

На правах рукописи

Землянухин Александр Дмитриевич

**РАЗВИТИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ
МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ФЛАНЦЕВЫХ ПОДАТЛИВЫХ УЗЛОВ
ПРИМЫКАНИЯ БАЛОК К КОЛОННАМ**

2.1.1 – Строительные конструкции, здания и сооружения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (ПНИПУ).

Научный руководитель	Кашеварова Галина Геннадьевна член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, профессор
Официальные оппоненты:	Зверев Виталий Валентинович доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», кафедра металлических конструкций, профессор Лампси Борис Борисович кандидат технических наук, доцент ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет», кафедра теории сооружений и технической механики, заведующий кафедрой
Ведущая организация:	ФГБОУ ВО Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова

Защита диссертации состоится 17 сентября 2025 г. в 10 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Пермского национального исследовательского политехнического университета Д ПНИПУ.05.20 по адресу: 614010, г. Пермь, ул. Куйбышева, 109, ауд. 202.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (<http://pstu.ru>).

Автореферат разослан «___» _____ 2025 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д ПНИПУ 05.20
кандидат технических наук, доцент

О.В. Третьякова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В промышленном и гражданском строительстве здания с несущим металлическим каркасом занимают значительную долю строительного рынка. Общее развитие стальных конструкций направленно на повышение заводской готовности, снижение количества сварочных работ непосредственно на строительной площадке. Фланцевые соединения характеризуются высокой скоростью монтажа, надежностью и устойчивы к динамическим нагрузкам.

В настоящее время металлические конструкции в России чаще реализуются в зданиях промышленного и общественного назначения, реже в гражданских зданиях, с малыми по сравнению с промышленными зданиями пролетами и расчетными длинами колонн. Связано это с устаревшей нормативной базой и отсутствием опыта проектирования жилых зданий на стальном каркасе. Устаревшая нормативная база, зачастую, не позволяет рационально выполнять соединения и примыкания несущих элементов. Так серия 2.440-2 имеет ограничение по сочленению ригелей с колонной и не позволяет, например, соединить балку 30Ш с колонной 26К. Приведенные в серии 2.440-2 узлы имеют множество усиливающих конструктивных элементов (вуты, обратные фланцы, ребра жесткости). Вписать подобный узел в помещение прямоугольной формы, практически невозможно.

Выход обновленного сортамента прокатных двутавров в 2017 г. значительно расширил возможности использования стали в строительстве жилых зданий. Широкая номенклатура профилей позволяет экономно подбирать требуемую несущую способность балки, не меняя габариты сечения. Основным преимуществом новой линейки прокатных профилей является: увеличение толщины стенки двутавра, что позволяет проектировать узлы без дополнительных ребер; расширение номенклатуры балок и колонн с сохранением принципиально важных размеров сечения. Удобство при стыковке в двутаврах колонн обеспечивается одинаковым внутренним размером между полками, а в балках – габаритной высотой сечения.

Одной из наиболее распространенных конструктивных схем зданий является рамно-связевый каркас. При проектировании подобных каркасов, узлы сопряжения ригелей с колоннами считают, как правило, либо абсолютно жесткими, либо идеальными шарнирами. В действительности узлы обладают податливостью, что подтверждается многочисленными исследованиями. Пренебрежение податливостью узлов может привести к существенным ошибкам при выполнении статического расчета каркаса. Отсутствие возможной пластичности снижает способность соединения рассеивать колебания, вызванные, например, динамическими или сейсмическими нагрузками. Учитывать податливость узла нужно, а в многоэтажных зданиях, эксплуатируемых в сейсмоопасных районах, необходимо.

Требования норм к расчетному обоснованию принятых решений обязывает проектировщика использовать апробированные методы, учитывать геометрическую и физическую нелинейность. Но актуальные решения и

соответствующие рекомендации по применению фланцевых узлов в действующих нормах отсутствуют. Для развития эффективных методов расчета фланцевых соединений требуются дополнительные исследования жесткостных и прочностных характеристик узлов для выявления закономерностей влияния типа применяемых узлов на несущую способность стальных конструкций.

Степень разработанности темы. Широкое применение податливых узлов началось еще в СССР. В сборных железобетонных каркасах использовались податливые сопряжения ригеля с колонной. Каркас с податливыми узлами также относится к рамной конструктивной схеме, при этом сочетает в себе достоинства каркасов с жесткими и каркасов с шарнирными узлами.

Исследованию напряженно-деформированного состояния фланцевых узлов соединения стальных конструкций посвящены экспериментальные работы и теоретические исследования многих отечественных и зарубежных ученых: Катюшина В.В., Стрелецкого Н.С., Криксунова Э.З., Перельмутера А.В., Юрченко В.В., Семенова А. А., Кони́на Д.В., Исаева С. А. Алпатов В.Ю., Соловьева А.В., Со́на М.П., Холопова И.С., Шафрай К. А., Надольского В.В., Грудев И.Д., Ведяков И.И., Гладштейн И.Л., Каленов В. В., E.L. Grimsno, A.H. Clausen, A. Aalberg, M. Langseth, K Al Fakih, S C Chin, Pisarek Z., Mohsen Gerami, Hamid Saberi, Bo Yang, Kang Hai Tan, A. Kozlowski, Sumner E.A., Murray T.M., Pisarek Z., Urbonas K., Daniunas A. и др., в которых рассматривается применение фланцевых соединений, воспринимающих различные сочетания сосредоточенных сил и изгибающих моментов.

Цель работы состоит в развитии эффективных методов расчета несущей способности фланцевых соединений на основе экспериментальных и численных методов с целью разработки оптимальных узлов примыкания балки к колонне.

Задачи исследования:

1. Построение расчетной модели узла фланцевого соединения балки с колонной.
2. Проведение серии натурных испытаний образцов фланцевых соединений.
3. Компьютерное моделирование процесса деформирования и разрушения образцов, сравнительный анализ результатов, полученных в вычислительных и натурных экспериментах.
4. Оценка соответствия расчетной модели фланцевого соединения результатам натурного эксперимента (валидация расчетной модели).
5. Разработка методики аналитического расчета податливых фланцевых узлов, примыкания балки к колонне.
6. Сравнение результатов вычислительных экспериментов с компонентным методом расчета.
7. Верификация аналитической и численной методик расчета податливых узлов.

Научная новизна заключается в том, что:

1. Разработано новое конструктивное решение податливых узлов примыкания балки к колонне. Данное решение позволяет повысить несущую способность изгибаемых балок, в сравнении с шарнирным или жестким примыканием балки к колонне.
2. Предложен алгоритм определения предельной несущей способности двутавров при действии поперечных сил в узлах примыкания балки к колонне.
3. Установлена степень влияния толщины фланца на общую жесткость узла.

Теоретическая и практическая значимость работы. Разработанные в диссертации положения и алгоритмы решения поставленных задач, проведенные экспериментальные исследования позволяют снизить металлоемкость стальных конструкций, повысить эффективность применения фланцевых соединений. Результаты работы могут быть использованы при расчете и конструировании податливых узлов примыкания балки к колонне.

Методология и методы исследования. В работе использованы теоретические (аналитические и численные) и экспериментальные методы исследования. Решения задач базируются на известных теоретических положениях и принципах строительной механики, теории сопротивления материалов, математического моделирования и экспериментальных данных. Достоверность полученных результатов подтверждается корректностью математической постановки задачи, использованием известных численных методов решения краевых задач с привлечением верифицированных программных комплексов промышленного типа, сходимостью с данными натурных экспериментов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты экспериментальных исследований фланцевых соединений балки с колонной.
2. Результаты численной реализации задачи расчета фланцевых соединений с учетом податливости.
3. Конструктивное решение и аналитический метод расчета податливых узлов примыкания балки к колонне. Сопоставление результатов численного моделирования и натурных экспериментов.

Апробация результатов исследования осуществлена в публикациях, докладах и выступлениях на следующих конференциях: Международной научно-технической конференции «Строительство, архитектура и техносферная безопасность» (ICCATS-2021); XI Всероссийской молодежной конференции аспирантов, молодых ученых и студентов «Современные технологии в строительстве. Теория и практика»; X Всероссийской молодежной конференции аспирантов, молодых ученых и студентов «Современные технологии в строительстве. Теория и практика»; IX Всероссийской молодежной конференции аспирантов, молодых ученых и студентов «Современные технологии в строительстве. Теория и практика» 2017-2021г.; Выставка исследовательских работ в рамках СНИЛ и СКБ 2017г.

Публикации. Основные положения диссертации и результатов исследований опубликованы в 8 печатных работах, в том числе 3 в ведущих рецензируемых научных изданиях.

Личный вклад автора состоит в постановке задачи (совместно с научным руководителем), проведении натурных экспериментов, аналитического и численных расчетов податливых фланцевых соединений, написании научных статей.

Объем и структура диссертации: Диссертация состоит из введения; четырех глав, заключения, списка литературы. Общий объем диссертации 107 страниц, включая 5 таблиц, 45 рисунков и схем. Список использованной литературы содержит 126 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, отмечается научная новизна и практическая значимость результатов. Изложены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава содержит литературный обзор по теме диссертации. Представлено общее состояние проблемы расчета и проектирования фланцевых соединений, кратко описана история развития соединений стальных конструкций. Приведен обзор использования актуальных расчетных моделей фланцевых соединений при разных воздействиях. Рассмотрены теоретические и экспериментальные исследования по данному вопросу В. Катюшина, Н. Стрелецкого, E.L. Grimsmo, A.H. Clausen, A. Aalberg, M. Langseth, K Al Fakih, S C Chin, Pisarek Z., Mohsen Gerami, Hamid Saberi, Bo Yang, Kang Hai Tan, A. Kozłowski и др.

В основу расчета фланцевых соединений В. Катюшин, как и большинство авторов, закладывает принцип предельного равновесия Т-образного фланца (Рис.1), жестко защемленного в около болтовой зоне. При расчете необходимо учитывать пространственную работу фланца, пластические деформации, большие перерезывающие силы, что затрудняет конструирование узла.

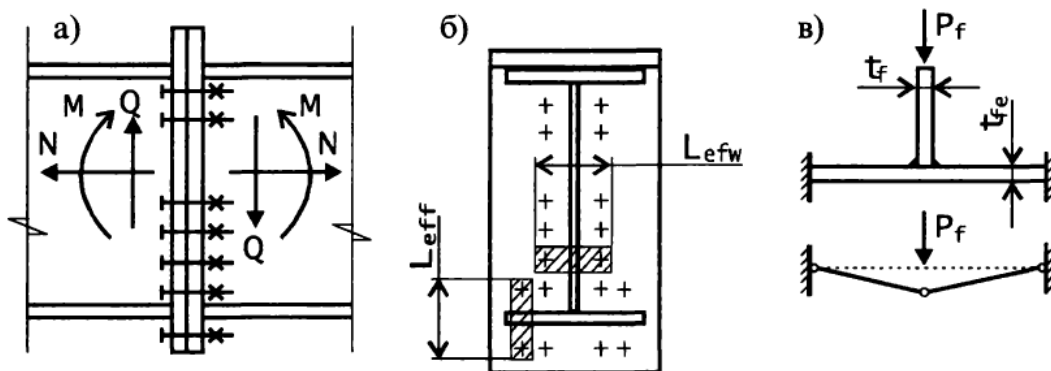


Рисунок 1 – Принцип разделения узла на Т-образные фланцы:
 а) продольное сечение, б) поперечное сечение, в) расчетная схема

В главе представлен обзор зарубежных норм по проектированию фланцевых соединений. В основу расчета несущей способности стальных конструкций, описанной в EN (1993-1-1-2009), заложен метод предельных состояний. Эксплуатационная пригодность и долговечность обеспечивается применением соответствующих коэффициентов надежности. Расчет податливости узла, согласно EN, возможен при помощи проведения натурного эксперимента, математического моделирования или компонентного метода расчета узлов. Компонентный метод заключается в том, что несущая способность соединения в целом определяется, исходя из несущей способности отдельных компонентов. Податливость узла определяется как совокупность податливостей последовательно и параллельно соединенных «пружин» (Рис.2.). При расчете узлов применяется линейно-упругий или упругопластический расчет. В результате расчета можно получить зависимость «изгибающий момент – угол поворота» ($M-\varphi$).

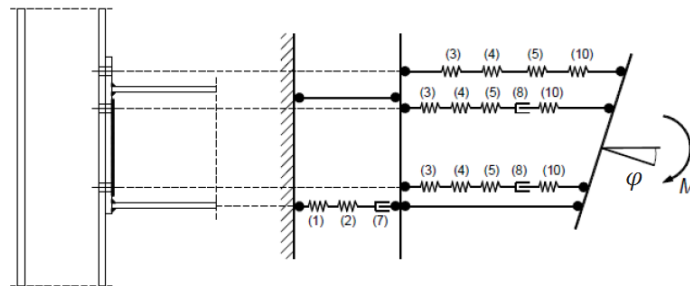


Рисунок 2 – Разделение узла на компоненты

Отмечаются проблемы, связанные с расчетом и проектированием фланцевых соединений при разных внешних воздействиях на конструкцию. В нормативной и справочной документации РФ фланцевые соединения рассмотрены лишь частично. Данные узлы отличаются значительными габаритами, сложностью изготовления и практически не применимы в жилых зданиях, где предъявляются высокие требования к внутренней поверхности ограждающих конструкций.

Аналитически рассчитать фланцевый узел произвольной конфигурации можно с помощью компонентного метода, однако погрешность данной методики может достигать 90% при расчете по второй группе предельных состояний.

Важнейший постулат, который фигурирует в нормативной документации, и отмечается многими авторами, может быть сформулирован следующим образом: расчетные характеристики могут быть получены либо на основе экспериментальных данных, либо на основе соответствующей расчетной модели, верифицированной результатами испытаний.

Вторая глава посвящена описанию натурных экспериментов определения несущей способности узлов фланцевых соединений, проведенных в рамках комплексного исследования на кафедре «Строительные конструкции и вычислительная механика» ПНИПУ совместно с институтом УРО РАН. Испытание образцов проводилось на специально спроектированном стенде, позволяющем давать суммарную нагрузку на узел до 200 т. Стенд представляет

собой рамную металлическую конструкцию (Рис.3), является полностью мобильным и не требует специального основания.

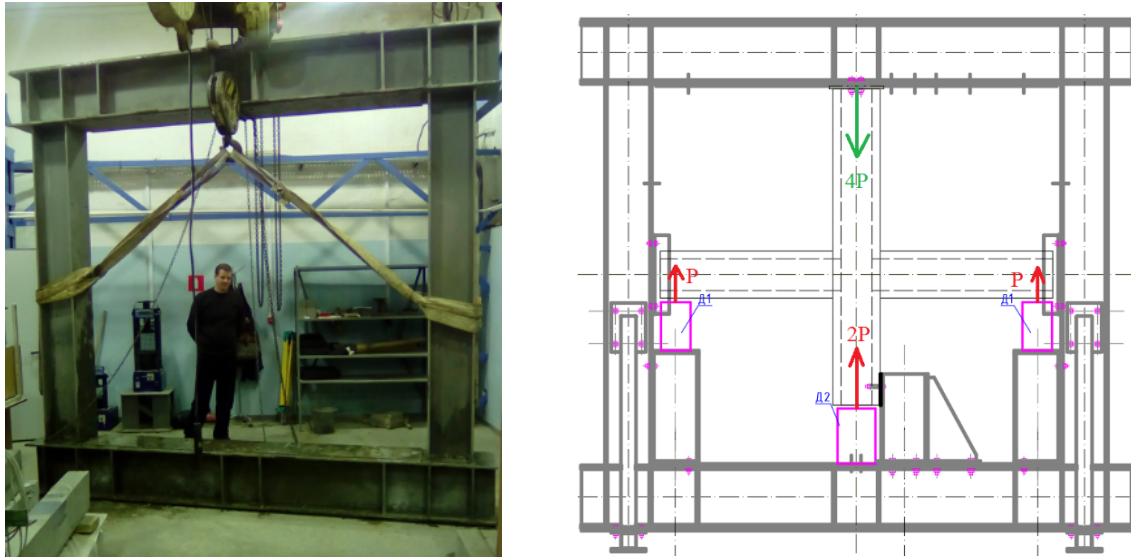


Рисунок 3 – Общий вид и конструктивная схема испытательного стенда

Одной из особенностей испытываемых моделей являлось полное отсутствие дополнительных конструктивных элементов: опорных столиков, ребер жесткости и пр., применяемых по серии 2.440. В качестве элементов балок и колонн использовались двутавры типа 30ШЗ и 26К6, всего 12 образцов. Конструктивно образцы отличались толщинами фланцев и типом исполнения: с двусторонним примыканием балок, с односторонним примыканием балки.

Нагрузка на образец создавалась при помощи трех гидравлических домкратов: на консольные балки - домкратами усилием 50 тонн (Д1), на колонну узла - домкратом усилием 100 тонн (Д2) и проводились с передачей нагрузки снизу вверх, что соответствует перевернутому виду реальной конструкции. Испытательный стенд может быть трансформирован, в зависимости от типа узла и расчетной схемы. Контроль нагрузки производился манометрами. Дополнительно для проверки корректности расчетной модели и показаний манометра непосредственно на образец были установлены тензорезисторы, в линейно-упругой зоне деформирования. Нагрузка прикладывалась циклично с последовательным увеличением усилия на каждой ступени. С помощью манометра домкрата вычислялся коэффициент перехода от показаний датчика деформаций ϵ_F к усилию на балку. Измерение усилий в болтах осуществлялось при помощи датчиков перемещения, с точностью 0,001 мм. Общие деформации модели измерялись датчиками перемещения, расположенными на концах консолей балок и на центральной части колонны. Измерение проводилось относительно неподвижной рамы.

Принципиально испытания можно разделить на две серии, с использованием двух типов узлов: с двусторонним примыканием балок к колонне (ФС+) и с односторонним примыканием балки (ФСт). Пролет моделей 2,5 м для двустороннего примыкания, 1,2 м для одностороннего примыкания,

высота моделей 2м. Кроме того, образцы отличались классом прочности болтов (8.8, 10.9), толщинами фланцев (14мм, 16мм, 20мм, 30мм), схемой нагружения (с центральным сжимающим домкратом, или без него). Характеристики использованных моделей приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры испытательных образцов

№ п/п	Индекс	Сталь	Толщина фланцев, [мм]	Тип соединения	Класс прочности болтов	Дополнительная центральная нагрузка	Несимметричная нагрузка на консоли балок	Момент затяжки болтов [Нм]	Момент при разрушении [Г*м]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	3
1	ФС1+	C345	24	двустороннее	10.9	нет	нет	1100	40
2	ФС2+	C345	14	двустороннее	10.9	нет	нет	1100	37,1
3	ФС3+	C345	16	двустороннее	8.8	нет	нет	800	40,6
4	ФС4Т	C345	20	одностороннее	10.9	нет	нет	1100	43,6
5	ФС5+	C345	20	двустороннее	10.9	нет	нет	160	39,6
6	ФС6+	C345	20	двустороннее	8.8	есть	нет	800	42,8
7	ФС7+	C345	20	двустороннее	8.8	есть	нет	800	39,2
8	ФС8+	C345	30	двустороннее	8.8	нет	есть	800	50,1
9	ФС9+	C345	16	двустороннее	8.8	нет	нет	800	44,8
10	ФС10Т	C345	20	одностороннее	8.8	нет	есть	800	48,5
11	ФС11+	C345	30	двустороннее	10.9	нет	есть	1100	46,7
12	ФС12+	C345	24	двустороннее	10.9	нет	нет	1100	38,9

Общий вид моделей узлов после проведения испытаний приведен на рисунке 4.

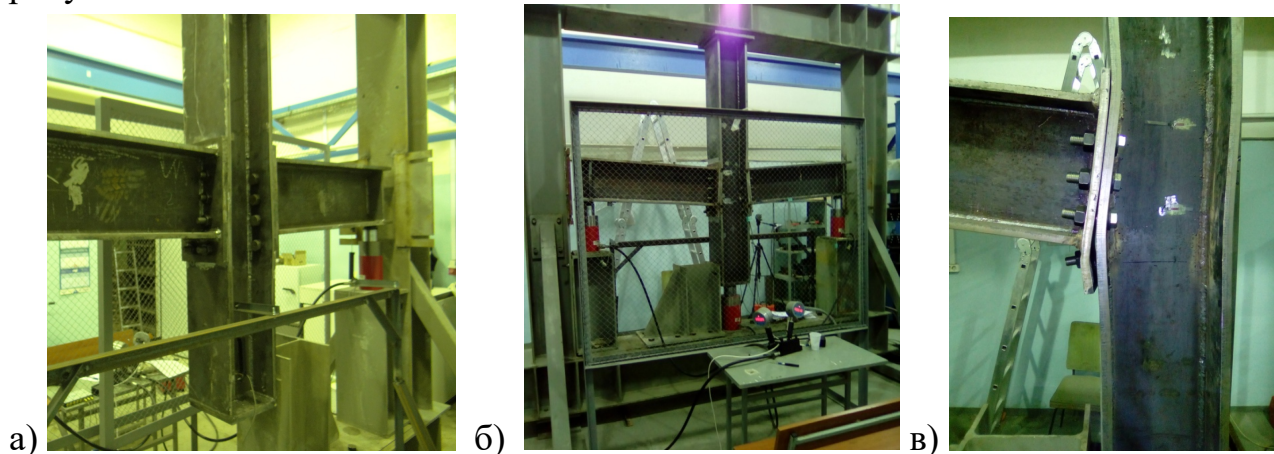


Рисунок 4 – Общий вид после испытаний: а) образец типа ФС+, б) образец типа ФСТ, в) образец типа ФС+.

В результате проведенных испытаний получены показания, характеризующие относительные деформации моделей в местах установки тензорезисторов в зависимости от прикладываемой нагрузки. Величина деформаций в пределах каждой ступени усреднялась. Полученные по

результатам испытаний картины разрушения не противоречат известным сценариям разрушения фланцевых соединений и ранее проведенным известным опытам. Разрушающая нагрузка всех образцов превосходила проектную несущую способность в 1,5-2 раза (рассчитанную по EN 1993-1-1). Разрушение высокопрочных болтов зафиксировано в большинстве проведенных экспериментов (рис. 5).



Рисунок 5 – Общий вид болтов после испытаний и зона местного смятия

Помимо серии испытаний узлов фланцевых соединений, было проведено испытание болтов класса прочности 8.8 и 10.9. Для моделирования болтов недостаточно знать диаграмму деформирования стали болта. Податливость болта складывается из податливости тела болта без резьбы, части болта с резьбой, податливости головки, но большая часть податливости заключена в контакте резьбы гайки с болтом. Поэтому для болтов проводилась отдельная серия экспериментов с выявлением их прочностных и жесткостных свойств.

Согласно действующим СП, для фланцевых соединений необходимо применять высокопрочные болты из стали 40Х климатического исполнения ХЛ. В РФ к высокопрочным относятся болты класса прочности 10.9 и выше. Болты 8.8 из стали 20Г2Р не считаются высокопрочными, но обладают рядом преимуществ, что было подтверждено испытаниями, а именно, эти болты имеют более предсказуемый результат, разрыв болтов происходит при одинаковой нагрузке, графики деформирования идентичны. Максимальная нагрузка разрыва болта составила 42 тонны.

Как показали результаты экспериментов, в образцах, где отсутствовали шайбы, под головками болтов появились локальные следы местного смятия. Вклад толщины фланца в общую несущую способность соединения оказался незначительным. До критических нагрузок поведение фланцев толщины 14-16 мм мало отличалось от фланцев 20-30 мм.

Третья глава посвящена созданию корректной математической конечно-элементной модели исследования напряженно-деформируемого состояния фланцевых узлов соединений балок с колоннами, на основе проведенных натурных экспериментов.

Математическая модель узла по геометрии, физико-механическим характеристикам материалов, граничным условиям и условиям нагружения соответствует натурной модели; состоит из стойки и двух консольных балок, которые присоединены к колонне при помощи высокопрочных болтов предварительного натяжения. Численная модель создавалась в ПК ANSYS. Узел моделировался десятиузловыми объемными конечными элементами. Шаг сетки от 2 до 50 мм. В местах примыкания фланца к колонне применено контактное сгущение КЭ сетки. Колонна и балки - сварные, сечение элементов соответствуют двутаврам 25К6 и 30ШЗ нового ГОСТ. Сталь класса прочности С345 в расчете описана как материал с нелинейной зависимостью деформации от напряжения. Физическая нелинейность учитывалась с помощью параметра *Multilinear Isotropic Hardening* (мультилинейное изотропное упрочнение), который позволяет указать до десяти точек графика зависимости накопления пластических деформаций от напряжения.

Болты численной модели выполнены постоянного сечения с приведенной жесткостью. Сварные швы описаны билинейными диаграммами, предел текучести 490МПа.

Объекты взаимодействуют между собой с помощью контактов *Frictional* (фрикционное сцепление с заданным коэффициентом трения), и *Bonded* (имитирует полное склеивание поверхностей, запрещая разделение и проскальзывание) с билинейным описанием. Оба контакта не допускают проникновение элементов друг в друга.

Граничные условия модели: шарнирно-неподвижная опора верхней части колонны, шарнирное закрепление крайних узлов консольных балок, шарнирное крепление нижней части колонны (рис. 6).

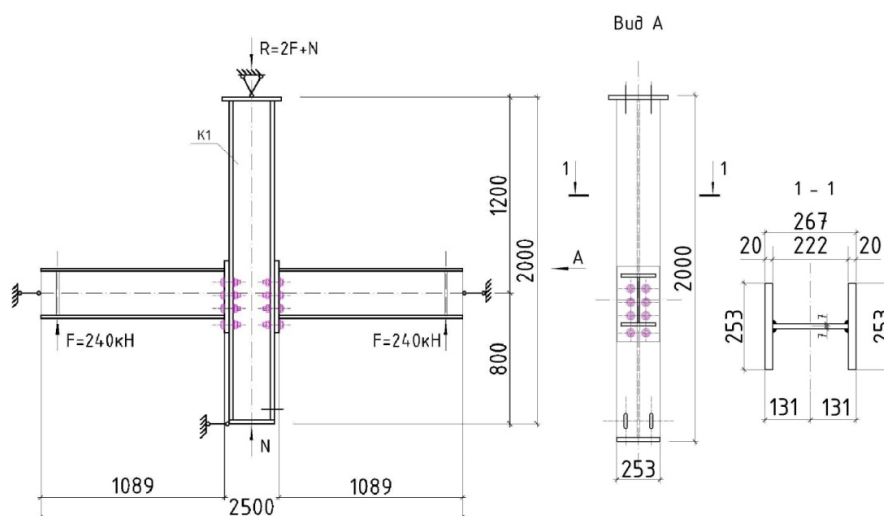


Рисунок 6 – Модель соединения колонны и балок

Выполнен пошаговый расчет, на первом шаге производится натяжение болтов при помощи инструмента *bolt pretension* (предварительное натяжение болта). На следующем шаге приложена продольная нагрузка на колонну N и две возрастающие силы на расстоянии 1м от фланца и вплоть до потери несущей способности узла.

При моделировании болтов недостаточно знать диаграмму деформирования стали болта. Податливость болта складывается из податливости тела болта без резьбы, части болта с резьбой, податливости головки, но большая часть податливости заключена в контакте резьбы гайки с болтом. Поэтому прочностные и жесткостные свойства болтов приняты на основании серии экспериментов с выявлением их прочностных и жесткостных свойств.

Сопоставление результатов расчетов с натурными экспериментами проводилось по датчикам перемещения и датчикам деформации (рис.7).

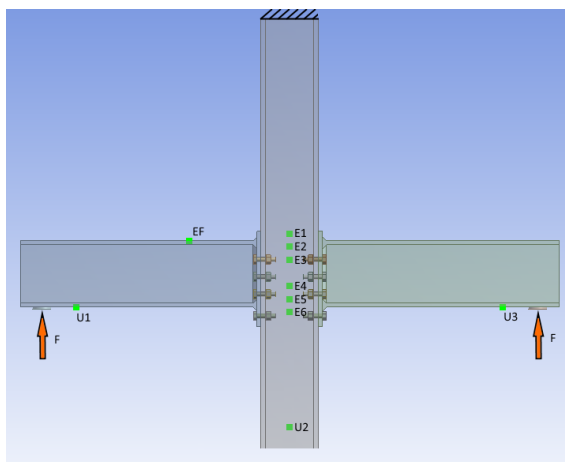
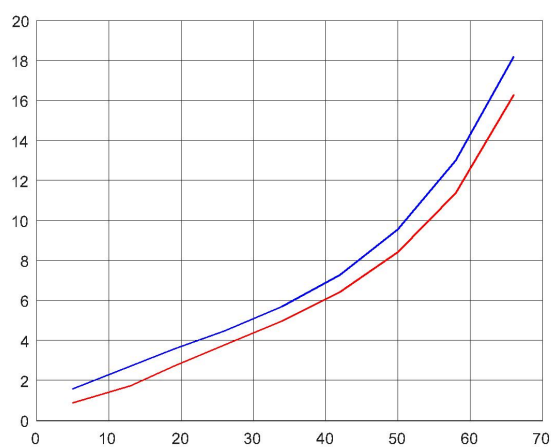


Рисунок 7 – Расчетная схема узла, места установки датчиков деформации (E1-E6, EF), датчиков перемещения (U1,U2,U3)

Данные, полученные численным расчетом, хорошо коррелируют с данными, полученными натурным экспериментом (рис.8).

а)



б)

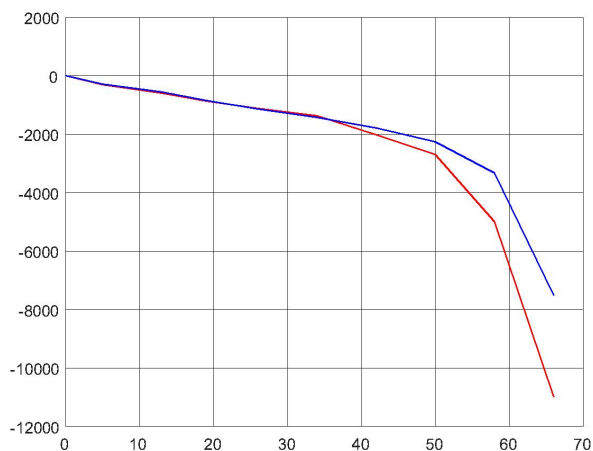


Рисунок 8 – Графики сопоставления данных численного (красный) и натурального (синий) экспериментов: а) перемещений (мм); б) деформаций

Четвертая глава посвящена развитию инженерной методики расчета несущей способности податливых фланцевых узлов примыкания балки к колонне.

Рассмотрены упрощенные расчетные модели отдельных компонентов фланцевого соединения и проведено сравнение с численными методами.

При проектировании рамно-связевых каркасов, узлы сопряжения ригелей с колоннами считают, как правило, либо абсолютно жесткими, либо идеальными шарнирами. В действительности узлы обладают податливостью, что подтверждается многочисленными исследованиями. Учитывать податливость узла нужно, а в некоторых сооружениях необходимо. Пренебрежение податливостью узлов может привести к существенным ошибкам при выполнении статического расчета каркаса.

При помощи численного моделирования была рассмотрена конструкция фланцевого податливого узла. В основу расчета был положен принцип работы фланцевых Т-образных соединений. Предложенный податливый узел крепления балки представляет собой фланцевую пластину, закрепленную на болтах, и опорный столик, воспринимающий сжимающее усилие и поперечную нагрузку. Верхний (растянутый) фланец приваривается к балке исключительно в зоне полки. Поперечное усилие передается через опорный столик. Податливость узла реализуется в растянутой зоне балки, при образовании пластических деформаций в Т-фланце (рис.9). Сжатая зона балки передает усилие через контактное взаимодействие между нижней пластиной и полкой колонны.

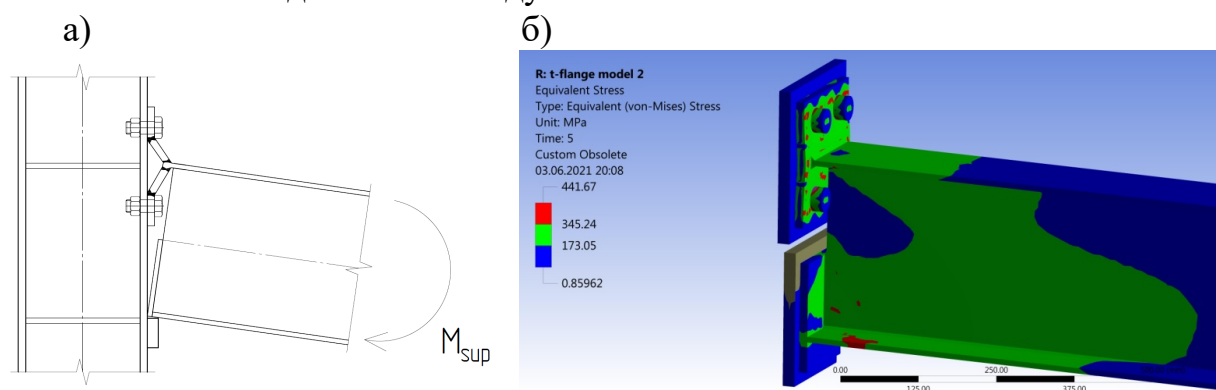


Рисунок 9 – Фланцевый податливый узел:
а) конструкция; б) распределение напряжений

Оптимальная жесткость данного узла та, при которой металлоемкость ригеля будет наименьшей. То есть эпюра моментов будет иметь одинаковые по модулю значения изгибающих моментов в пролете и на опорах балки. Жесткость опоры, позволяющая получить данное распределение изгибающих моментов в балке, может быть определена в результате статического расчета балки по формуле:

$$c = \frac{6EI_x}{l}$$

где: c -жесткость опоры, E -модуль упругости, I_x - момент инерции, l -пролет балки.

Обозначив погонную жесткость балки i равную $i = \frac{E \cdot I_x}{l}$, тогда требуемая податливость узла балки, закрепленной податливыми узлами, будет определяться следующим соотношением: $c = 6 \cdot i$.

Реализовать податливый узел с постоянной жесткостью (линейным графиком деформирования под нагрузкой) весьма сложно. Возникает множество случайных факторов, способных повлиять на расчетную жесткость. Для строительных конструкций допустимо применение узлов с выраженной площадкой текучести. Применимость таких решений подтверждена множеством исследований и строительной практикой. Усилие, при котором происходит переход в пластику, подбирается конструктивно, в зависимости от момента на опоре M_{sup} . Требуемая податливость узла должна обеспечивать возможность поворота опорного сечения на угол ($\theta_{оп}$), определяемый по формуле:

$$\theta_{оп} = \frac{M_{sup}}{6 \cdot i}$$

При разработке инженерной методики проектирования податливых узлов вводится ряд допущений, позволяющих упростить подбор фланцевого соединения. Податливость стенки колонны и болтов предполагается снижать при конструировании, так чтобы вклад вторичных компонентов в общую податливость узла был пренебрежимо мал. Достигается это за счет установки ребер внутрь колонны, натяжением болтов. Основная часть податливости узла реализуется при образовании пластических деформаций в Т-фланце, график деформирования узла принимаем билинейный. Для двутавровых профилей, используемых в строительстве, Т-образное фланцевое соединение позволяет обеспечить требуемый угол поворота узла.

Проверка работоспособности узла выполнена на расчетной КЭ модели балки пролетом 6 метров, закрепленной при помощи Т-образных фланцев (рис.10). В качестве граничных условий принято жесткое закрепление пластин, контактирующих с фланцем, шарнирное закрепление вертикальных перемещений опорного столика балки, раскрепление балки в пролете из плоскости. Расчетная модель подготовлена в расчетном комплексе ANSYS. Для описания нелинейных свойств металла применена билинейная диаграмма Прандтля, предел текучести 345 МПа.

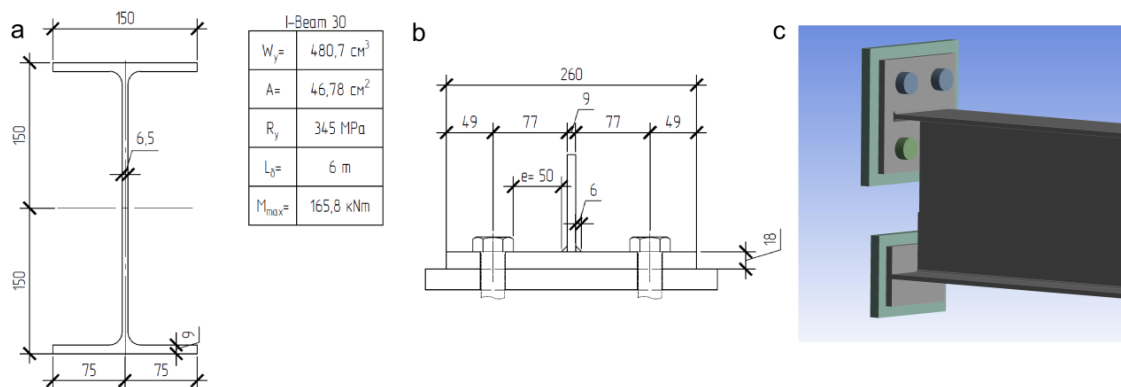


Рисунок 10 – Модельная балка: а) поперечное сечение ; б) принятое Т-образное соединение; с) расчетная схема податливого узла

Основная задача при расчете всех сооружений – это обеспечение безопасности конструкций при минимизации затрат. Для этого необходимо использовать расчетные схемы, соответствующие реальной физической работе конструкций. Расчет по допускаемым напряжениям не позволяет учитывать резерв несущей способности конструкции.

При испытании фланцевого соединения с односторонним примыканием балки (рис.11) было выявлено превышение расчетной нагрузки на срез более чем в два раза. В работе решается практическая задача, связанная с проверкой прочности сечений, воспринимающих большие поперечные силы Q , которые возникают при расчете узла сопряжения балки с колонной крайнего ряда в металлическом каркасе. Момент, возникающий в опорном сечении балки, передается на колонну в виде пары сил, вызывающих в ней сдвиг. Решение задачи сводится к уточнению схемы наступления предельного состояния от действия Q , без использования различных ребер жесткости Z или K -образной формы в зоне стыка.

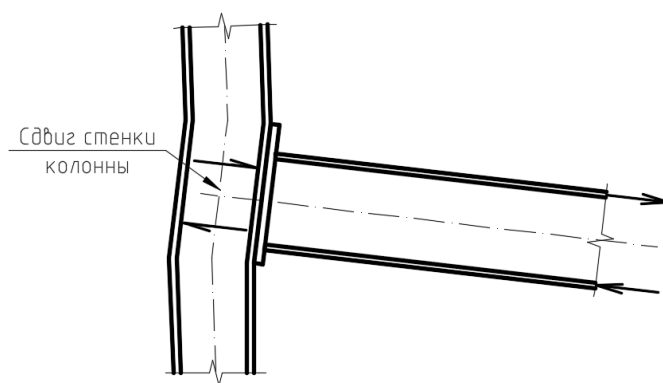


Рисунок 11 – Схема деформации узла с односторонним примыканием балки

Максимальное поперечное усилие, воспринимаемое колонной крайнего ряда, состоит из усилия, воспринимаемого стенкой и полками двутавра. Аналитическое решение данной задачи можно записать в виде:

$$Q_{sum} = 2F_p + Q_s \quad Q_s = \frac{R_s \cdot I \cdot b}{S}$$

где: Q_{sum} – суммарное поперечное усилие, воспринимаемое двутавровой колонной, Q_s – поперечное усилие, воспринимаемое стенкой колонны, F_p – поперечное усилие, воспринимаемое полками колонны, I – момент инерции сечения колоны, b – толщина стенки колонны, S – статический момент инерции, R_s – предел текучести стали на сдвиг.

Максимальное усилие, воспринимаемое полкой колоны, можно определить по формуле предложенной Пальчевским:

$$\frac{M}{M_t} + \left(\frac{Q}{Q_t}\right)^2 = 1$$

момент (M) и поперечная сила (Q) связаны соотношением:

$$M = Q \cdot l/2, \quad M_t = \frac{a \cdot t^2}{4} \cdot R_y; \quad Q_t = a \cdot t \cdot R_s,$$

где: t – толщина полки двутавра, a – ширина полки колоны, l – длина участка колонны, воспринимающая сдвиг.

Методом конечных элементов (МКЭ) был выполнен численный эксперимент, в котором изменяемым параметром являлось расстояние между парой сил (l). Получена зависимость перемещения колонны от действия поперечной силы для трех моделей при $l=182$ мм, 306 мм, 582 мм. Результаты численного и аналитического решения приведены в таблице №2. Разница между аналитическим расчетом и МКЭ моделью составляет 10-25%. Изолинии распространения пластических деформаций приведены на рисунке 12.

Таблица 2 – Сопоставление данных натурного и численного экспериментов

Расстояние между парой сил, мм	Аналитическое решение, кН	КЭ расчет, кН	Погрешность, %
182	809	1010	22
306	732	845	14
582	678	745	9

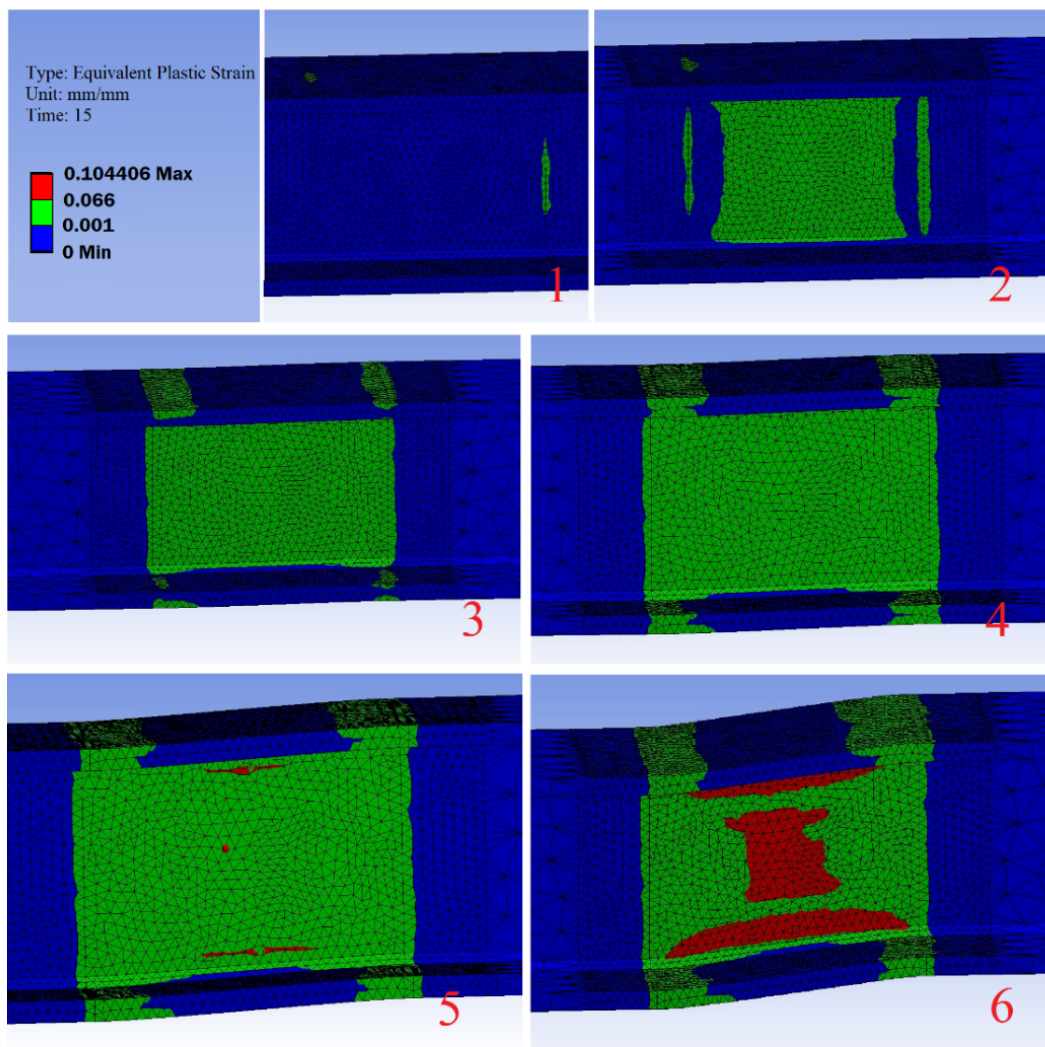


Рисунок 12 – Фронт распространения пластических деформаций (мм/мм)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнен анализ отечественных и зарубежных экспериментальных и теоретических исследований фланцевых соединений. По результатам аналитического обзора установлено, что нормативной документации по расчету фланцевых соединений в РФ недостаточно.

2. Получены результаты экспериментальных исследований фланцевых соединений в натуральную величину, определена их фактическая несущая способность.

3. Выполнено численное моделирование испытанных моделей фланцевых соединений. Получены картины распределения напряжений и деформаций в узле. Выполнено сравнение опытных и расчетных значений узлов фланцевых соединений. На основании натурных испытаний выполнена валидация численной расчетной модели.

4. Проведена отдельная серия испытаний болтов класса прочности 8.8 и 10.9. Болты класса прочности 8.8 имеют преимущества по использованию во фланцевых соединениях: предсказуемость графика деформирования и пластичность при разрушении.

5. По результатам экспериментального исследования на опытных образцах установлено, что зачастую увеличение толщины фланцевой пластины не приводит к повышению надежности соединения. Напротив, отказ узлов с относительно тонкими фланцами происходит с развитием значительных пластических деформаций.

6. Предложено конструктивное решение податливого узла балки с колонной, для которого свойственна простота расчета и монтажа. Показана инженерная методика расчета данного узла, которая хорошо коррелирует с результатами численного эксперимента.

7. Предлагаемый узел соединения балок с колоннами позволяет перераспределить изгибающие моменты по длине балки. Максимальная нагрузка на балку, закрепленную на предложенных узлах, в 1,22 больше расчетной несущей способности жесткозакрепленной балки данного сечения и в 1.8 раз выше, чем для шарнирно закрепленной балки.

Рекомендации: по результатам выполненного исследования рекомендуется использовать методику расчета податливых узлов примыкания балки к колонне.

Перспективой дальнейшей разработки данной темы является разработка серии податливых фланцевых узлов с выраженной площадкой текучести для различных двутавровых балок.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих печатных работах:

работы в рецензируемых изданиях

1. Сон, М.П. Математическое моделирование фланцевых соединений в программном комплексе Ansys / М.П. Сон, С.А. Савич, А.Д. Землянухин, А.П. Шестаков // Международный научно-исследовательский журнал. – 2017. – №6(3). – С.164-167.

2. Землянухин, А.Д. Экспериментальные и теоретические исследования податливых фланцевых соединений / А. Д. Землянухин, Г.Г. Кашеварова, М. П. Сон // Строительство и реконструкция. – 2024. – №6. – С. 4-14.

печатные работы в изданиях, индексируемых Scopus и WoS

3. I.Shardakov, A.Shestakov, M.Son A.Zemlanuhin, G.Kashevarova, I.Glot, Beam to column flange connection: from elasticity to destruction (theory and experiment) / Procedia Structural Integrity. ECF22 - Loading and Environmental effects on Structural Integrity. Amsterdam. – 2018. – P. 1324-1329.

4. M.P. Son, G.G. Kashevarova, A.D. Zemlyanukhin Development of flexible joint for beam-to-column abutment // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2022. T.168. – P.55-64

печатные работы в других изданиях

5. Сон, М.П. Моделирование фланцевого соединения в расчетном комплексе Ansys / М.П. Сон, А.Д. Землянухин // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. – 2017. – Т.2. – С.73-79.

6. Сон, М.П. Сравнение численных и натурных экспериментов на стесненное кручение швеллеров / М.П. Сон, А.Д. Землянухин, А.В. Волков // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. – 2019. – Т.1. – С.288-292.

7. Кашеварова, Г.Г Сравнение несущей способности и деформативности фланцевых узлов примыкания балки к колонне при различных толщинах фланца / Г.Г. Кашеварова, М.П. Сон, А.Д. Землянухин // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. – 2020. – Т.1. – С.44-49.

8. Кашеварова, Г.Г Расчет и моделирование Т-образного фланцевого соединения / Г.Г. Кашеварова, М.П. Сон, А.Д. Землянухин // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. – 2021. – Т.1. – С.43-48.

Землянухин А.Д.

РАЗВИТИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ
МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ФЛАНЦЕВЫХ ПОДАТЛИВЫХ УЗЛОВ
ПРИМЫКАНИЯ БАЛОК К КОЛОННАМ

Автореферат

Подписано в печать 00.00.00. Формат 60х84.

Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 80 экз. Изд. № 74.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Отпечатано в типографии ПНИПУ 614990, Пермский край, г. Пермь,
Комсомольский проспект, д. 29