

**«УТВЕРЖДАЮ»**

Проректор

федерального государственного  
автономного образовательного  
учреждения высшего образования

«Российский университет транспорта»  
доктор технических наук, профессор



И.Н. Розенберг

2022 г.

### **ОТЗЫВ**

**ведущей организации – федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» на диссертационную работу Гебре Тесфалдет Хадгембес «Моделирование работы тонкостенных стальных профилей в составе пространственных рам с учетом стесненного кручения», представленную к защите на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности**

#### **2.1.9. Строительная механика**

##### **Актуальность темы диссертации.**

В настоящее время среди разнообразных конструктивных систем все большее место занимают несущие каркасы, составленные из легких стальных тонкостенных элементов. С инженерной точки зрения они имеют неоспоримые преимущества – легкость, выразительность и быстроту возведения. Однако особенностями таких систем являются малая жесткость элементов и повышенная общая деформативность, зачастую вызывающие потерю устойчивости системы в целом или ее отдельных элементов. При выполнении расчетного обоснования таких конструкций, как правило, используется расчет по деформированной схеме методом конечных элементов. При этом необходим учет совместного действия растяжения, изгиба и кручения. Очевидно, что в новых конструкциях

пространственных рам с тонкостенными элементами несимметричного сечения и жесткими узлами нельзя игнорировать эффекты депланации сечений.

В связи с этим разработана автором уточненная методика построения разрешающих уравнений поведения пространственных рам, позволяющей учитывать совместное действие растяжения, изгиба и кручения в рамах с жесткими узлами, ограничивающими поворот, является актуальной задачей.

### **Общая характеристика, структура и объем работы.**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы (230 источников) и приложения. Работа изложена на 177 страницах, содержит 96 рисунков, 7 таблиц.

*Во введении* обоснована актуальность диссертационного исследования; сформулированы научная гипотеза, цель и основные задачи работы; описаны методология и методы исследования; охарактеризованы степень новизны полученных результатов и их апробация.

*В первой главе* приведен анализ работ, посвященных проблеме кручения тонкостенных сечений, на основании которого автором сделан обоснованный вывод о том, что в области моделирования поведения элементов пространственных рам остаются пробелы в части учета стесненного кручения. Рассмотрен учет влияния геометрических характеристик сечения на напряженное состояние элемента при стесненном кручении, особенность проявления эффекта депланации в открытых и замкнутых тонкостенных сечениях. Рассмотрены особенности моделирования и расчета элементов конструкций, имеющих такие сечения. Для различных типов сечений исследованы характер деформирования профиля в случае искривления тонкостенных участков, и взаимное влияние эффектов кручения и изгиба стержней.

*Во второй главе* разработан унифицированный подход к построению разрешающих уравнений поведения пространственных рам, позволяющий учитывать совместное действие растяжения, изгиба и кручения в пространственных рамах с жесткими узлами, ограничивающими повороты, сечения элементов которых тонкостенны и не имеют осей симметрии. Рассмотрено деформирование открытых и замкнутых тонкостенных сечений при стесненном

кручении с учетом влияния характеристик сечения, представлено аналитическое решение задачи.

*В третьей главе* рассмотрено моделирование тонкостенных балочных элементов при стесненном кручении. На основе общего принципа возможных перемещений получено разрешающее уравнение стесненного кручения, решение которого строится далее с использованием гиперболических функций перемещений. С использованием аппроксимирующих гиперболических функций построены матрица жесткости и обобщенные векторы узловых перемещений и нагрузок конечного элемента при кручении с деформацией. Для подтверждения достоверности разработанной модели выполнены расчеты элементов с тремя типами сечений (двутавр, швеллер, прямоугольное полое), нагруженных внешним скручивающим моментом, приложенным к секториальному полюсу. Проведено сравнение полученных результатов с результатами, полученными при моделировании в сертифицированных программных комплексах.

*Четвертая глава* диссертации посвящена вопросам моделирования элементов при совместном действии осевых и поперечных сил, а также стесненного кручения. С использованием предложенного автором унифицированного подхода, а также принципа одноэлементного моделирования стержня, сформулированного В.В. Галишниковой, разработана конечно-элементная модель стержневого элемента, учитывающая стесненное кручение с эффектом деформации поперечного сечения. Описана верификация предложенной модели при помощи численных экспериментов, а также физического эксперимента, разработанного и выполненного автором.

*В заключении* сформулированы выводы, достаточно аргументировано вытекающие из содержания диссертации, полностью отражающие результаты исследования, соответствующие поставленным целям и задачам.

*В приложении* приведены таблицы и графики, иллюстрирующие результаты решения задач.

**Новизна исследования, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.**

Новизна исследования заключается в разработке методики построения разрешающих уравнений поведения пространственных рам, позволяющей

учитывать совместное действие растяжения, изгиба и стесненного кручения в рамах с жесткими узлами, ограничивающими поворот. В диссертации можно отметить следующие результаты, обладающие новизной:

- унифицированный подход к формированию разрешающих уравнений для осевых деформаций, изгиба и кручения элемента при помощи единой функции;
- методика получения аналитических зависимостей для моделирования работы тонкостенных сечений при совместном действии осевых деформаций, изгиба и стесненного кручения с учетом их взаимного влияния;
- модель конечного элемента, основанная на методике автора, позволяющая выполнять расчеты элементов рам с учетом взаимного влияния эффектов осевых деформаций, изгиба и кручения;
- методика и результаты экспериментальных исследований тонкостенного профиля, подвергнутого комбинированному нагружению.

#### **Значимость для науки и практики полученных результатов.**

Теоретическая значимость полученных результатов заключается в разработке автором унифицированного подхода и методики построения аналитических моделей, которые могут служить основой для создания альтернативных методов нелинейного расчета, в которых будет учтено взаимное влияние элементов деформаций, в частности, влияние вторичных продольных деформаций, вызванных стесненным кручением, на устойчивость сжатых элементов стержневой системы. Теория может быть положена в основу программной платформы для расчета пространственных рам со значительным стеснением депланации в узлах.

Практическая значимость результатов диссертационного исследования заключается в возможности использования разработанной конечно-элементной модели в программных комплексах расчета стержневых пространственных систем, что повысит надежность расчетных обоснований, и позволит избежать явлений потери устойчивости в стержнях. Принципы построения модели могут быть положены в основу разработки конечных элементов для нелинейных расчетов пространственных стержневых систем с жесткими узлами.

**Степень достоверности результатов исследования.**

Результаты, полученные автором, являются достоверными. Это обеспечено достаточно корректными математическими формулировками поставленных задач, использованием строгих и апробированных математических моделей строительной механики, а также численной и экспериментальной верификацией разработанных математических моделей и выдвинутых гипотез.

**Публикации и апробация результатов исследования.**

Основные положения диссертации опубликованы в 10 печатных работах, из них 2 публикации в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных «Перечнем РUDN» / ВАК РФ, 8 публикаций в изданиях, индексируемых в международной базе данных Scopus.

Основные результаты диссертации доложены на 8 конференциях: Инженерные системы – 2019; Международная конференция по инженерным системам 2020 (ICES 2020); Международная академия астронавтики (IAA) SciTech Forum; Международная конференция по инженерным системам 2021 (ICES 2021); II научная конференция «Моделирование и методы структурного анализа», Московский государственный строительный университет, 2021; Международная конференция по инженерным изысканиям, Инженерная академия Российского университета дружбы народов, 2021; Международная конференция по инженерным системам 2022 (ICES 2022); Международная научная конференция «Передовые достижения в области гражданского строительства, строительство формирование жилой среды» (FORM 2022), Московский государственный строительный университет.

**Личный вклад соискателя в получении результатов исследования.**

Личный вклад соискателя состоит в постановке целей и задач исследования, разработке методики построения аналитических моделей, в которых учтено взаимное влияние деформаций, вызванных растяжением (сжатием), изгибом и стесненным кручением в рамах с жесткими узлами, а также методика и результаты экспериментальных исследований тонкостенного профиля, подвергнутого комбинированному нагружению.

**Рекомендации по использованию результатов и выводов, приведенных в диссертации.**

Материалы исследования могут быть использованы при дальнейшем развитии теории легких рам с учетом влияния эффектов кручения на прочность и устойчивость их элементов. Методика и построенные на ее основе модели могут быть с успехом использованы для усовершенствования имеющихся отечественных программных комплексов, а также послужить основой при разработке нового специализированного программного комплекса.

Полученные в работе экспериментальные результаты могут использоваться при проведении верификации новых математических и компьютерных моделей конструкций подобного типа.

**Соответствие работы паспорту специальности.**

Содержание диссертации соответствует следующим пунктам паспорта специальности 2.1.9. Строительная механика:

п. 1. «Общие принципы расчета зданий, сооружений и их элементов на всех этапах жизненного цикла»,

п. 2 «Линейная и нелинейная механика конструкций, зданий и сооружений, разработка физико-математических моделей их расчета»,

п. 4 «Численные и численно-аналитические методы расчета зданий, сооружений и их элементов на прочность, жесткость, устойчивость при статических, динамических, температурных нагрузках и других воздействиях»,

п. 11 «Экспериментальные методы исследования зданий, сооружений и их элементов».

**Соответствие содержания автореферата основным положениям диссертации.**

Автореферат в достаточной степени отражает основные положения диссертации, хорошо структурирован и снабжен определенным количеством иллюстраций.

**Замечания по работе.**

1. Недостаточно четко сформулированы цель, задачи и научно-техническая гипотеза исследования.

2. В первой главе в обзоре исследований приведены лишь ссылки на работы, но не упоминаются имена и фамилии ученых, участвовавших в разработке данной тематики (за исключением В.З. Власова, Л. Эйлера, Д. Бернулли, К-Л. Навье, А. Сен-Венана). В списке литературы отсутствуют ссылки на работы А.А. Уманского – одного из основоположников теории кручения тонкостенных стержней замкнутого профиля.

3. Параграф 1.7 называется «Кручение сечения открытого профиля», однако в нем идет речь о замкнутом сечении с  $n$  внутренними отверстиями.

4. Присутствует нечеткость терминологии, например, одновременно использованы термины «стесненное кручение», «ограниченное кручение» и «сдержанное кручение».

5. В диссертации не показано, каким образом стыкуются деформации в конечных элементах, принадлежащих стержням рамы разных направлений.

6. Качество изложения материала и оформление работы не везде соответствуют требуемому уровню, что затрудняет понимание излагаемого материала.

Указанные замечания не снижают качества работы, в целом выполненной на достаточно высоком уровне.

### **Заключение.**

Диссертационное исследование Гебре Тесфалдет Хадгембес «Моделирование работы тонкостенных стальных профилей в составе пространственных рам с учетом стесненного кручения» является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится новое решение научной задачи разработки методики расчета тонкостенных элементов с различными типами сечений, позволяющей учитывать совместное действие растяжения (сжатия), изгиба и стесненного кручения в пространственных рамах с жесткими узлами, ограничивающими повороты, имеющей важное значение для развития нелинейной теории расчета пространственных стержневых систем. Работа соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, согласно п. 2.2 раздела II Положения о присуждении ученых степеней в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет

дружбы народов», утвержденного Ученым советом РУДН протокол № 12 от 23.09.2019 г., а её автор, Гебре Тесфалдет Хадгембес, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.1.9. Строительная механика.

Отзыв подготовлен профессором кафедры «Теоретическая механика» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» (МИИТ), доктором технических наук (05.23.17. Строительная механика), доцентом Тер-Эммануильян Т.Н.

Отзыв обсужден и одобрен на заседании кафедры «Теоретическая механика» 05 декабря 2022 г., протокол № 5.

Профессор кафедры «Теоретическая механика»  
доктор технических наук, доцент



Т.Н. Тер-Эммануильян

Председательствующий на заседании:  
доцент кафедры «Теоретическая механика»  
кандидат технических наук, доцент



А.Н. Телых

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (МИИТ).

Почтовый адрес: 127994, ГСП-4, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9.

Телефон: +7 495 684-23-96.

Электронная почта: info@rut-miit.ru, tu@miit.ru



Подпись Т.Н. Тер-Эммануильян и А.Н. Телых  
ЗАВЕРЯЮ  
ДИРЕКТОР ЦКБЛС  
С.Н. КОРЖИН