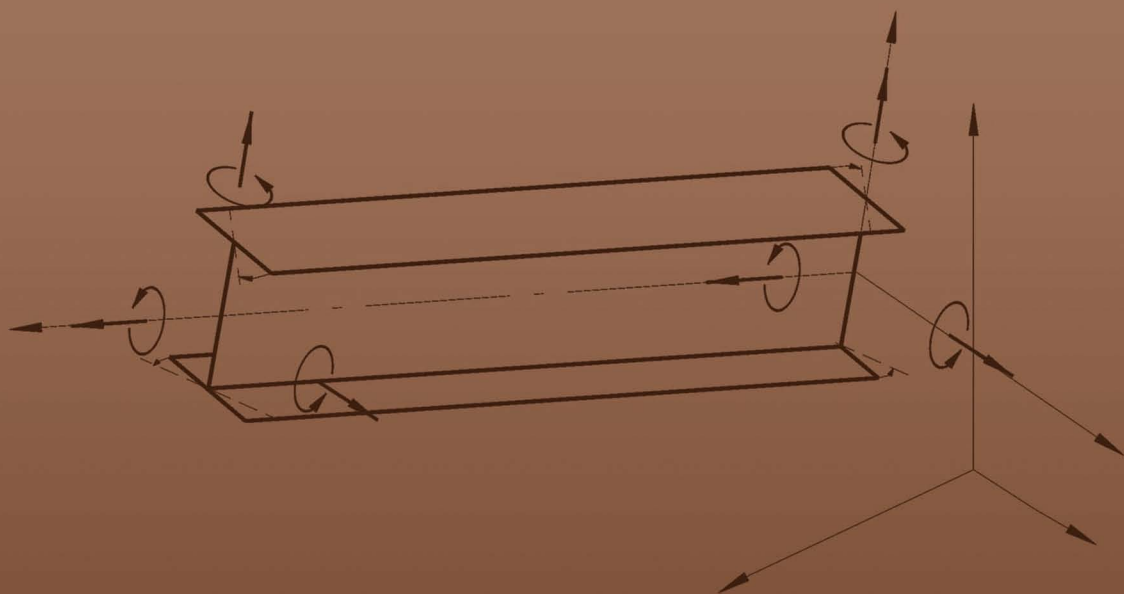


**А.Р. Туснин**

**ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ  
КОНСТРУКЦИЙ  
ИЗ ТОНКОСТЕННЫХ  
СТЕРЖНЕЙ  
ОТКРЫТОГО ПРОФИЛЯ**



**А.Р. Туснин**

**ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИЙ  
ИЗ ТОНКОСТЕННЫХ СТЕРЖНЕЙ  
ОТКРЫТОГО ПРОФИЛЯ**



МГСУ  
Издательство Ассоциации строительных вузов  
Москва  
2009

УДК 624.94.012.4.044

**Рецензенты:**

доктор технических наук, профессор *П.Г. Еремеев*;

доктор технических наук, профессор *А.М. Чистяков*

**Туснин А.Р.**

Численный расчет конструкций из тонкостенных стержней открытого профиля: Монография: – М: Издательство АСВ, 2009 – 144 с.: ил.

ISBN 978-5-93093-669-8

В монографии рассматривается методика численного расчета пространственных конструкций из тонкостенных стержней открытого профиля, испытывающих помимо продольных и изгибных деформаций деформации кручения. Показаны особенности матриц жесткости тонкостенных стержней открытого профиля в зависимости от типов сечений и наличия эксцентриситетов в узлах. В каждом узле рассматриваются 3 линейных и 3 угловых перемещения и деформации. Представлена методика получения матрицы преобразования координат для перехода от местной системы координат к общей. Исследовано влияние узловых сопряжений на деформацию сечений, даны рекомендации по определению коэффициентов преобразования деформации.

Монография предназначена для студентов и аспирантов строительных вузов, научно-технических работников проектных и строительных организаций.

Табл. 53: Ил. 74.

Рекомендовано Научно-техническим советом МГСУ

© Туснин А.Р., 2009

© МГСУ, 2009

© Оформление. Издательство АСВ, 2009

ISBN 978-5-93093-669-8

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	5
<b>1. ОПЫТ РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ СТЕРЖНЕЙ ОТКРЫТОГО ПРОФИЛЯ</b> .....	7
1.1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	7
1.2. РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ.....	10
<b>2. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ТОНКОСТЕННЫХ СТЕРЖНЕЙ С ОТКРЫТЫМ ПРОФИЛЕМ</b> .....	14
2.1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАСЧЕТА.....	14
2.2. КОНЕЧНЫЙ ЭЛЕМЕНТ ТОНКОСТЕННОГО СТЕРЖНЯ ОТКРЫТОГО ПРОФИЛЯ С ДВУМЯ ОСЯМИ СИММЕТРИИ ПРИ ОТСУТСТВИИ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТОВ В УЗЛАХ.....	18
2.3. КОНЕЧНЫЙ ЭЛЕМЕНТ ТОНКОСТЕННОГО СТЕРЖНЯ ОТКРЫТОГО ПРОФИЛЯ ПРИ НЕСОВПАДЕНИИ ЦЕНТРОВ ТЯЖЕСТИ И ИЗГИБА.....	21
2.4. КОНЕЧНЫЙ ЭЛЕМЕНТ ТОНКОСТЕННОГО СТЕРЖНЯ ОТКРЫТОГО ПРОФИЛЯ ПРИ НАЛИЧИИ В УЗЛАХ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТОВ.....	27
2.5. КОНЕЧНЫЙ ЭЛЕМЕНТ ТОНКОСТЕННОГО СТЕРЖНЯ ОТКРЫТОГО ПРОФИЛЯ ПРИ НАЛИЧИИ В УЗЛАХ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТОВ И НЕСОВПАДЕНИИ ЦЕНТРОВ ТЯЖЕСТИ И ИЗГИБА СЕЧЕНИЯ.....	36
2.6. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ МАТРИЦЫ ЖЕСТКОСТИ ТОНКОСТЕННОГО ЭЛЕМЕНТА ПРИ ПЕРЕХОДЕ К ОБЩЕЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ.....	62
2.7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ В ТОНКОСТЕННОМ СТЕРЖНЕ ОТКРЫТОГО ПРОФИЛЯ.....	75
2.8. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС «СТК» ДЛЯ РАСЧЕТА ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ТОНКОСТЕННЫХ СТЕРЖНЕЙ ОТКРЫТОГО ПРОФИЛЯ.....	77

<b>3. ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ТОНКОСТЕННЫХ СТЕРЖНЕЙ ОТКРЫТОГО ПРОФИЛЯ</b> .....	82
3.1. ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ РАСЧЕТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТОНКОСТЕННЫХ СТЕРЖНЕЙ ОТКРЫТОГО ПРОФИЛЯ .....	82
3.2. ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ УЗЛОВ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ТОНКОСТЕННЫХ СТЕРЖНЕЙ ОТКРЫТОГО ПРОФИЛЯ .....	100
3.2.1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА УЗЛОВ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ.....	100
3.2.2. УЗЛЫ КОЛОНН .....	105
3.2.3. УЗЛЫ СОПРЯЖЕНИЯ БАЛОК С КОЛОННАМИ .....	111
3.2.4. УЗЛЫ СОПРЯЖЕНИЯ БАЛОК .....	129
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	139
<b>ЛИТЕРАТУРА</b> .....	140

## ВВЕДЕНИЕ

При проектировании конструкций из тонкостенных стержней открытого профиля, как правило, используют решения, исключаящие кручение отдельных элементов. Однако для ряда систем полностью предотвратить кручение невозможно. Примером таких конструкций служат подкрановые балки, закручиваемые при эксцентричном приложении вертикального давления кранов и действии горизонтальных тормозных усилий; балки скатных покрытий; балки пола транспортерных галерей; пространственные рамы; мембранные системы с эксцентричным креплением мембраны к опорному контуру и т.п. Кручение тонкостенных стержней открытого профиля может иметь место из-за неточностей изготовления и монтажа, повреждения связей, изменения расчетных схем вследствие ремонта и реконструкции. При кручении тонкостенных стержней открытого профиля, из-за стеснения деформации сечения, появляются дополнительные секториальные напряжения, вносящие существенный вклад в суммарные напряжения. Фактическая жесткость на кручение тонкостенного стержня открытого профиля значительно выше, чем жесткость при чистом кручении. Неправильный учет жесткостных параметров стержней ведет к неверному определению усилий и перемещений, что снижает надежность системы.

При невозможности исключить кручение конструктивных элементов расчет стержневых систем в настоящее время, как правило, выполняют только с учетом деформаций чистого кручения. Такой подход к расчету тонкостенных стержней открытого профиля обусловлен отсутствием нормативных данных, позволяющих учесть влияние стесненного кручения на несущую способность конструкции из-за недостаточной изученности вопроса и невозможности определения усилий в пространственных стержневых конструкциях с учетом стесненного кручения современными вычислительными комплексами, так как включенные в их состав стержневые тонкостенные конечные элементы применимы только для расчета отдельных стержней.

Для расчета конструкций из тонкостенных стержней открытого профиля используется аппроксимация тонкостенных стержней тремя продольными элементами со специально назначенными жесткостями, объединенными жесткими поперечниками. Применение метода стержневой аппроксимации ведет к существенному усложнению расчетных схем, что затрудняет его использование для практиче-

ских расчетов. При наличии в узлах эксцентриситетов использование стержневой аппроксимации не позволяет точно определить напряженно-деформированное состояние конструкции.

Расчет конструкций из тонкостенных стержней открытого профиля может выполняться с использованием конечных элементов оболочки. Это требует тщательного выбора сетки разбиения конструкции. При этом число узлов и элементов возрастает по сравнению со стержневой аппроксимацией в несколько раз.

Наиболее рационально для расчета конструкций из тонкостенных стержней открытого профиля использовать стержневые тонкостенные конечные элементы, учитывающие не только чистое, но и стесненное кручение при совпадении и несовпадении центров тяжести и изгиба, наличие или отсутствие эксцентриситетов в узлах, что делает актуальной разработку таких конечных элементов.

Существенное влияние на работу конструкции из тонкостенных стержней открытого профиля оказывают узловые соединения. Учет влияния конструкции узлов на напряженно-деформированное состояние стержневой системы является важной практической задачей.

# 1. ОПЫТ РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ СТЕРЖНЕЙ ОТКРЫТОГО ПРОФИЛЯ

## 1.1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В 1855 г. Сен-Венаном разработана теория кручения призматического стержня. Было установлено, что для некруглого стержня при наличии связей, мешающих искажению сечения, возникает изгибное или стесненное кручение, при котором в элементе возникают дополнительные нормальные напряжения. Дальнейшее развитие теории привело к разработке Л. Prandtl [55] мембранной аналогии кручения.

Существенный вклад в изучение вопроса стесненного кручения тонкостенных стержней открытого профиля внес С.П. Тимошенко [37, 38]. Он рассмотрел задачу устойчивости плоской формы изгиба двутавровой балки и установил, что в этом случае распределение напряжений по сечению отличается от закона плоских сечений. Результаты теоретических исследований подтверждены данными эксперимента. В 1920 г. С.П. Тимошенко разработал методику определения центра изгиба тонкостенных открытых профилей.

Первое экспериментальное подтверждение отклонения от закона плоских сечений получил Bach-Baumann при изгибе прокатного швеллера [42]. В 1909 г. он установил, что при действии нагрузки, параллельной плоскости стенки швеллера, кроме изгиба в этой плоскости происходит поворот сечения относительно продольной оси. R. Maillart [51] показал, что несоблюдение закона плоских сечений имеет место и в симметричных профилях, при этом наблюдается изгиб отдельных элементов балки. Он же предложил методику определения положения центра изгиба сечения [52]. Вопросы нахождения центра изгиба сечения рассмотрены С.Н. Каном [25], Л.Н. Воробьевым [13] и Л.Н. Чирковым А.А. [40]. Л.Н. Ивановым [24] представлены формулы для определения положения центра изгиба и нейтральной оси сечения при упругопластическом изгибе с растяжением или сжатием.

С. Weber [67] разработал методику нахождения центра изгиба сечения и дополнительных нормальных напряжений, возникающих при кручении двутавровых, швеллерных и Z-образных профилей. С. Wagner и W. Pretschner [66] исследовали устойчивость тонкостенных стержней и предложили формулы для определения критической силы при потере устойчивости в изгибно-крутильной форме.

Законченную теорию расчета тонкостенных стержней открытого профиля на стесненное кручение разработал В.З. Власов [8–12]. При кручении тонкостенного стержня возникает явление изгибного или стесненного кручения. Кроме касательных напряжений в поперечных сечениях возникает взаимно уравновешенная система нормальных напряжений, приводимая к новой обоб-



щенной силе, которую автор назвал бимоментом. Крутящий момент, действующий в сечении стержня, воспринимается не только за счет чистого кручения, но и за счет изгибного кручения. Установлен закон распределения нормальных напряжений в поперечном сечении, в соответствии с которым нормальные напряжения в сечении тонкостенного элемента распределяются пропорционально секториальным площадям. Продольные перемещения точек сечения равны:

$$u = \zeta - \xi'x - \eta'y - \theta'\omega, \quad (1.1)$$

где  $\zeta$  – осевые перемещения,  $\xi$  и  $\eta$  – поперечные перемещения,  $x$  и  $y$  – координаты точек сечения,  $\theta$  – угол закручивания,  $\omega$  – секториальная площадь. Первые три слагаемых выражают закон плоских сечений, четвертое слагаемое (секториальная депланация) определяет часть перемещений, возникающую при кручении стержня, и описывается законом секториальных площадей. Для прямолинейных участков профиля секториальные площади всегда представляются прямолинейными эпюрами, так как секториальная площадь на таком участке всегда линейная функция от длины профильной линии.

Кроме общепринятых линейных и угловых перемещений В.З. Власов рассматривает искривление плоского поперечного сечения – депланацию, равную первой производной угла закручивания сечения. Частным случаем закона секториальных площадей является закон плоских сечений. В.З. Власовым получены общие дифференциальные уравнения деформирования под нагрузкой тонкостенных стержней. Представлена методика определения координат центра изгиба и геометрических секториальных характеристик. Показано, что закручивание тонкостенного стержня открытого профиля может возникнуть даже при действии только продольных сил. При этом бимомент, действующий на стержень, равен произведению величины силы на секториальную площадь точки приложения силы. Установлено, что принцип Сен-Вена (о быстром затухании по длине стержня местных напряжений от уравновешенной внешней нагрузки) для тонкостенных стержней неизменяемого открытого профиля практически не соблюдается.

В.З. Власовым показана аналогия между теорией стесненного кручения тонкостенных стержней открытого профиля и теорией изгиба балок. С учетом этого сделан важный практический вывод о возможности применения для расчета систем из тонкостенных стержней методов и приемов расчета балок, известных в сопротивлении материалов и строительной механике.

Теоретические разработки В.З.Власова подтверждены многочисленными экспериментами, что позволяет использовать эту теорию для построения инженерной методики расчета тонкостенных стержней открытого профиля.

В работах Г.Ю.Джанелидзе и Я.Г. Пановко [21–23] рассмотрены основные уравнения, описывающие статическую работу тонкостенных стержней при условии малых перемещений, прикладная теория В.З. Власова для тонкостенных стержней с открытым профилем и прикладная теория А.А. Уманского для тонкостенных стержней с замкнутым профилем. Проанализирова-

ны допущения, принятые В.З. Власовым о недеформируемости контура сечения и равенстве нулю деформаций сдвига срединной поверхности стержня с открытым профилем. При рассмотрении вопроса о деформации тонкостенного стержня сделан важный практический вывод о возможности разделения деформаций, связанных с кручением стержня, и деформаций от изгиба и растяжения. Исследовано влияние на деформации стержня двух близко расположенных, равных по величине и противоположно направленных крутящих моментов. Установлено, что в этом случае действие крутящих моментов на тонкостенный стержень эквивалентно действию бимоента, равного произведению величины крутящих моментов на расстояние между ними. Выявлено несоблюдение принципа Сен-Венана при действии нагрузок, статически эквивалентных нулю, на тонкостенные стержни открытого профиля, что требует осторожного применения данного принципа при расчете тонкостенных стержней. Рассмотрена возможность кручения тонкостенного стержня относительно оси, не проходящей через центр изгиба сечения и фиксированной конструктивными особенностями конструкции (закрепление профиля на уровне полок, составные стержни, продольная ось которых не проходит через центры изгиба ветвей), и показана необходимость разработки практической методики расчета подобных конструкций. Установлено, что при кручении стержня относительно фиксированной оси, не проходящей через центр изгиба, в нем возникают изгибающие моменты. Представлены упрощенные теории, позволяющие в ряде случаев получать приемлемые с инженерной точки зрения результаты.

В.Г. Александров [1] исследовал работу неразрезных тонкостенных балок с открытым профилем и установил, что при эксцентричном приложении нагрузки от вертикального давления крана напряжения в балке несимметричного сечения из-за стесненного кручения возрастают до 1,5 раза. При устройстве тормозной балки напряжения в отдельных точках сечения увеличиваются до 1,3 раза, а в некоторых точках сечения меняют знак. Касательные напряжения из-за стесненного кручения в сечении меняются незначительно.

Г.П. Соболевский [36] отмечает преимущество пространственных стержневых конструкций перед плоскостными и отсутствие практических методик расчета систем из тонкостенных стержней открытого профиля. Несущая способность таких конструкций существенно зависит от крутильной жесткости элементов. Наиболее сильно кручение сказывается на работе большепролетных ферм, мостов, стрел экскаваторов, крановых конструкций, мачт. Исследуется влияние на крутильную жесткость поперечных связей в виде планок или решеток, так называемых бимоментных связей. Установлено, что за счет постановки поперечных планок крутильная жесткость увеличивается более чем в 10 раз, а при устройстве связей в виде решеток – до 100 и более раз. Отмечается, что наличие поперечных ребер практически не сказывается на крутильной жесткости элемента. Подробно исследовано определение бимоментов при изменении точки приложения продольной силы.

## 1.2. РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ

Д.В. Бычков и А.К. Мрощинский [4] кроме теории кручения тонкостенных стержней открытого профиля приводят методику расчета одно- и многопролетных тонкостенных балок, дают графики, таблицы и формулы для определения усилий при кручении тонкостенных стержней открытого профиля с различными условиями закрепления по концам.

Д.В. Бычковым [5, 6, 7] рассмотрены теория и практические приемы расчета балочных и рамных систем из тонкостенных открытых профилей на кручение. Установлено, что известные из строительной механики методы сил и перемещений расчета балок и рам на изгиб могут применяться и при расчете с учетом стесненного кручения. Автором предложены зависимости и таблицы для определения коэффициентов, используемых при вычислении усилий и перемещений в системе. Введение коэффициентов значительно упростило расчеты тонкостенных стержней с открытым профилем при кручении, создало предпосылку для разработки численной методики расчета. Показано, что в узлах рам выполняется равновесие бимоментов. Д.В. Бычков установил, что для большинства рам угловые и линейные перемещения узлов незначительно влияют на бимоменты и приближенный расчет можно выполнять без учета этих перемещений. Бимоменты по длине балки затухают значительно быстрее, чем изгибающие моменты, поэтому при расчете неразрезных балок можно ограничиться 4 или даже 3 смежными пролетами в отличие от 5 при расчете на изгиб. В работе рассмотрены только плоские рамы, высказано предположение, что разработанная методика может быть легко доработана для пространственных систем. Автором необоснованно замечено, что из-за быстрого затухания бимоментов для сложных пространственных систем учет стесненного кручения не представляет большой важности. Достоинством работы является построение зависимостей и таблиц для расчета простых тонкостенных систем (прямолинейный стержень с различными граничными условиями, плоские рамы), которые можно использовать в практике проектирования. Невозможность использования предложенной методики расчета для пространственных систем ограничивает область применения результатов данного исследования.

Б.Н. Горбунов и А.И. Стрельбицкая [15] основное внимание уделили практическому расчету рам из тонкостенных стержней при действии пространственной нагрузки. Авторами разработаны методы расчета рам с открытым и замкнутым сечениями. При расчете тонкостенных стержней с открытым профилем использована теория В.З. Власова, при расчете тонкостенных стержней с замкнутым профилем – теория А.А. Уманского. Для расчета рам предложено использовать метод деформаций и метод сил. В качестве параметра, характеризующего деформацию стержней, введено понятие меры деформации. При расчете рам по методу деформаций используется метод моторных тензоров, реализующий метод перемещений в матричной форме. Рассматривается построение матриц нагрузки и жесткости, составление системы линейных уравнений для нахождения неизвестных перемещений узлов плоских рам. Общее число неиз-

вестных перемещений в узле, принятое в расчетах, семь: три угловых, три поступательных перемещения и деформация. Основным расчетным случаем являются прямоугольные плоские рамы без эксцентриситетов в узлах при одинаковой для всех сходящихся в узле стержней мере депланации. Ось стержня располагается по оси центров изгиба, полки стержней, сходящихся в узле, параллельны плоскости рамы. Фасонки, соединяющие пояса стержней в узле, приняты бесконечно жесткими в своей плоскости и допускающими депланацию из своей плоскости. Установлено, что погрешность, вносимая размерами фасонки, не оказывает значительного влияния на точность расчетов. Авторами показано, что в узлах рам выполняется равновесие бимоментов в узле ( $\sum B = 0$ ). В работе представлены расчеты плоских прямоугольных рам при действии нагрузок, вызывающих кручение и деформацию рам из плоскости. Исследовано влияние на работу рам эксцентриситетов в узлах, вызванных несовпадением центров изгиба и тяжести и невозможностью пересечения в одной точке осей нескольких стержней, соединяемых в узле. Наличие эксцентриситетов влияет на расчет рам следующим образом:

- усложняется структура матрицы жесткости за счет добавления новых элементов при сохранении общего числа неизвестных;
- линейные перемещения центра узла не совпадают с линейными перемещениями центров тяжести или центров изгиба примыкающих узлов, поэтому для определения усилий в стержнях, после определения перемещений узлов, необходимо определить перемещения концов стержней и по ним определить усилия;
- усложняется уравнение равновесия бимоментов в узле;
- в общем случае депланация узла вызывает дополнительные углы поворота и линейные перемещения концов стержней, примыкающих к рассматриваемому узлу.

К достоинствам данной работы следует отнести разработку методики матричного расчета плоских рам из стержней с полками, параллельными плоскости рамы, без эксцентриситетов в узлах, постановку вопроса о необходимости учета эксцентриситетов в узлах. Отсутствие данных о построении матрицы жесткости стержневой системы при эксцентриситетах в узлах с произвольной ориентацией стержней не позволяет напрямую использовать результаты исследований при расчете пространственных стержневых конструкций.

Методика численного расчета разработана В.А. Постновым и И.Я. Хархуримом [32]. Предложен конечный элемент тонкостенного стержня открытого профиля для численного расчета судовых конструкций. Узлы элемента имеют по четыре степени свободы: линейное перемещение, угол поворота, угол закручивания и производную от угла закручивания (депланация). Матрица жесткости элемента имеет размерность  $8 \times 8$ . Для перехода из местной в общую систему координат используется матрица преобразования, включающая направляющие косинусы местных осей  $X'$  и  $Y'$  относительно общих осей  $X$  и  $Y$ . Депланация в общей и местной системе координат считается одинаковой. Разра-

ботанная матрица может применяться только при расчете плоских перекрытий: сопоставление результатов численных расчетов с известными решениями показало их хорошее соответствие. Использование предложенной матрицы жесткости для расчета пространственных конструкций из тонкостенных стержней открытого профиля (в этом случае узлы конструкции имеют по 7 степеней свободы) с различными узловыми сопряжениями при наличии эксцентриситетов в узлах невозможно.

В работе [56] представлена программа расчета прямолинейных тонкостенных стержней открытого профиля с учетом деформации сечения. При расчете стержень разбивается на заданное число конечных элементов. Конечный элемент обладает 12 степенями свободы: две линейные (в поперечных направлениях к оси стержня), три угловые и деформация. Примыкание других стержней к рассчитываемому учитывается приближенно: введением по концам рассматриваемого стержня упругих связей. Исключение из расчета продольных перемещений стержня, а также расчет только одиночных стержней не позволяют использовать программу для расчета пространственных систем.

Стержневые тонкостенные конечные элементы для исследования тонкостенных стержневых конструкций открытого профиля использованы S. Rajasekaran [57 – 59]. Стержневой конечный элемент с 14 степенями свободы используется не только для определения перемещений и усилий, но и для оценки устойчивости стержней, а также для расчета конструкций с учетом развития в них пластических деформаций. Автором рассмотрены и несимметричные переменные по длине стержни тонкостенного открытого профиля.

Различные типы тонкостенных конечных элементов и методики численного расчета для исследования стержневых конструкций предложены А.С. Городецким, В.С. Здоренко и В.С. Карпиловским [17], Ю.И. Немчиновым [31], М.А. Grisfield [49], G. Gluck и J. Kalev [48], M. Resaiee-Pajand и M. Maayedian [61], R.S. Barsoum и R.U. Gallagher [43], Z.P. Bazant и M.E. Nimeiri [44], S.L. Chan и S. Kitipornchai [45], Y.B. Yang [68], M.C. Kim, G.C. Lee и K.C. Chang [50], K.C. Trahair [65], Н.Г. Гореловым [16], М.А. Гурковой [19]. С использованием тонкостенных конечных элементов решались задачи расчета в упругой стадии и с учетом развития пластических деформаций, исследовалась устойчивость тонкостенных стержней открытого профиля. Данные исследования показали возможность успешного применения тонкостенных конечных элементов для расчета тонкостенных стержней открытого профиля. Однако недостаточно полно рассмотрены вопросы построения матриц жесткости стержней при несовпадении центров тяжести и изгиба и наличии в узлах эксцентриситетов, перехода от матрицы жесткости стержня в местной системе координат к матрице жесткости в общей системе координат с учетом конструктивного решения узлов сопряжений стержней.

В работе Л.А. Гильденгорона [14] представлен обзор нормативных требований по расчету стальных конструкций в некоторых развитых странах. Анализ норм этих стран показал, что в них напрямую не учитываются секториальные напряжения, возникающие при кручении тонкостенных стержней открытого

Научное издание

Александр Романович Туснин

# ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ТОНКОСТЕННЫХ СТЕРЖНЕЙ ОТКРЫТОГО ПРОФИЛЯ

Компьютерная верстка: *Д.А. Матвеев, М.А. Шпилько*  
Редактор: *В.Ш. Мерзлякова*  
Дизайн обложки: *Н.С. Романова*

Лицензия ЛР № 0716188 от 01.04.98.  
Подписано к печати 17.05.09. Формат 70х100/16.  
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.

Усл. 8 п.л. Тираж 500 экз. Заказ №

Издательство Ассоциации строительных вузов (АСВ)  
129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, отдел реализации – КМК, оф. 348  
тел., факс: (499)183-56-83, e-mail: [iasv@mgsu.ru](mailto:iasv@mgsu.ru), <http://www.iasv.ru/>