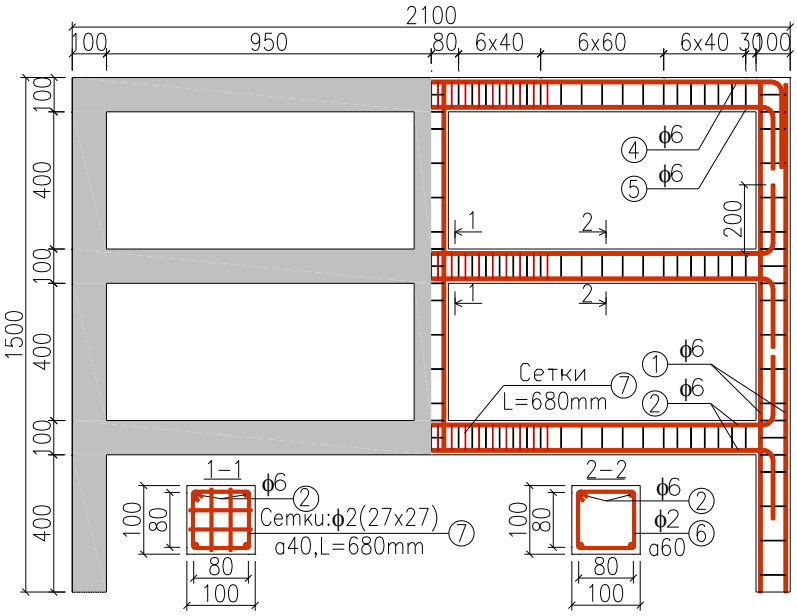
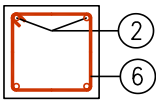
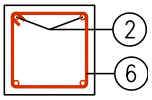
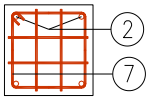
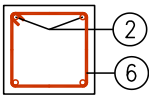
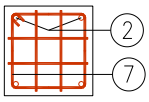
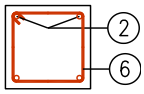


Рисунок 8 - Схема опытной конструкции рамы

Расчет по вторичной расчетной схеме был выполнен для нагруженной на первом этапе статической нагрузкой рамы и особое воздействие в виде внезапного удаления центральной или крайней стойки. Перед проведением испытаний рам были определены механические характеристики бетона и арматуры экспериментальных конструкций.

Таблица 1 - Основные характеристики ригелей опытных конструкций рам

№ Серия	Запроектная нагрузка	Схема поперечного сечения		Армирование			Класс бетона
		1-1	2-2	2	6	7	
РЖ-1	удаление крайней колонны			Ø6 А240	Ø2 Вр 500	-	В15
РЖ-2	удаление крайней колонны			Ø6 А240	Ø2 Вр 500	Ø2 Вр 500 сетки	В15
РЖ-3	удаление средней колонны			Ø6 А240	Ø2 Вр 500	Ø2 Вр 500 сетки	В15

Для передачи проектной нагрузки была использована механическая гравитационная рычажная установка, состоящая из рычага и комплекта тяжей и распределительных балок, передающих на раму нагрузку от платформы со штучными грузами. Запроектное воздействие на втором этапе испытаний прикладывалось внезапным выключением промежуточной колонны первого этажа рамы. Для этого вместо железобетонной колонны рамы устанавливалась опора в виде специального сборно-разборного устройства.

Анализ полученных данных испытанных конструкций рам показал, что деформирование, трещинообразование и разрушение исследуемых конструкций при рассмотренном воздействии имеет ряд особенностей.

Установлено, что трещинообразование и раскрытие трещин в опытной конструкции рамы РЖ-1 без косвенного армирования при проектной нагрузке происходило интенсивнее, чем в рамах РЖ-2 и РЖ-3 с косвенной арматурой в ригелях (рисунок 9).

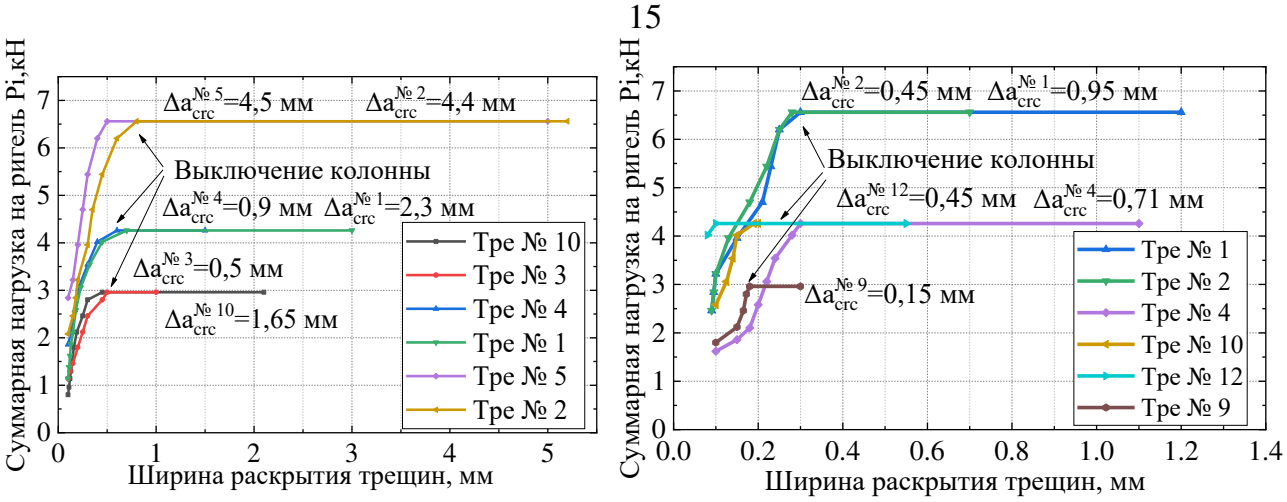


Рисунок 9 - Ширина раскрытия трещин при статической проектной нагрузке и после запроектного воздействия в рамах первой (а) и второй (б) серии

Важным параметром при исследованиях статико-динамического деформирования железобетонных рам, вызванного особым воздействием в виде внезапного удаления одной из колонн, является коэффициент динамического догружения в конструктивных элементах рамы. Оценка приращения напряжений в арматуре ригелей, была выполнена путем сопоставления ширины раскрытия трещин до и после особого воздействия. Сопоставлением опытных данных установлено, что в самых нагруженных сечениях рам, при динамическом догружении, происходит значительное снижение напряжений в арматуре в сечениях, усиленных косвенным армированием. Это явилось следствием изменения диссипативных свойств таких элементов при мгновенном динамическом догружении. Картины деформированного состояния, трещинообразования ригелей над первым этажом рам всех серий (рисунок 10),

а)

б)

в)

Рисунок 10 – Картины деформирования и разрушения нижних ригелей рам первой (а), второй (б) и третьей (в) серии

как самых нагруженных в зоне возможного локального разрушения, после аварийного воздействия подтвердили сделанные выводы. Это же подтверждают и полученные количественные значения ширины раскрытия трещин: в раме без косвенного армирования ширина раскрытия трещин после особого воздействия составляла от 1,0 до 1,8 мм, в то время как для рассматриваемых рам с усилением узлов косвенным армированием, она составила от 0,25 до 0,5 мм.

Анализ зависимости прогиба от суммарной нагрузки, действующей на ригель показал, что регламентированный действующими российскими нормами (СП 385.1325800.2018) прогиб для ригелей первого и второго уровней по высоте рамы первой серии превысил нормируемый более, чем в два раза. В рамах второй и третьей серии для самого нагруженного ригеля первого этажа деформационный прогиб находился в пределах допустимого и не превысил 1/30 пролета.

В четвертой главе диссертации приведены результаты численного анализа деформирования и разрушения железобетонных образцов, армированных косвенной арматурой в виде сеток и результаты численного анализа конструкций и систем каркасов многоэтажных зданий при мгновенном удалении из работы отдельных элементов.

С использованием программного обеспечения ABAQUS 2020 рассмотрены модель пластичности бетона при повреждении (CDP) и модель хрупкого разрушения бетона (BCC) и на этой основе протестировано поведение обычных неармированных образцов бетона и образцов бетона с косвенным армированием разной интенсивности при сжатии и растяжении в сопоставлении с данными, полученными опытным путем. Показано, что значения напряжений, полученные при анализе по экспериментальным данным и при моделировании в ПК ABAQUS 2020, не имеют существенных различий.

На основе разработанной методики расчета косвенно армированных железобетонных элементов при их статико-динамическом деформировании проведен количественный анализ деформирования двухпролетной железобетонной балки с двойным армированием и сетками в сжатой зоне, с шагом сеток 70 мм. В результате расчета показано, что значение предельного динамического момента в балке, дополнительно армированной сетками (M_{ult}^{d}) увеличилось в 1,38 раза.

Был также проведен расчет железобетонного рамно-стержневого каркаса многоэтажного здания, включающего в себя железобетонные колонны, монолитные ригели и монолитную плиту (рисунок 11) с целью повышения сопротивляемости каркаса внезапному изменению силовых потоков при удалении одной из колонн. Смешанное армирование ригеля выполнено двойной стержневой арматурой и дополнительной косвенной арматурой в виде плоских сеток, установленных в приопорных участках ригелей на четверть длины их пролета.

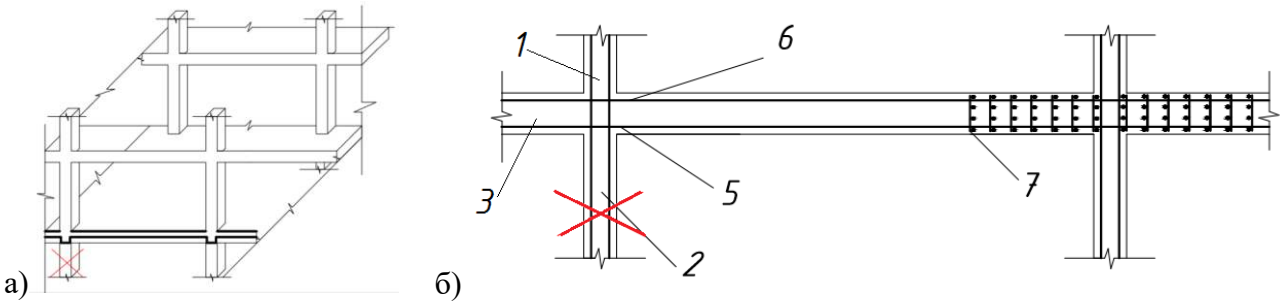


Рисунок 11 - Конструктивная система железобетонного каркаса здания (а) и схема смешанного армирования ригелей (б): 1 – несущая колонна, 2 – удаляемая колонна, 3 – ригель, 5-6 –нижняя и верхняя арматура ригеля, 7 – сварные сетки

При расчете каркаса на особое воздействие с помощью метода конечных элементов и программных комплексов ЛИРА-САПР и ABAQUS 2020, использовалась модель детализации элементов каркаса, при которой нижний этаж каркаса здания вместе с зоной возможного локального разрушения моделировался объемными конечными элементами, а вышележащие этажи - стержневыми конечными элементов. Стыковка конструктивных элементов первого и второго этажей осуществлялась при помощи специальных жестких вставок.

Получены напряжения и деформации в бетоне и арматуре ригеля первого этажа над удаляемой колонной и картина разрушения элементов каркаса многоэтажного здания после удаления угловой колонны первого этажа, а также картины разрушения каркаса здания для вариантов армирования ригелей двойной арматурой и смешанного армирования: двойной арматурой и сетками косвенного армирования (рисунок 12).

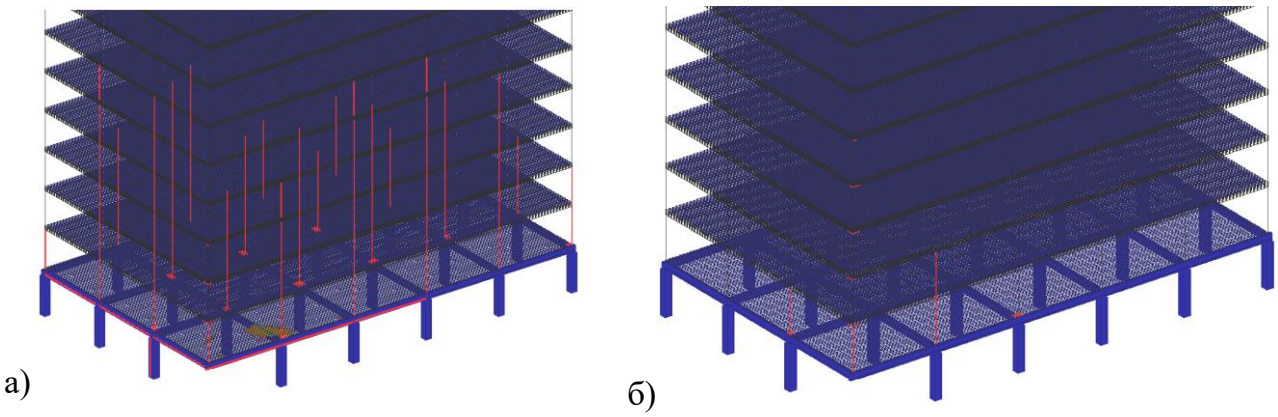


Рисунок 12 - Картина разрушения элементов после удаления колонны в каркасе с двойным армированием (а) и каркасе со смешанным армированием - двойной арматурой и сетками косвенного армирования (б)

Из приведенных результатов следует, что использование в ригелях каркасов многоэтажных зданий смешанного армирования в виде гибкой продольной арматуры в верхней и нижней зоне и косвенной арматуры в приопорных зонах может быть одним из эффективных способов повышения живучести таких конструктивных систем и их защиты от прогрессирующего обрушения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные теоретические и экспериментальные исследования деформирования и разрушения конструкций железобетонных каркасов с ригелями, со смешанным армированием: двойной арматурой и сетками косвенного армирования позволили сформулировать следующие основные результаты.

1. Анализом зарубежных и отечественных исследований установлено, что проблема обеспечения конструктивной безопасности зданий и сооружений является актуальной и широко обсуждается в мировых научных исследованиях при решении проблемы защиты зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Показано, что способы защиты сооружений от таких воздействий с использованием элементов косвенного армирования наиболее напряженных зон ранее не изучались.
2. На основе диаграмного метода построены диаграммы деформирования железобетонного элемента с косвенным армированием для оценки динамической прочности и предельной деформативности сжатой зоны железобетонных стержневых конструкций с косвенным армированием.
3. С использованием принятых рабочих гипотез и полученных диаграмм динамического деформирования, на энергетической основе выведены аналитические зависимости для определения параметров диаграмм «момент - кривизна» в косвенно армированных железобетонных рамно-стержневых конструктивных системах при динамических эффектах, возникающих в таких системах от внезапного выключении одного из несущих элементов.
4. С использованием теории пластичности железобетона Г.А. Гениева получен вариант деформационных соотношений для определения предельной прочности (деформативности) выделенного из конструктивной системы характерного объемного железобетонного элемента, армированного во всех трех направлениях и испытывающего одноосное напряженное состояние и объемную деформацию.
5. Проведенные экспериментальные исследования деформирования, трещинообразования и разрушения монолитных железобетонных рам с узлами, усиленными косвенным армированием и анализ полученных результатов позволили установить действительный характер изменения напряженно-деформированного состояния такой несущей рамной системы при проектных нагрузках и запроектном воздействии, вызванном удалением из работы одной из конструкций. Экспериментально подтверждены выдвинутые автором гипотезы об увеличении пластичности конструктивной системы за счет усиления косвенным армированием узлов в монолитных железобетонных каркасах и дополнительных резервах пластического деформирования сечений железобетонных элементов. Показано увеличение не только предельной деформативности (ε_{b2}) сечений вследствие косвенно армированного бетона, но и возможность дополнительного роста прочности сечений железобетонных элементов за счет увеличения площади растянутой арматуры без угрозы хрупкого разрушения по бетону.

6. С использованием программного комплекса ABAQUS 2020 проведены численные исследования характерного объемного железобетонного элемента с косвенным армированием и определены напряженное состояние и расчетные параметры статико – динамического деформирования этого элемента. С использованием полученных аналитических зависимостей выполнен расчет железобетонной конструкции балки, со смешанным армированием: стержневой арматурой и сетками косвенного армирования при статико-динамическом режиме ее нагружения в предельном и запредельном состояниях.
7. Разработаны предложения по защите монолитных железобетонных конструкций каркасов многоэтажных зданий от прогрессирующего обрушения при особых аварийных воздействиях с использованием дополнительного косвенного армирования ригелей. Показано, что косвенное армирование в виде арматурных сеток ригелей монолитных рам, в дополнение к обычному стержневому армированию, может рассматриваться как один из способов защиты железобетонных каркасов зданий от прогрессирующего обрушения.
8. Полученные результаты дают возможность более полно оценивать работу рассмотренных несущих систем при критериальной оценке параметров особого предельного состояния.

Перспективы дальнейшей разработки темы будут связаны с исследованиями силового сопротивления железобетонных каркасов многоэтажных зданий с различными вариантами косвенного армирования, комбинацией косвенного армирования и стержневой обычной и преднапряженной арматуры при решении задач живучести зданий и сооружений.

Публикации в изданиях, индексируемых Scopus

1. Fedorova N.V. Determination of the Viscosity Modulus of Concrete Under StaticDynamic Loading Regimes / N.V. Fedorova, N.T. Vu, M.D. Medyankin, **D.Q. Phan** // International Scientific Siberian Transport Forum. – 2022. – С.1294-1302. DOI: 10.1007/978-3-030-96383-5_144.
2. Fedorova N.V. Indirect Reinforcement of Reinforced Concrete Elements as a Means of Protecting a Constructive System from a Progressive Collapse / N.V. Fedorova, **D.Q. Phan**, P. Korenkov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Т. 753. – № 3. – С.032032. DOI:10.1088/1757-899X/753/3/032032.
3. Fedorova N.V. Methodology for Modeling the Survivability of Multi-story Building Frames with Complex Stress Reinforced Concrete Elements / N. Fedorova, V. Moskovtseva, M. Medyankin, M. Eniutina, **P.D. Quoc** // International Scientific Siberian Transport Forum. – 2022. – С.1257-1266. DOI: 10.1007/978-3-030-96383-5_140.
4. Fedorova N.V. The dynamic effect in a structural adjustment of reinforced concrete structural system / N. Fedorova, V. Kolchunov, V.N. Tuyen, **P.D. Quoc**, M. Medyankin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Т. 869. – № 5. – С.052078. DOI:10.1088/1757-899X/869/5/052078.

Публикации в издания, входящих в перечень ВАК

5. Колчунов В.И. Особое предельное состояние в железобетонных каркасахс узлами, усиленными косвенным армированиемпри аварийных воздействиях / В.И. Колчунов, П.А. Кореньков, **Ф.Д. Гуок** // Вестник МГСУ. – 2021. – Т. 16. – № 11. – С.1462-1472. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.11.1462-1472.
6. Федорова Н.В. Экспериментальные исследования живучести железобетонных рам с ригелями, усиленными косвенным армированием / Н.В. Федорова, **Д.Г. Фан**, Т.Ч. Нгуен // Строительство и реконструкция. – 2020. – № 1. – С.92-100. DOI: 10.33979/2073-7416-2020-87-1-92-100.
7. Федорова Н.В. Анализ методик экспериментальных исследований живучести железобетонных конструкций / Н.В. Федорова, **Ф.Д. Гуок**, Е. А. Егоров, М. И. Григорьев // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2022. – № 6(1054). – С. 19-26. – EDN WPZUUY.
8. **Фан Динь Гуок.** Силовое сопротивление железобетонных каркасов многоэтажных зданий с косвенным армированием в запредельных состояниях / **Д.Г. Фан**, Т.А. Ильющенко, М.А. Амелина // Строительство и реконструкция № 3 (2022). С.87-97. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-101-3-87-97.

Публикации в других изданиях

9. Nguyễn Thị Trang. Biến dạng tĩnh động của bê tông với sự gia cường cốt thép gián tiếp (Static-dynamic deformation of concrete with indirect reinforcement) / T.T. Nguyễn, **Đ.Q. Phan** // Молодежные инновации: сборник материалов семинара молодых учёных в рамках XXIII Международной научной конференции, Ханой, 23–26 сентября 2020 года. – Москва: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2020. – P. 148-152.

Патенты

10. Патент № 2755669 C1 Российская Федерация, МПК E04B 1/20. Сборномонолитный железобетонный каркас многоэтажного здания : № 2020141804: заявл. 17.12.2020: опубл. 20.09.2021 / Т.А. Ильющенко, Н.Т. Ву, **Д.Г. Фан**; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Юго-Западный государственный университет"(ЮЗГУ).
11. Патент № 2725351 C1 Российская Федерация, МПК E04B 1/38. Платформенный сборно-монолитный стык : № 2019134630 : заявл. 29.10.2019: опубл. 02.07.2020 / Н.В. Федорова, В.И. Колчунов, Д.В. Мартыненко, Т.А. Ильюшенко, **Д.Г. Фан**; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Юго-Западный государственный университет" (ЮЗГУ).