

На правах рукописи



Галяутдинов Дауд Рашидович

**Прочность и деформативность железобетонных балок
с распором при кратковременном динамическом нагружении
на податливых опорах**

2.1.1. – Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет» (ФГБОУ ВО ТГАСУ)

Научный руководитель:

Кумпак Олег Григорьевич,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Трекин Николай Николаевич,
доктор технических наук, профессор,
начальник отдела
конструктивных систем
АО «ЦНИИПромзданий»,
г. Москва

Мурашкин Василий Геннадьевич,
кандидат технических наук, доцент,
заместитель директора
ООО «Риэлтстрой», г. Самара

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО
«Новосибирский государственный
архитектурно-строительный
университет» (СИБСТРИН),
г. Новосибирск

Защита состоится «7» апреля 2023 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.2.414.01 при ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, корп. 2, ауд. 303.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского государственного архитектурно-строительного университета по адресу: 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2 и на сайте www.tsuab.ru

Автореферат разослан «3» февраля 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного

совета



Копаница Наталья Олеговна

Общая характеристика работы

Актуальность исследований. Вследствие непрерывного развития химической, нефтяной, газовой и других отраслей промышленности увеличивается вероятность возникновения и воздействия на конструкции зданий и сооружений случайных кратковременных динамических нагрузок большой интенсивности.

Одновременно с этим осуществляется совершенствование конструктивных решений сооружений гражданской обороны и специального защитного назначения, основной нагрузкой для которых является кратковременная динамическая нагрузка от современных средств поражения. К этому классу сооружений предъявляются особые эксплуатационные требования: конструкция должна выдержать однократное действие динамической нагрузки, не вызвав обрушения сооружения.

Сооружения, проектируемые на особые динамические воздействия, часто возводятся из сборного и сборно-монолитного железобетона по каркасной схеме. Для стыков сборных элементов характерна податливость вследствие обжатия бетона по контактным поверхностям и других факторов. При этом в изгибаемых конструкциях вследствие ограничения горизонтального смещения в опорных закреплении возникает реакция – распор.

Известно, что явление распора приводит к повышению несущей способности изгибаемых железобетонных конструкций и достаточно хорошо изучено при статическом нагружении. При однократном кратковременном динамическом нагружении действие распора на работу конструкции неоднозначно. С одной стороны, действие распора повышает несущую способность конструкции, с другой понижается ее деформативность. Снижение деформативности отрицательно сказывается на пластических свойствах железобетонной конструкции и часто приводит к уменьшению ее динамической прочности.

Повышение динамической несущей способности железобетонных конструкций традиционно осуществляется путем увеличения размеров поперечного сечения, процента армирования, прочностных характеристик материалов. Данный способ можно рассматривать как пассивный. Возможны также активные способы повышения взрывостойкости конструкций, направленные на снижение интенсивности динамической нагрузки. Активная защита способна обеспечить восприятие динамических нагрузок конструкциями без их разрушения. При этом появляется возможность проектировать сооружения с заданной степенью остаточных деформаций.

Таким образом исследования по разработке и экспериментальной оценке метода расчета железобетонных изгибаемых балочных конструкций с распором на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении являются актуальными и представляют научное и практическое значение.

Работа выполнена в рамках проекта грантовой поддержки Российского фонда фундаментальных исследований договор № 19-31-90097/19 от 25 августа 2019.

Работа выполнена при поддержке госзадания Министерства науки и высшего образования РФ FEMN-2022-0004.

Степень разработанности темы исследований. Совершенствование методов динамического расчета железобетонных конструкций представлено в работах таких ученых, как А.С. Абдуль-Рахман, В.В. Адищев, И.В. Балдин, И.К. Белобров, Ю.М. Баженов, Т.Н. Виноградова, З.Р. Галяутдинов, А.А. Гвоздев, Г.С. Григорян, А.Н. Добромислов, А.В. Забегаев, Н.В. Ключева,

Вл.И. Колчунов, В.И. Колчунов, В.А. Котляревский, О.Г. Кумпяк, Н.В. Мещеулов, А.В. Педиков, В.С. Плевков, А.И. Плотников, Я.Ф. Погребной, Н.Н. Попов, Г.И. Попов, И.М. Рабинович, Б.С. Расторгуев, В.В. Родевич, А.Е. Саргсян, А.Г. Тамразян, И.Н. Тихонов, Г.П. Тонких, Н.Н. Трекин, А. Усманов, К.Р. Christiansen, В. Chiaia, S. Foster, V.T. Frederiksen, L. Huynh, A. Kezmane, L. Placidi, R. Rendall, H. Valipour и др. ученых.

В работах А.С. Абдуль-Рахмана, И.В. Балдина, З.Р. Галяутдинова, А.В. Забегаева, В.А. Котляревского, О.Г. Кумпяка, В.Б. Максимова, Н.В. Мещеулова, А.В. Педикова, В.С. Плевкова, Н.Н. Попова, Б.С. Расторгуева, Г.П. Тонких, А. Kezmane, В. Chiaia, L. Placidi изучалось влияние вертикальной податливости опорных креплений железобетонных конструкций при кратковременном динамическом нагружении на их несущую способность и деформативность. Исследования изгибаемых железобетонных конструкций с распором при статическом и кратковременном динамическом воздействии представлены в работах Т.Н. Виноградовой, З.Р. Галяутдинова, А.А. Гвоздева, Г.С. Григоряна, А.В. Забегаева, Л.Н. Зайцева, А.М. Зулпуева, В.А. Котляревского, О.Г. Кумпяка, Я.Ф. Погребного, Н.Н. Попова, Б.С. Расторгуева, И.Н. Тихонова, К.Р. Christiansen, L. Huynh, R. Rendall, H. Valipour и др. ученых

Однако особенности деформирования железобетонных балочных конструкций с учетом реакции распора при вертикальной податливости опор при кратковременном динамическом нагружении в достаточной степени не изучены.

Цель работы – разработка и экспериментальная проверка метода расчета по прочности железобетонных балочных конструкций с распором на податливых опорах при кратковременном динамическом воздействии.

Задачи исследования:

- на основе анализа собственных экспериментальных исследований и других ученых получить диаграммы сопротивления податливых опорных устройств;
- разработать программу и провести экспериментальные исследования прочности и деформативности железобетонных балочных конструкций при поперечном кратковременном динамическом нагружении с учетом ограничения горизонтального смещения на опорах, а также стадий деформирования опор, при их вертикальной податливости;
- разработать аналитический метод динамического расчета железобетонных балок с распором в условно упругой и пластической стадиях с учетом деформирования податливых опор в упругой стадии, упругопластической и стадии отвердения;
- на основе численного эксперимента выполнить анализ влияния на прочность и деформативность балочных конструкций с распором по нормальным сечениям при кратковременном динамическом нагружении следующих факторов:
 - вертикальной податливости опор при разных стадиях их деформирования: упругой, упругопластической и отвердения;
 - величины горизонтальной податливости конструкции на опорах.
- дать оценку эффективности применения податливых опорных устройств для изгибаемых железобетонных балочных конструкций с распором при кратковременном динамическом воздействии.

Научная гипотеза состоит в предположении наличия зависимости величины снижения прогибов и усилий изгибаемых железобетонных элементов с распором при кратковременном динамическом нагружении от стадии деформирования податливых опор.

Объектом исследований являются железобетонные балки с распором на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении.

Предметом исследований является прочность и деформативность железобетонных балок с распором на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении.

Методология и методы исследований. Методологической основой диссертационной работы являются экспериментально-теоретические исследования отечественных и зарубежных ученых в области расчета железобетонных конструкций при динамических воздействиях, механики деформирования железобетона, моделирования свойств бетона, арматуры и железобетона в условиях скоростного нагружения. Проведение экспериментальных исследований, обработка и анализ полученных результатов.

Экспериментальные исследования проводились с использованием сертифицированных и поверенных средств испытаний, измерений и обработки показаний приборов, в том числе: копровая установка с регулируемой высотой сбрасывания и массой падающего груза, с системой фиксации величины действующей нагрузки и опорной реакции во времени; средства измерения деформаций (тензорезисторы), перемещений (датчики перемещений Waycon RL150), ускорений (акселерометры DHE 100023); средства фиксации и обработки показаний средств измерений – информационно-вычислительные комплексы MIC-300, MIC-036R.

Научная новизна работы заключается в получении новых знаний о прочности и деформативности железобетонных балок с распором на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении, а именно:

- экспериментально получены функции сопротивления податливых опор в виде цилиндрических вставок кольцевого профиля, позволяющие аналитически определить их жесткость для каждой стадии динамического деформирования (упругая, упругопластическая, отвердения);
- впервые получены и систематизированы экспериментальные данные о влиянии вертикальной податливости на прочность и деформативность железобетонных балок с ограничением горизонтального смещения на опорах по нормальным сечениям при кратковременном динамическом нагружении;
- разработан аналитический метод динамического расчета железобетонных балок с распором в условно упругой и пластической стадиях с учетом деформирования податливых опор в упругой стадии, упругопластической и стадии отвердения;
- численным экспериментом установлено влияние величины горизонтальной податливости конструкций на опорах, а также вертикальной податливости опор на прочность и деформативность балочных конструкций с распором при кратковременном динамическом нагружении.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке аналитического метода динамического расчета изгибаемых железобетонных конструкций с распором и вертикальной податливостью опор; в получении коэффициентов динамичности, позволяющих выполнять расчеты изгибаемых железобетонных конструкций с распором по нормальным сечениям на податливых опорах.

Практическая значимость работы включает в себя разработанный алгоритм и программу расчета железобетонных изгибаемых элементов с распором на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении; а также новые опытные данные, характеризующие процесс динамического деформирования распорных изгибаемых конструкций в зависимости от стадии деформирования податливых опор (упругопластическая и отвердения).

Достоверность результатов диссертационной работы обеспечивается корректным использованием основных положений теории железобетона, сопротивления материалов, строительной механики; комплексом экспериментальных исследований с применением сертифицированных приборов и установок; применением современных средств регистрации исследуемых параметров; использованием лицензионного и верифицированного программного обеспечения; сравнительным анализом и сходимостью результатов физических экспериментов и численных исследований, выполненных на основании разработанного метода расчета.

Личный вклад диссертанта состоит в:

- получении функции сопротивления податливых опор в виде цилиндрических вставок кольцевого профиля, включающие характерные стадии динамического деформирования;
- разработке методики и проведении экспериментальных исследований железобетонных балок с распором на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении;
- в обосновании предпосылок и разработке аналитического метода расчета железобетонных балок с распором в условно упругой и пластической стадии с учетом деформирования податливых опор в упругой стадии, упругопластической и стадии отвердения;
- анализе и обобщении результатов экспериментальных исследований железобетонных балок с распором на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении;
- в проведении численных исследований и анализе напряженно-деформированного состояния железобетонных балок в зависимости от вертикальной податливости опор и горизонтальной податливости конструкции на опорах.

Положения, выносимые на защиту:

- методика и результаты экспериментальных исследований податливых опор на кратковременные динамические нагрузки;
- методика проведения экспериментальных исследований железобетонных балок с распором при кратковременном динамическом нагружении, при разных стадиях деформирования податливых опор;
- новые экспериментальные данные о напряженно-деформированном состоянии железобетонных балок с распором на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении в зависимости от стадии деформирования податливых опор (упругая, упругопластическая и отвердение);
- предпосылки и аналитический метод динамического расчета железобетонных балок с распором в условно упругой и пластической стадиях на податливых опорах с учетом деформирования опор в упругой стадии, упругопластической и стадии отвердения.
- результаты численных исследований железобетонных балок с распором при кратковременном динамическом нагружении с учетом деформирования податливых опор в упругой стадии, упругопластической и стадии отвердения.

Реализация результатов исследований. Результаты экспериментально-теоретических исследований железобетонных балок с распором на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении использованы при разработке стандарта организации ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ) СТО 8.1-4.7-2022 «Проектирование защитных сооружений гражданской обороны с податливыми опорами в виде сминаемых вставок кольцевого сечения». Разработанный стандарт предназначен для специалистов, осуществляющих проектирование защитных сооружений гражданской обороны. Справка прилагается.

Результаты исследований используются в научной работе студентов, дипломном проектировании и при чтении спецкурса для специалистов и магистров по направлениям 08.05.01 и 08.04.01 «Строительство» ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет». Справка прилагается.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы были доложены и получили положительную оценку: на научных семинарах кафедры «Железобетонные и каменные конструкции» Томского государственного архитектурно-строительного университета (2020 – 2022 гг.); на XIII – XV и XVII Международной конференции молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (г. Томск, НИ ТПУ, 2017 г., 2020 г.); на I и IV Международной конференции молодых ученых «Молодежь, наука, технологии: новые идеи и перспективы» (г. Томск, ТГАСУ, 2014 г., 2017 г.); на Международной научно-практической конференции «Лелейтовские чтения–150» (г. Москва, МГСУ, 2018 г.); на Международной научно-практической конференции «Материаловедение, формообразующие технологии и оборудование» (ICMSSTE) (г. Ялта, 2020 г., 2021 г.); на Международной научно-практической конференции «Современные строительные материалы и технологии» (г. Калининград, БФУ имени И. Канта, 2020 г.); на Международных академических чтениях РААСН «Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения.» (г. Курск, КГУ, 2020 г.); на «XXI Всероссийская научно-практическая конференция» (г. Киров, ВГУ, 2021 г.); на «XXIV International Scientific conference on Advance In Civil Engineering» (FORM-2021) (г. Москва, МГСУ, 2021 г.); на объединенном научном семинаре кафедр «Железобетонные конструкции», «Строительная механика» и «Металлические конструкции» (декабрь 2022 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 25 печатных работ, включая 5 статей в журналах, входящих в перечень ВАК, 5 статей в изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science, 12 патентов, в том числе 3 на изобретение РФ, 3 патента на изобретение зарегистрированные в Евразийской патентной организации (ЕАПО).

Соответствие диссертации паспорту научной специальности: в соответствии с формулой специальности в диссертации выполнены научно-технические исследования и разработки в области рационального проектирования конструктивных решений железобетонных конструкций зданий, обеспечивающее повышение их конструктивной безопасности. Полученные в диссертационном исследовании результаты соответствуют пункту паспорта научной специальности 2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения:

— создание и развитие эффективных методов расчета и экспериментальных исследований вновь возводимых, восстанавливаемых и усиливаемых строительных конструкций наиболее полно учитывающих специфику воздействий на них, свойства материалов, специфику конструктивных решений и другие особенности.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов, заключения, трех приложений, списка литературы из 143 наименований, в том числе 29 зарубежных источника. Работа представлена на 221 странице печатного текста, содержит 104 рисунка, 6 таблиц и 20 страниц приложений.

Работа выполнена на кафедре «Железобетонные и каменные конструкций» Томского государственного архитектурно-строительного университета под руководством советника РААСН, д.т.н. профессора Кумпяка О.Г.

Автор выражает благодарность профессору отделения электроэнергетики и электротехники инженерной школы энергетики НИТПУ д.т.н. Однокопылову Г.И. за возможность использования созданных с соавторским участием экспериментальных установок и методов регистрации данных.

Основное содержание работы

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационного исследования, поставлены цели и задачи, определены объект, предмет и методы исследования, а также представлены основные положения, выносимые автором на защиту, отражена научная новизна, практическая и теоретическая значимость работы.

В первой главе выполнен анализ современного состояния экспериментально-теоретических исследований железобетонных конструкций с распором на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении.

В настоящее время развиваются методы повышения сопротивления железобетонных конструкций интенсивным динамическим воздействиям, основанные на применении активных методов защиты. В этом направлении следует отметить работы Б.С. Расторгуева, в которых разработаны теоретические основы расчета конструкций с учетом вертикального смещения их на опорах. Дальнейшее развитие исследования конструкций на податливых опорах получили в работах И.В. Балдина, З.Р. Галяутдинова, А.В. Забегаева, Д.Н. Кокорина, О.Г. Кумпяка, В.Б. Максимова, Н.В. Мещеулова, А.В. Педикова, В.С. Плевкова, А.-Р.А. Саида, А. Усманова, B. Chiaia, A. Kezmane, L. Placidi.

Экспериментальные исследования железобетонных конструкций на податливых опорах в виде сминаемых вставок кольцевого сечения свидетельствуют о высокой эффективности их применения при кратковременном динамическом нагружении. Наибольшее снижение перемещений конструкции, деформаций бетона и арматуры установлено при работе балок в условно упругой стадии и деформировании податливых опор в упругопластической стадии без перехода в стадию отвердения.

Впервые теоретическое обоснование влияния распора на прочность изгибаемых железобетонных статически неопределимых конструкций было дано А.А. Гвоздевым: «распор (дополнительная сила) появляется вследствие несовпадения нейтрального слоя изгибаемого элемента с его геометрической осью еще до появления трещин в растянутой зоне бетона, и несовпадения центров пластических шарниров с геометрической осью элемента в стадии разрушения».

Исследования по влиянию распора на напряженно-деформированное состояние железобетонных конструкций при кратковременном динамическом нагружении проводили Попов Н.Н., Расторгуев Б.С., Кумпяк О.Г., Виноградова Т.Н., Галяутдинов З.Р., Тихонов И.Н. По результатам теоретических и экспери-

ментальных исследований конструкций установлено, что наличие распора в железобетонных балках при кратковременных динамических воздействиях повышает их несущую способность и снижает деформативность. При этом влияние распора на напряженно-деформированное состояние балок при динамическом нагружении зависит от следующих факторов: жесткости примыкающих конструкций; процента армирования; физико-механических характеристик бетона и арматуры; возможности работы конструкции в области пластических деформаций; закона изменения динамической нагрузки во времени и продолжительности ее действия.

Исследования железобетонных изгибаемых конструкций с распором при интенсивном динамическом воздействии с учетом вертикальной податливости на опорах в опубликованной литературе не представлены.

Во второй главе представлены результаты испытаний податливых опор в виде сминаемых вставок кольцевого сечения при кратковременном динамическом нагружении. Определены особенности динамического деформирования податливых опор, изменения реакции опоры в зависимости от стадии её работы.

Испытания податливых опор производились на разработанном и изготовленном стенде (рисунок 1), оригинальность которого подтверждена патентом РФ на полезную модель. Стенд для испытания податливых опор при действии кратковременной динамической нагрузки выполнен на базе копровой установки. Содержит смонтированную на силовом полу жесткую опору, два датчика опорных реакций и перемещений, установленных на ней, а также сборный каркас, выполненный из двух металлических пластин, соединенных между собой с помощью вертикальных направляющих. Нагрузка прикладывалась путем свободного падения груза по направляющим, жестко закрепленным на силовом полу.

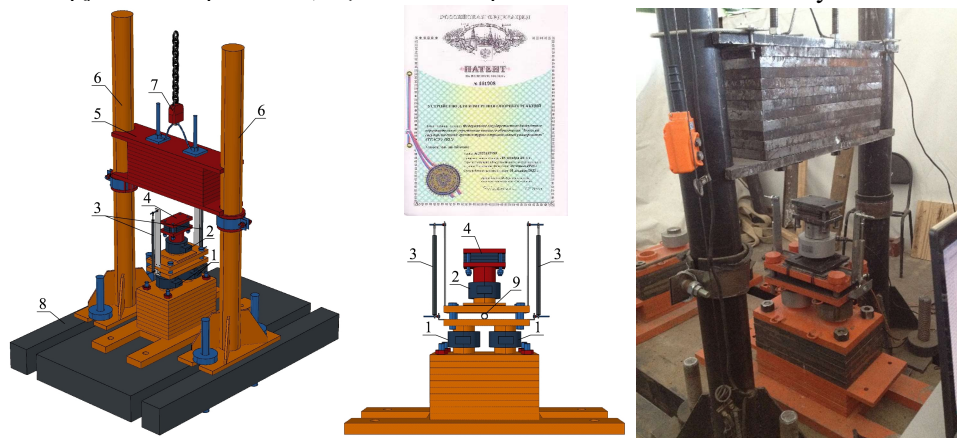


Рисунок 1 - Стенд для испытания податливых опор при кратковременном динамическом нагружении: датчики опорных реакций (силоизмерительный датчик ДСТ 4126) (1); датчик динамического воздействия (силоизмерительный датчик ДСТ4126) (2); датчики перемещений (3); демфирующий резинометаллический блок (4); сбрасываемый груз (5); направляющие (6); сбрасывающее устройство (7); силовой пол (8); испытываемый образец (9)

Программа экспериментальных исследований податливых опор включала испытания 25 металлических вставок кольцевого профиля. Внутренний диаметр полого цилиндра для всех элементов был одинаков и равен 25,4 мм. Толщина

стенки трубчатого профиля составляла 3,2 мм. Жесткость опор варьировалась путем изменения длины сминаемой вставки. Геометрические и физические параметры опытных образцов обеспечивали их работу в упругой стадии, упругопластической и стадии отвердения.

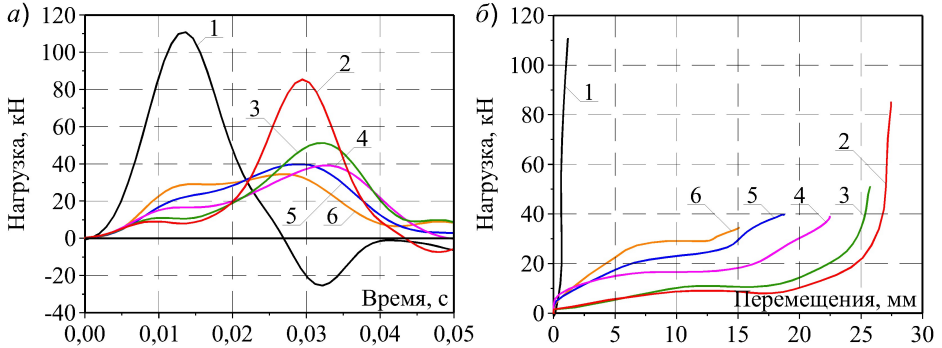


Рисунок 2 - Диаграмма изменения динамической реакции опор во времени (а) и перемещения опор от нагрузки (б): жесткие опоры (1); податливые опоры длиной 20 мм(2); податливые опоры длиной 40 мм(3); податливые опоры длиной 60 мм(4); податливые опоры длиной 80 мм(5); податливые опоры длиной 100 мм(6)

По результатам экспериментальных исследований сминаемых вставок установлено снижение пика динамической реакции на 64% для податливых опор, деформирующихся в пределах упругопластической области (рисунок 2). Переход податливых опор в стадию отвердения приводит к резкому росту реакции опоры, что в значительной степени снижает эффективность их применения. Таким образом, по результатам экспериментальных исследований установлено, что их деформирование в пределах упругопластической стадии, является наиболее оптимальным решением для максимальной сохранности конструкций при динамическом нагружении. Величина реакции зависит от жесткости податливых опор в упругой, пластической и стадии отвердения.

В экспериментальных исследованиях железобетонных балок с распором на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении выполнена оценка влияния стадии деформирования податливых опор на их напряженно-деформированное состояние.

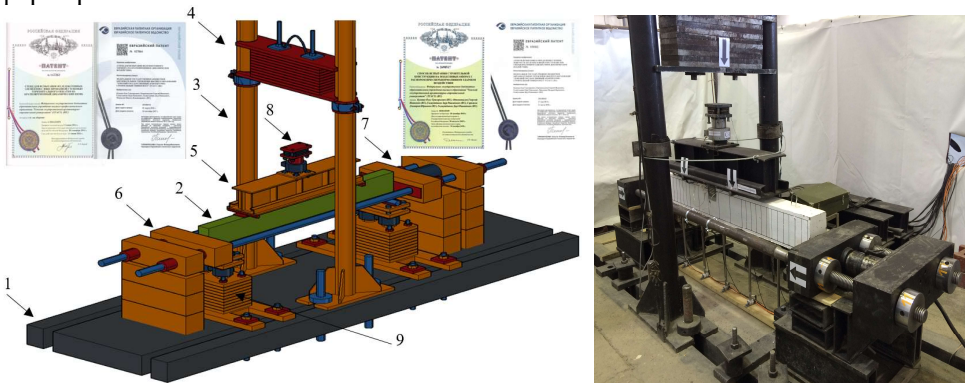


Рисунок 3 - Стенд для испытания конструкций в условиях ограниченного горизонтального смещения на опорах при кратковременном динамическом нагружении: силовой пол (1);

образец (2); направляющие (3); сбрасываемый груз (4); распределительная траверса (5); ограничительный контур (6); домкрат (7); силомер (8); динамометрическая опора (9)

Исследования опытных конструкций при кратковременном динамическом нагружении проводились на разработанном и изготовленном испытательном стенде (рисунок 3). Ограничение горизонтального смещения производилось при помощи специального приспособления, состоящего из двух торцевых траверс, соединенных между собой двумя тяжами. Траверсы упирались в торцы балок через каток и пластину с фрезерованным под каток пазом в уровне центра тяжести растянутой арматуры. Перед началом испытаний с помощью домкрата создавалось обжатие для устранения возможных деформации в соединениях, после чего производилась фиксация гайками на концах тяжей.

Экспериментальные исследования балок включали испытание 14 опытных конструкций (таблица 1), размером 150×220 мм и длиной 1900 мм. Бетон балок тяжелый класса В35...В40. Армирование опытных конструкций выполнялось пространственным каркасом. Армирование нижней (растянутой) зоны балок осуществлялось из горячекатаной стержневой арматуры класса А500С 2Ø10, верхней (сжатой) зоны из арматуры класса А240 2Ø6. Поперечное армирование выполнено из холоднодеформируемой арматуры Ø5 класса Вр500, с шагом 50 мм в приопорной зоне и 130 мм в пролете. Для усиления торцевых участков балок использованы сетки из холоднодеформированной арматуры Ø5 мм класса Вр500.

Таблица №1. Программа экспериментальных исследований

Характер нагрузки	Статика		Динамика											
	–	+	–	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Тип опор	Жесткие опоры					Податливые опоры								
Стадия работы податливых опор	–	–	–	–	–	h	h	pl	pl	pl	h	pl	pl	pl
Длина податливых опор l , мм	–	–	–	–	–	20	40	60	80	100	50	100	160	180
Шифр образца	БС-1	БСР-2	БД-3	БДР-4	БДР-5	БДРПо-6	БДРПо-7	БДРПу-8	БДРПу-9	БДРПу-10	БДРПо-11	БДРПу-12	БДРПу-13	БДРПу-14

Примечание: pl – упругопластическая стадия, h – стадия отвердения.

Для получения и анализа данных о напряжённо деформированном состоянии на конструкциях был размещен комплекс измерительных приборов: для определения перемещений балки и смятия податливых опор – индуктивные датчики положения Wayson; для измерения ускорений – акселерометры; для определения реакции системы – датчик силоизмерительный ДСТ 4126; для определения величины опорных реакций динамометрические опоры; для отслеживания деформирования во времени применялась высокоскоростная камера с частотой съемки 2500 кад/с.

По результатам динамических испытаний образцов на жестких опорах (рисунок 4) установлено, что ограничение горизонтального смещения приводит к снижению перемещений балок на 38% по сравнению с конструкциями без распора, при этом время достижения их максимальных значений сокращается до 48%. Наблюдается увеличение опорных реакций балок с распором до 2,4 раза, которое сопровождается ранним развитием и достижением их экстремальных значений при кратковременном динамическом нагружении.

Для железобетонных балок с распором при кратковременном динамическом нагружении применение податливых опор, деформируемых в упругопластической стадии (рисунок 4, 5) приводит к снижению перемещений до 40% и опорных реакций до 60% относительно конструкций без распора. При упругопластическом деформировании податливых опор с отвердением установлена максимальная эффективность для балок с учетом распора при кратковременном динамическом нагружении, при этом снижение перемещений достигает до 81%, увеличивается время достижений максимальных значений измеряемых величин до 2 раз, что говорит о более пластичной работе системы «распорная конструкция-податливая опора». Однако, при более раннем переходе в стадию отверждения возможно увеличение перемещений по сравнению с упругопластическими податливыми опорами.

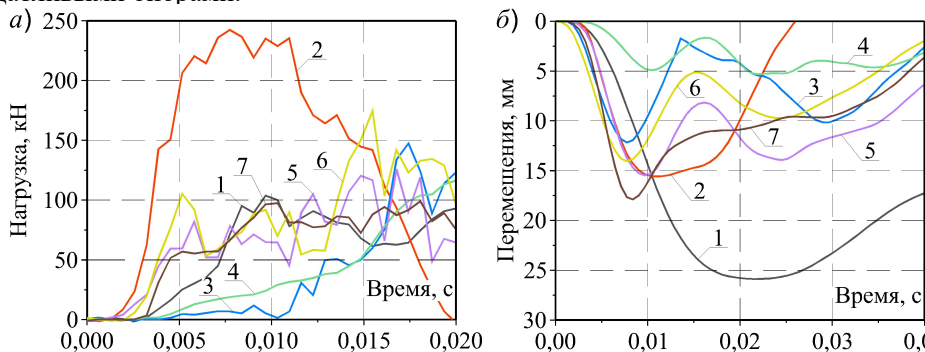


Рисунок 4 - Диаграммы изменения во времени опорных реакций (а) и перемещений (б) по результатам испытаний образцов БД-3(1), БДР-4(2), БДРПо-6(3), БДРПо-7(4), БДРПу-8(5), БДРПу-9(6), БДРПу-10(7) при кратковременном динамическом нагружении

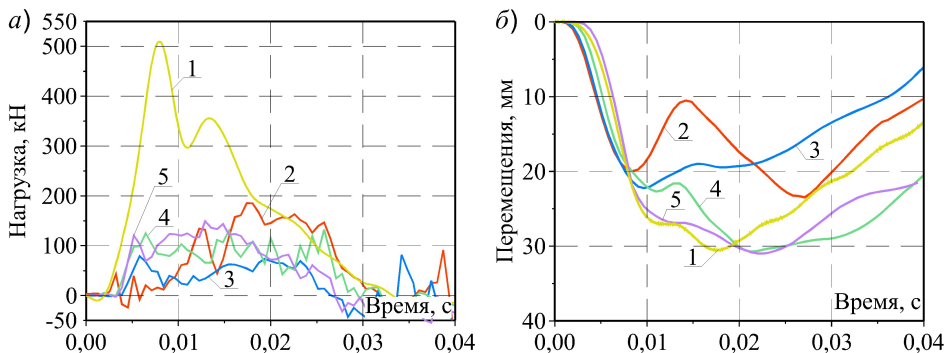


Рисунок 5 - Диаграммы изменения во времени опорных реакций (а) и перемещений (б) по результатам испытаний образцов БДР-5 (1), БДРПо-11(2), БДРПу-12(3), БДРПу-13(4), БДРПу-14(5) при кратковременном динамическом нагружении

В третий главе представлен разработанный аналитический метод динамического расчета железобетонных балок с распором на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении.

Расчет железобетонных балок рассмотрен в условно упругой и пластической стадиях работы. Деформирование податливых опор рассматривается в упругой стадии, пластической и стадии отверждения.

Для условно упругих и пластически деформируемых железобетонных балок закон изменения перемещений представлен в следующем виде

$$y_{j,s}^i(x, t) = p\bar{F}(x)T_{j,s}^i(t) + u_{j,s}^i(t), \quad (1)$$

где $u_{j,s}^i(t)$ – функция перемещений податливых опор; $F(x)$ – функция распределения перемещений, обусловленных деформированием балки; $T_{j,s}^i(t)$ – функция динамичности; $i = el, pl, h$ – индекс, принимаемый в зависимости от стадии работы податливой опоры: упругая (el), пластическая (pl) или стадия отвердения (h); $j = el, pl$ – индекс, принимаемый в зависимости от стадии работы балки: условно упругая (el), пластическая (pl); s – шаг счета.

Значения распора $H_{j,s}^i(t)$ и угла поворота конструкции на опорах $\varphi_{j,s}^i(t)$ на текущем шаге счета (s) определяется следующими выражениями

$$H_{j,s}^i(t) = \Delta H_{j,s}^i(t)/c \leq H_{max}, \quad (2)$$

$$\varphi_{j,s}^i(t) = \frac{d}{dx} y_{j,s}^i(x, t), \text{ при } x = 0, \quad (3)$$

где, $\Delta H_{j,s}^i(t)$ – горизонтальное смещение на j -й стадии деформирования балки и i -ой стадии работы податливых опор во времени на текущем этапе расчета (s); c – горизонтальная податливость конструкции на опоре по направлению реакции распора; H_{max} – максимальная величина распора, обусловленная жесткостью конструкции препятствующей горизонтальному смещению балки на опоре.

Уравнение движения балки с распором на податливых опорах в условно упругой стадии получено на основе принципа возможных перемещений в виде

$$\ddot{T}_{el,s}^i(t) + \omega_{H,el}^2 T_{el,s}^i(t) = \omega_1^2 p(t), \quad (4)$$

где, $\omega_{H,el} = \sqrt{\omega_1^2 + \frac{k}{1 + \frac{\pi^4}{2W_i}}}$ – частота собственных колебаний балки с распором;

$k = \frac{4\pi^2 z_s^2}{c m l^3}$ – коэффициент учитывающий податливость конструкции на опорах в

горизонтальном направлении; $\omega_1 = \omega / \sqrt{1 + \frac{\pi^4}{2W_i}}$ – частота собственных колеба-

ния балки на податливых опорах, $\omega = \frac{\pi^2}{l^2} \cdot \sqrt{\frac{B}{m}}$ – частота собственных колебания

балки на жестких опорах; $p(t)$ – закон изменения динамической нагрузки во времени; $W_i = \frac{g_i l^3}{B}$ – параметр, характеризующий соотношение жесткостей балки и податливых опор; g_i – жесткость податливых опор в i -той стадии их деформирования.

Условие перехода балки в пластическую стадию имеет вид $M \geq M_{el} = M(t_{el})$, где M_{el} – изгибающий момент, соответствующий концу условно упругой стадии; t_{el} – время конца условно упругой стадии деформирования балки.

Условие деформирования балки в пластической стадии принимается в следующем виде

$$M_{pl} = M_{el} + B_{pl}(\chi - \chi_{el}), \quad (5)$$

где B_{pl} – жесткость балки в пластической стадии; $\chi_{el} = -\frac{\partial^2 y_{el,s}^i(x, t_{el})}{\partial x^2}$ – кривизна

балки в конце упругой стадии деформирования; $\chi = -\frac{\partial^2 y_{pl,s}^i(x, t)}{\partial x^2}$ – кривизна балки в пластической стадии деформирования.

Уравнение движения балки с распором на податливых опорах в пластической стадии получено в виде:

$$\ddot{T}_{pl,s}^i(t) + \omega_{H,pl}^2 T_{pl,s}^i(t) = \omega_3^2(p(t) - k_{M1}), \quad (6)$$

В выражении (6) частоты собственных колебаний ω_3 , ω_4 , $\omega_{H,pl}$ и коэффициент k_{M1} , определяются следующим образом:

$$\omega_2 = \frac{\pi^2}{l^2} \sqrt{\frac{B_{pl}}{m} \left(1 - \frac{2\Delta}{l} + \frac{1}{\pi} \sin\left(\frac{2\pi\Delta}{l}\right)\right)}, \quad k_{M1} = \frac{\pi^2}{pl^2} M_{el} \left(1 - \frac{B_{pl}}{B_{el}}\right) \cos\left(\frac{\pi\Delta}{l}\right),$$

$$\omega_{H,pl} = \sqrt{\omega_4^2 + \frac{k}{1 + \frac{\pi^4}{2} \frac{\beta_2}{w_i}}}, \quad \omega_3 = \frac{\omega}{\sqrt{1 + \frac{\pi^4}{2} \frac{\beta_2}{w_i}}}, \quad \omega_4 = \frac{\omega_2}{\sqrt{1 + \frac{\pi^4}{2} \frac{\beta_2}{w_i}}}, \quad \beta_2 = \frac{\omega_2^2}{\omega^2}.$$

Для реализации метода расчета железобетонных балок с распором на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении разработан алгоритм и программа.

Метод расчета позволяет определять внутренние усилия, перемещения конструкции и податливых опор, коэффициент динамичности конструкции $k_d = T_{j,s}^i(t_{max})$ и реакцию распора при кратковременном динамическом нагружении.

Оценка достоверности предложенного метода выполнена на основе сопоставления результатов расчета балок по аналитическим зависимостям, предложенным профессорами Поповым Н.Н. и Расторгуевым Б.С. (рисунок 6), а также с экспериментальными данными. Результаты расчета перемещений балок с распором при разной жесткости опорного контура, характеризующейся параметром c_1 ($c_1 = cE_b b h_0 / l$) на действие мгновенно нарастающей кратковременной динамической нагрузки близко совпадают с результатами расчета полученными на основе существующего аналитического метода.

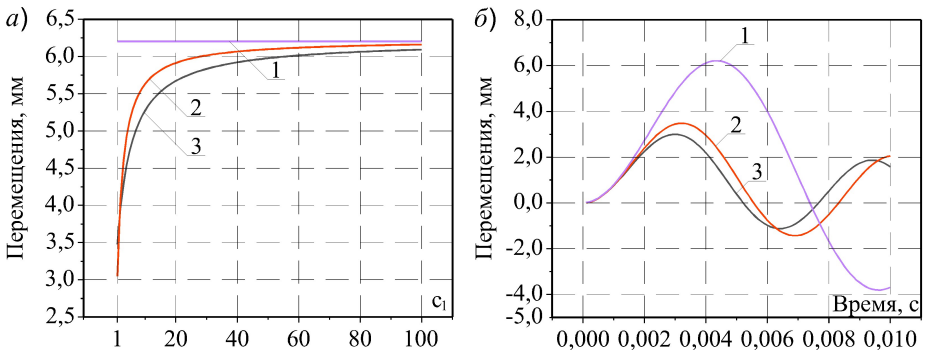


Рисунок 6 – Упругий прогиб балки с распором в середине её пролета при кратковременном динамическом нагружении вида $p(t) = p(1 - t/\theta)$ в зависимости от параметра c_1 (а) и во времени при $c_1 = 1$ (б): шарнирно опертая балка без распора (1), шарнирно опертая балка с распором на основании метода предложенного Поповым Н.Н., Расторгуевым Б.С. (2), шарнирно опертая балка с распором на основе разработанного метода расчета (3)

Полученные расчетные величины удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными для балок с распором на податливых опорах, что подтверждает обоснованность принятых предпосылок метода расчета, а также полученных аналитических зависимостей.

В четвертой главе представлены результаты численных исследований балок с распором на податливых и жестких опорах при кратковременном динамическом нагружении на основе разработанного метода расчета.

Установлено, что наличие распора в условно упругих и упругопластических балках на жестких опорах (рисунок 7, 8) при кратковременном динамическом нагружении приводит к снижению величины коэффициента динамичности $k_{d,H}$. Эффективность учета распора (c_1) для балок на жестких опорах увеличивается с ростом $\omega\theta$ ($\omega\theta_1$). Максимально возможное снижение коэффициента динамичности $k_{d,H}$ составляет до 50% при $c_1 = 1$.

При пластическом деформировании балок с распором (рисунок 8) эффективность распора выше, чем при условно упругом (рисунок 7, а), что объясняется возрастанием реакции распора за счет увеличения деформативности конструкции в пластической стадии. Существенное влияние в этом случае оказывает время перехода t_{el} конструкции из условно упругой в пластическую стадию, с уменьшением которого эффективность влияния распора увеличивается.

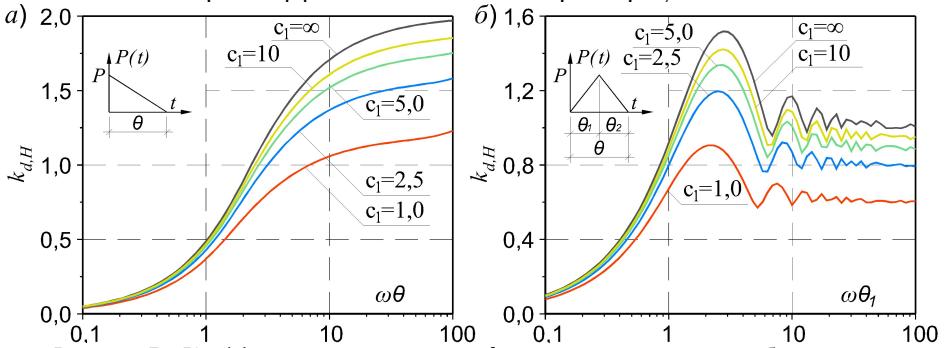


Рисунок 7 - Коэффициент динамичности $k_{d,H}$ для условно упругих балок на жестких опорах с распором в зависимости от параметра c_1 ($c_1 = cE_b b h_0 / l$) при действии мгновенно (а) и постепенно (б) нарастающих ($\theta_1 = \theta_2$) кратковременных динамических нагрузках

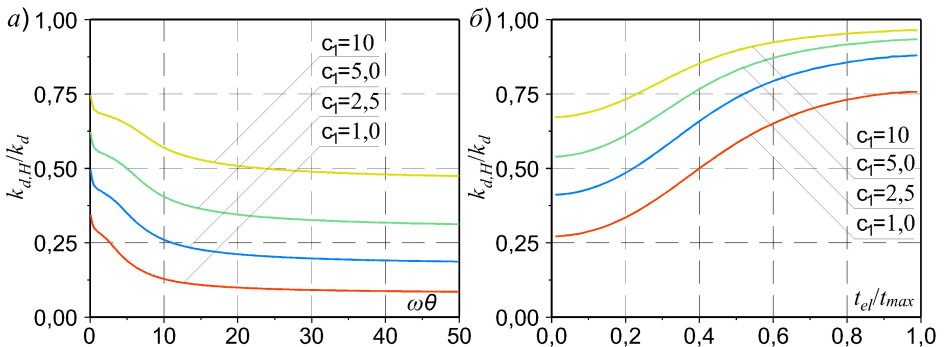


Рисунок 8 - Изменение $k_{d,H}/k_d$ в зависимости от $\omega\theta$ (а) и t_{el}/t_{max} (б) железобетонных балок с распором в пластической стадии при действии мгновенно нарастающей нагрузки

Применение упругих ($i = el$) податливых опор ($W_{el} = 1 \dots 100$) приводит к снижению коэффициента динамичности для балок с распором ($k_{d,Hsy}$) на всем диапазоне $\omega\theta$ для мгновенно нарастающей нагрузки относительно балок на жестких опорах (рисунок 9, а). При постепенном нарастании динамической нагрузки

наличие податливых опор постоянной жесткости (W_{el}) приводит к снижению коэффициента динамичности в диапазоне $\omega\theta_1 = 0,1 \dots 6$ (рисунок 9, б), то есть чем ниже W_{el} , тем при большем значении частотно временного параметра $\omega\theta_1$ величина коэффициента динамичности $k_{d,HSY}$ достигает максимального значения.

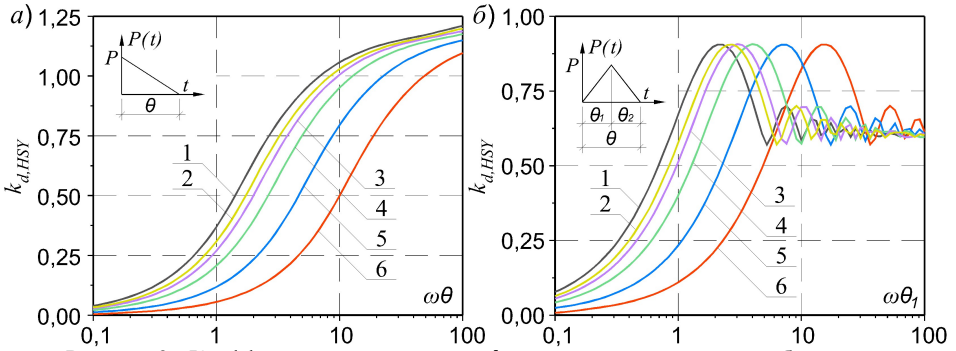


Рисунок 9 - Коэффициент динамичности $k_{d,HSY}$ для условно упругих балок с распором ($c_1 = 1$) для мгновенно (а) и постепенно (б) нарастающих кратковременных динамических нагрузок: жесткие опоры (1); податливые опоры $W_{el} = 100$ (2); податливые опоры $W_{el} = 50$ (3); податливые опоры $W_{el} = 20$ (4); податливые опоры $W_{el} = 5$ (5); податливые опоры $W_{el} = 1$ (6)

При переходе податливой опоры в пластическую стадию основным фактором определяющим максимальное снижение коэффициента динамичности $k_{d,SY}(k_{d,HSY})$ для условно упругих балок с распором и без него является время перехода $t_{SY,el} = (0,01 \dots 0,99)t_{max}$ (рисунок 10). Наличие распора для балок на упругопластических податливых опорах позволяет не только снизить коэффициент динамичности, но и расширить область положительных значений $k_{d,SY}(k_{d,HSY})/k_d < 1$ на всем диапазоне $t_{SY,el}/t_{max}$. Учет реакции распора, например при $c_1 = 1$ (рисунок 10, б), для железобетонных балок на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении позволяет снизить $k_{d,HSY}/k_d$ по сравнению с $k_{d,SY}/k_d$ до 30%.

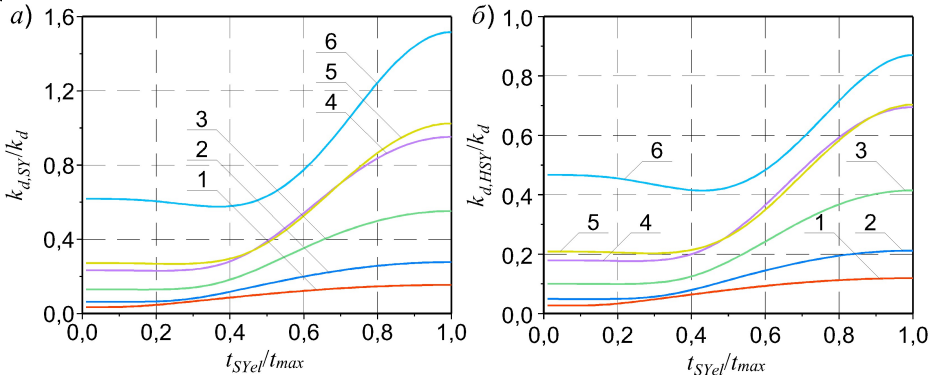


Рисунок 10 - Изменение $k_{d,SY}/k_d$ и $k_{d,HSY}/k_d$ в зависимости от $t_{SY,el}/t_{max}$ для условно упругих балок без распора ($c_1 = \infty$) (а) и с распором ($c_1 = 1$) (б) на податливых опорах ($W_{el} = 1$) под действием постепенно нарастающей динамической нагрузки ($\theta_1 = \theta_2$) при: $\omega\theta_1 = 1$ (1); $\omega\theta_1 = 3$ (2); $\omega\theta_1 = 5$ (3); $\omega\theta_1 = 7$ (4); $\omega\theta_1 = 10$ (5); $\omega\theta_1 = 20$ (6)

Переход податливых опор из пластической стадии в отверждение сопровождается резким ростом коэффициента динамичности $k_{d,SY}(k_{d,HSY})$ (рисунок 11). Это объясняется тем, что в момент наступления стадии отверждения происходит резкое снижение скорости балки, в результате чего к действующим нагрузкам добавляются инерционные воздействия.

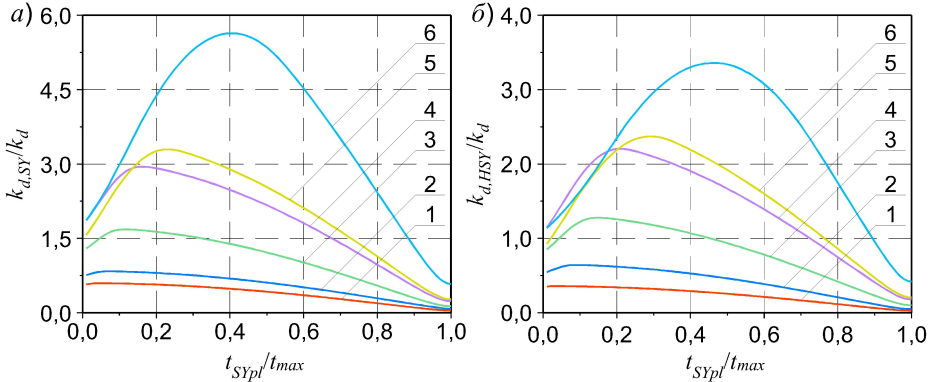


Рисунок 11 - Изменение $k_{d,SY}(k_{d,HSY})/k_d$ в зависимости от t_{SYpl}/t_{max} железобетонных балок без распора ($c_1 = \infty$) (а) и с распором ($c_1 = 1$) (б) на податливых опорах ($W_{el} = 1$) под действием постепенно нарастающей динамической нагрузки ($\theta_1 = \theta_2$) при: $\omega\theta_1 = 1(1)$; $\omega\theta_1 = 3(2)$; $\omega\theta_1 = 5(3)$; $\omega\theta_1 = 7(4)$; $\omega\theta_1 = 10(5)$; $\omega\theta_1 = 20(6)$.

При пластическом деформировании балок на податливых опорах в пластической стадии учет реакции распора позволяет снизить коэффициент динамичности до 5 раз. При этом существенное влияние оказывает время перехода конструкции из условно упругой в пластическую стадию (рисунок 12), а также время перехода податливых опор из упругой стадии в пластическую ($t_{SY,el}$) и в стадию отверждения ($t_{SY,pl}$). Установлено, что переход в стадию отверждения позволяет снизить до 50% коэффициент динамичности $k_{d,HSY}$ по сравнению с упругопластическими опорами, что дает возможность проектировать податливые опоры с возможностью перехода в стадию отверждения, обеспечивающие снижение усилий и перемещений конструкций с учетом реакции распора.

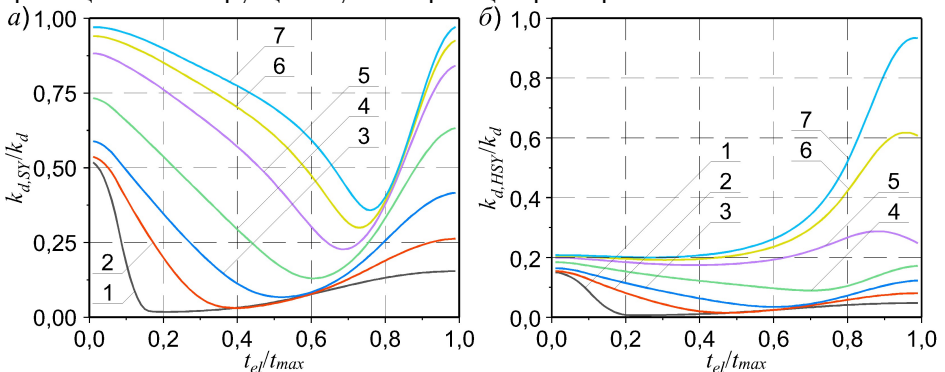


Рисунок 12 - Изменение $k_{d,HSY}/k_d$ и $k_{d,SY}/k_d$ в зависимости от t_{el}/t_{max} при $\omega\theta_1 = 1$ для железобетонных балок на податливых опорах ($W_{el} = 1$) при действии постепенно нарастающей нагрузки при $c_1 = \infty$ (а), $c_1 = 1$ (б): $\theta_2/\theta_1 = 1(1)$; $\theta_2/\theta_1 = 5(2)$; $\theta_2/\theta_1 = 10(3)$; $\theta_2/\theta_1 = 20(4)$; $\theta_2/\theta_1 = 50(5)$; $\theta_2/\theta_1 = 100(6)$; $\theta_2/\theta_1 = 200(7)$

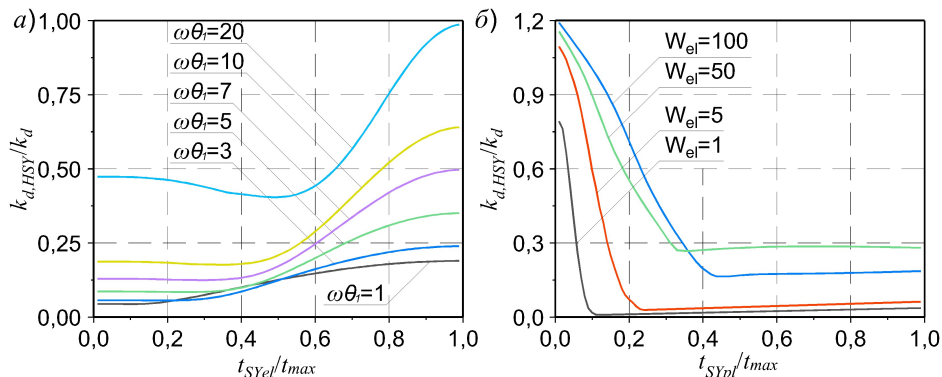


Рисунок 13 - Изменение $k_{d,HSY}/k_d$ в зависимости от $t_{SY,el}/t_{max}$ (a) и $t_{SY,pl}/t_{max}$ (б) для железобетонных балок с распором ($c_1 = 1$) на податливых опорах ($W_{el} = 1$) при действии постепенно нарастающей нагрузки ($\theta_2/\theta_1 = 1$)

Совместный учет реакции распора и податливости опор позволяет существенно снизить величину коэффициента динамичности конструкции. Наиболее эффективными являются податливые опоры, деформирующиеся в упругопластической стадии с переходом в стадию отвердения при упругопластическом деформировании балки. В целом можно отметить, что совместное влияние податливости опор и распора позволяет повысить сопротивление железобетонных конструкций действию интенсивных динамических нагрузок.

В приложениях к диссертации приведены: патенты на изобретения РФ и Евразийского патентного ведомства, полезные модели РФ; документы, подтверждающие внедрение результатов диссертационной работы; пример расчета железобетонной балки с распором на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Разработан численно-аналитический метод динамического расчета железобетонных балок с распором на податливых опорах при различных расчетных законах изменения кратковременной динамической нагрузки, учитывающий стадии деформирования конструкции и податливых опор, жесткость опорного контура, препятствующего горизонтальному смещению балки на опорах, время перехода опоры из упругой стадии в пластическую и стадию отвердения. Предложенный метод позволяет проводить расчеты железобетонных балок с распором, деформирующихся в условно-упругой и пластической стадиях, при работе опор в упругой стадии, пластической и стадии отвердения.

2. Разработанный метод расчета и алгоритм реализованы в программном пакете «Marle». Метод позволяет с точностью, достаточной для решения практических задач, определять величины, характеризующие процесс динамического деформирования балок с распором (распор на всех стадиях динамического деформирования, деформации балки и внутренние усилия, деформации податливых опор). Отклонения результатов расчета от экспериментальных данных для балок с распором на податливых опорах составили: по перемещениям балки до 12%; по деформациям податливых опор до 11%; для времени достижения предельных значений прогибов до 20%. Результаты расчета перемещений балок с распором при разной жесткости опорного контура на мгновенно нарастающую

кратковременную динамическую нагрузку близко совпадают с результатами расчета, полученными на основе аналитического метода, разработанного профессорами Поповым Н.Н. и Расторгуевым Б.С. Отклонения составили до 10%.

3. Разработана программа и методика экспериментальных исследований железобетонных балок с распором на податливых опорах при статическом и кратковременном динамическом нагружении. Оригинальность конструктивных решений стендов для статических и динамических испытаний подтверждается двенадцатью патентами: тремя на изобретение РФ, тремя на изобретение Евразийского патентного ведомства, а также патентами на полезную модель.

4. Проведенные экспериментальные исследования железобетонных балок с распором на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении позволили получить новые опытные данные, характеризующие напряженно-деформированное состояние конструкций, реакцию распора, амплитуды перемещений и ускорений при различных стадиях деформирования податливых опор (упругая, упругопластическая и стадия отвердения). Опытные данные позволили оценить степень влияния вертикальной податливости опорных закреплений на динамическую прочность и деформативность железобетонных балок с распором.

5. На основе экспериментальных исследований податливых опор в виде сминаемых вставок кольцевого сечения при кратковременном динамическом нагружении получены диаграммы их динамического сопротивления. Установлено, что при динамическом нагружении имеются качественные и количественные отличия параметров диаграммы деформирования по сравнению с параметрами статического сопротивления опор. В начале пластической стадии динамического деформирования, в пределах 30...50 % от общей пластической деформации опор, жесткость податливых опор превышает статическое значение в 7...9 раз. Дальнейшее динамическое деформирование податливых опор происходит при жесткостях практически равных статическому значению. Величина динамической реакции податливых опор в стадии отвердения ниже реакции жестких опор, что обусловлено энергоемкостью опор в упругой и пластической стадиях их сопротивления.

6. Экспериментально установлено, что наличие реакции распора в железобетонных балках при кратковременном динамическом нагружении приводит к увеличению их несущей способности и снижению деформативности. Так для балок с распором на жестких опорах перемещения уменьшились на 38 % в сравнении с конструкциями, испытанными без распора. При этом для образцов с распором время динамического деформирования снизилось на 48%, опорная реакция конструкции от внешнего воздействия увеличилась в 2 раза.

7. Для балок с распором при упругопластическом деформировании податливых опор при кратковременном динамическом нагружении наблюдается снижение перемещений конструкции (без учета деформаций опор) до 40 % в сравнении с образцами на жестких опорах без распора и до 30 % для балок с распором. При этом перемещения системы «распорная конструкция-податливая опора» сопоставимы с деформацией балки на жестких опорах. Для балок с распором при деформировании податливых опор в пластической стадии уменьшается величина реакции распора до 56%, увеличивается время пластического деформирования конструкции. Для балок с распором при упругопластическом деформировании податливых опор с отвердением при кратковременном динамическом нагружении наблюдается максимальное снижение перемещений до 81% относительно конструкций на жестких опорах. Стоит отметить, что при деформировании податливых опор в стадии отвердения более ранний их переход в данную стадию приводит к увеличению перемещений в 2,6 раза.

8. Выполнен анализ влияния распора на прочность и деформативность железобетонных балок на жестких опорах при мгновенно и постепенно нарастающих кратковременных динамических нагрузках на основании разработанного метода расчета. Установлено, что реакция распора оказывает значительное влияние на железобетонные балки на жестких опорах за счет снижения коэффициента динамичности, как при условно упругой, так и пластической стадии деформирования конструкции. Показано, что наибольшее влияние на прочность балок распор оказывает в пластической стадии, за счет увеличения деформации конструкции. Максимальное влияние на коэффициент динамичности балок с распором при кратковременном динамическом нагружении оказывает соотношение жесткостей конструкции, ограничивающей горизонтальное смещение, и продольной жесткости балки $c_1 = 1 \dots 15$, а при деформировании в пластической области также время перехода балки из условно упругой в пластическую стадию деформирования t_{el} , со снижением которого эффективность становится выше.

9. Выполненные расчеты условно упругих железобетонных балок с распором на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении позволили теоретически оценить степень совместного влияния распора и вертикальной податливости опор на коэффициент динамичности конструкций, а, следовательно, на усилия и перемещения балок. Установлено, что применение податливых опор в распорных конструкциях приводит к большему снижению коэффициента динамичности конструкции по сравнению с балками без распора на податливых опорах и балками с распором на несмещаемых опорах. Снижение коэффициента динамичности $k_{a,HSY}$, относительно значения k_d достигает до: 90% – в упругой стадии деформирования опор; 97% – в упругопластической стадии деформирования опор; 33% – в упругопластической стадии с отвердением. При этом установлено, что учет влияния сил распора в конструкциях на податливых опорах приводит не только к снижению величины коэффициента динамичности, но и к расширению диапазона значений $\omega\theta(\omega\theta_1)$ на всех стадиях динамического сопротивления податливой опоры, в пределах которого наблюдается снижение $k_{a,HSY}$, что свидетельствует о расширении области эффективного применения податливых опор в распорных системах. Расширение диапазона $\omega\theta(\omega\theta_1)$ достигает до: 75% – в упругой стадии деформирования опор; 30% – в упругопластической стадии деформирования опор; 60% – в упругопластической стадии с отвердением.

10. При пластическом деформировании железобетонных балок с распором на податливых опорах установлено, что на величину коэффициента динамичности конструкции оказывает значительное влияние время перехода конструкции из упругой в пластическую стадию деформирования. Разработанный метод расчета позволяет определять время перехода конструкции в пластическую стадию t_{el} , при котором происходит максимальное снижение усилий и перемещений балки с распором на податливых опорах. Подбор времени t_{el} позволяет снизить коэффициент динамичности балок в зависимости от горизонтальной податливости конструкции c_1 и жесткости податливых опор W_{el} от 15 до 90%. Также установлено, что переход податливой опоры в стадию отвердения не приводит к резкому росту коэффициента динамичности конструкций, что позволяет проектировать балки с распором на податливых опорах с возможностью их деформирования в стадии отвердения.

Заключение

В настоящей работе рассмотрены вопросы оценки прочности и деформативности железобетонных балок с распором на податливых опорах при кратковременном динамическом воздействии. Экспериментальные исследования изгибаемых железобетонных балок распором на податливых опорах позволили установить особенности их деформирования и наступления предельного состояния при кратковременном динамическом воздействии. Разработан численно-аналитический метод расчета железобетонных балок с распором на податливых опорах при различных расчетных законах изменения кратковременной динамической нагрузки, учитывающий стадии деформирования конструкции и податливых опор, жесткость опорного контура, препятствующего горизонтальному смещению балки на опорах, время перехода опоры из упругой стадии в пластическую и стадию отвердения.

Дальнейшее развитие исследований Дальнейшее развитие исследований может быть направлено на экспериментально-теоретическое изучение прочности и деформативности железобетонных опертых по контуру плит с распором на податливых опорах с учетом: соотношения жесткостей опоры и конструкции, жесткости опорного контура, препятствующего горизонтальному смещению конструкций на опорах, модификациями податливых опорных устройств.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, включенных в перечень ВАК

1. *Галаяутдинов, Д.Р.* Численно-экспериментальные исследования податливых опор при кратковременном динамическом нагружении / *З.Р. Галаяутдинов, Д.Р. Галаяутдинов, М.В. Гандзий* // Вестник Томского гос. архит.-строит. ун-та. – Томск. – 2018. – № 4. – С. 103 – 110.
2. *Галаяутдинов, Д.Р.* Экспериментальные исследования железобетонных балок с распором на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении / *О.Г. Кумпяк, Д.Р. Галаяутдинов* // Вестник Томского гос. архит.-строит. ун-та. – Томск. – 2021. – № 6. – С. 143 – 156.
3. *Галаяутдинов, Д.Р.* Динамический расчет железобетонных балок на податливых опорах за пределами упругости / *З.Р. Галаяутдинов, О.Г. Кумпяк, Д.Р. Галаяутдинов, Е.В. Шипилова* // Строительная механика и расчет сооружений. – Москва. – 2022. – № 5. – С. 33 – 41.
4. *Галаяутдинов, Д.Р.* Метод расчета железобетонных балок с распором на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении / *О.Г. Кумпяк, Д.Р. Галаяутдинов* // Вестник Томского гос. архит.-строит. ун-та. – Томск. – 2022. – № 5. – С. 81 – 97.
5. *Галаяутдинов, Д.Р.* Определение параметров живучести защищенных ответственных строительных конструкций при ударно-волновом нагружении / *Г.И. Однокопылов, О.Г. Кумпяк, З.Р. Галаяутдинов, Д.Р. Галаяутдинов* // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – Томск. – 2019. – Т. 330, – № 4. – С. 110 – 125.

Статьи в журналах, индексируемых в Scopus и Web of Science

6. *Galyautdinov, D.R.* Experimental study of beams on yielding supports with thrust / *O.G. Kumpyak, Z.R. Galjautdinov, D.R. Galyautdinov* // MATEC Web of Conferences 143, 01016 (2018); doi: 10.1051/1.4973016
7. *Galyautdinov, D.R.* The deformability of the stress-strained concrete strips between the cracks during the short-term dynamic loading / *O.G. Kumpyak, Z.R.*

Galjautdinov, D.R. Galyautdinov // International Scientific Practical Conference «Materials science, shape-generating technologies and equipment 2020» (ICMSSTE 2020). – 2020. – Vol. 315. – P. 1 – 7. (DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/202031507002>)

8. *Galyautdinov, D.R.* The study of the ferroconcrete beams with thrust on the foil bearings during short-term dynamic loading / *O.G. Kumpyak, D.R. Galyautdinov* // International Scientific Practical Conference «Materials science, shape-generating technologies and equipment 2020» (ICMSSTE 2020). – 2020. – Vol. 315. – P. 1 – 7. (DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/202031507003>)

9. *Galyautdinov, D.R.* Assessment of energy efficiency of yielding supports for reinforced concrete beams under dynamic loading / *O.G. Kumpyak, Z.R. Galjautdinov, D.R. Galyautdinov* // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering/ doi:10.1088/1757-899X/911/1/012012

10. *Galyautdinov, D.R.* The degree of survivability of building structures under dynamic loading / *D.U. Sarkisov, D.R. Galjautdinov, N.A. Zbojkova* // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering/ doi: 10.1088/1742-6596/1967/1/012052.

Патенты на изобретения и полезные модели

11. *Галаяутдинов, Д.Р.* Стенд для испытания железобетонного элемента на кратковременное динамическое воздействие / *О.Г. Кумпяк, Г.И. Однокопылов, З.Р. Галаяутдинов, Д.Р. Галаяутдинов, Н.В. Меццулов* // Евразийский патент на изобретение № 027864 от 29.09.2017. Заявка 201600192 от 01 марта 2016 г. – 4 с.

12. *Галаяутдинов, Д.Р.* Способ испытания и определения степени живучести железобетонной конструкции при сверхнормативном однократном динамическом воздействии / *О.Г. Кумпяк, Г.И. Однокопылов, З.Р. Галаяутдинов, В.Б. Максимов, Д.Р. Галаяутдинов* // Евразийский патент на изобретение № 030362 от 31.07.2018. Заявка 201600420 от 17 мая 2016 г. – 4 с.

13. *Галаяутдинов, Д.Р.* Способ испытания строительной конструкции при сверхнормативной кратковременной динамической нагрузке / *О.Г. Кумпяк, Г.И. Однокопылов, Д.Ю. Саркисов, П.А. Радченко, Д.Р. Галаяутдинов, Е.А. Бутузов* // Евразийский патент на изобретение № 033840 от 02.12.2019. Заявка 201800576 от 29 октября 2018 г. – 4 с.

14. *Галаяутдинов, Д.Р.* Система защиты строительных конструкций от сверхнормативных взрывных, ударных и сейсмических воздействий / *О.Г. Кумпяк, Г.И. Однокопылов, З.Р. Галаяутдинов, В.Б. Максимов, Д.Р. Галаяутдинов* // Патент на изобретение № 2649207 от 30.03.2018. Заявка 2017103610 от 02 февраля 2017 г. – 4 с.

15. *Галаяутдинов, Д.Р.* Способ испытания строительной конструкции на податливых опорах с распором при сверхнормативном ударном воздействии / *О.Г. Кумпяк, Г.И. Однокопылов, З.Р. Галаяутдинов, Д.Ю. Саркисов, Д.Р. Галаяутдинов* // Патент на изобретение № 2698517 от 28.08.2018. Заявка 2018145189 от 18 декабря 2018 г. – 4 с.

16. *Галаяутдинов, Д.Р.* Способ испытания строительной конструкции при сверхнормативном ударном воздействии / *О.Г. Кумпяк, Г.И. Однокопылов, З.Р. Галаяутдинов, Д.Ю. Саркисов, Д.Р. Галаяутдинов* // Патент на изобретение № 2695590 от 24.07.2019. Заявка 2018143205 от 05 декабря 2018 г. – 4 с.

17. *Галаяутдинов, Д.Р.* Стенд для испытания железобетонных элементов с фиксированной степенью горизонтального обжатия на кратковременный дина-

мический изгиб / *О.Г. Кумпяк, Г.И. Однокопылов, З.Р. Галяутдинов, Д.Р. Галяутдинов* // Патент на полезную модель № 147262 от 30.09.2014. Заявка 2014124076 от 11 июня 2014 г. – 4 с.

18. *Галяутдинов, Д.Р.* Стенд для испытания железобетонных элементов с фиксированной степенью горизонтального обжатия на статический изгиб / *О.Г. Кумпяк, Г.И. Однокопылов, З.Р. Галяутдинов, Д.Р. Галяутдинов* // Патент на полезную модель № 148401 от 10.12.2014. Заявка 2014124071 от 11 июня 2014 г. – 16 с.

19. *Галяутдинов, Д.Р.* Устройство для измерения опорных реакций / *В.С. Плевков, Г.И. Однокопылов, Н.В. Мещеулов, К.Л. Кудяков, А.В. Невский, Д.Р. Галяутдинов* // Патент на полезную модель № 156561 от 10.11.2015. Заявка 2015123076 от 16 июня 2015 г. – 7 с.

20. *Галяутдинов, Д.Р.* Стенд для динамических испытаний изгибаемых железобетонных элементов / *В.С. Плевков, Г.И. Однокопылов, Н.В. Мещеулов, К.Л. Кудяков, А.В. Невский, Д.Р. Галяутдинов* // Патент на полезную модель № 158496 от 10.01.2016. Заявка 2015134838 от 18 августа 2015 г. – 16 с.

21. *Галяутдинов, Д.Р.* Устройство для измерения опорных реакций / *О.Г. Кумпяк, Г.И. Однокопылов, Н.В. Мещеулов, К.Л. Кудяков, А.В. Невский, Д.Р. Галяутдинов* // Патент на полезную модель № 161908 от 05.10.2016. Заявка 2015152758 от 12 августа 2015 г. – 7 с.

22. *Галяутдинов, Д.Р.* Устройство для измерения опорной реакции с податливой опорой / *О.Г. Кумпяк, Г.И. Однокопылов, З.Р. Галяутдинов, Н.В. Мещеулов, Д.Р. Галяутдинов* // Патент на полезную модель № 176603 от 24.01.2018. Заявка 2017138884 от 16 июня 2015 г. – 7 с.

Статьи в других печатных изданиях

23. *Галяутдинов, Д.Р.* Исследования балок на податливых опорах с распором / *О.Г. Кумпяк, Д.Р. Галяутдинов* // Современные методы расчета железобетонных и каменных конструкций по предельным состояниям «Полейтовские чтения – 150» (Москва, 30 ноября 2018 г.). – 2018. – С. 197 – 201.

24. *Галяутдинов, Д.Р.* Прочность и деформативность железобетонных балок с распором на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении / *О.Г. Кумпяк, З.Р. Галяутдинов, Д.Р. Галяутдинов* // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения: Материалы Международных академических чтений (г. Курск, 18 ноября 2020г.) / под ред. проф. С.И. Меркулова: М-во науки и высш. образов. Рос. Федерации, Курский гос. ун-т – ЗАО «Университетская книга», 2020. – С. 167 – 174.

25. *Галяутдинов, Д.Р.* Оценка энергоэффективности применения податливых опор для железобетонных балок / *О.Г. Кумпяк, З.Р. Галяутдинов, Д.Р. Галяутдинов* // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения: Материалы Международных академических чтений (г. Курск, 18 ноября 2020г.) / под ред. проф. С.И. Меркулова: М-во науки и высш. образов. Рос. Федерации, Курский гос. ун-т – ЗАО «Университетская книга», 2020. – С. 174 – 179.

Подписано в печать 23.01.2023. Формат 60×84.
Бумага офсет. Гарнитура Таймс. Уч.изд. л. 1,15
Тираж 130 экз. Заказ № 389.

Изд-во ФГБОУ ВО «ТГАСУ», 643003, г. Томск, пл. Соляная, 2.
Отпечатано с оригинал-макета автора в ООП ФГБОУ ВО «ТГАСУ».
634003, г. Томск, ул. Партизанская, 15.