

Устойчивость тонкостенного холодногнутого профиля при изгибе — краткий обзор публикаций

М.Р. Гарифуллин¹, Н.И. Ватин²

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет», 195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29.

Информация о статье	История	Ключевые слова
УДК 624.014, 624.046 Аналитический обзор	Подана в редакцию 12 апреля 2014 Принята 12 июня 2014	изгиб, устойчивость, холодногнутый профиль, формы потери устойчивости, депланация.

АННОТАЦИЯ



Статья посвящена обзору отечественных и зарубежных публикаций по теме устойчивости холодногнутого тонкостенного профиля при работе на изгиб. Тонкостенные конструкции на сегодняшний день имеют широкие перспективы внедрения в массовое строительство в России и за рубежом и могут быть использованы при строительстве целого ряда сооружений различного назначения. Стремительные темпы научно-технического прогресса, а также наметившиеся тенденции к рационализации проектных и монтажных работ отводят ЛСТК одну из главных ролей в современном гражданском и промышленном строительстве.

Проведенный обзор работ содержит как теоретические, основанные на стержневом и оболочечном моделировании работы конструкций, так и экспериментальные результаты исследований. Обращено внимание на публикации, содержащие комплексный анализ проблемы, включающий сравнение аналитических и экспериментальных результатов.

Содержание

Введение	33
Обзор отечественных работ	35
Обзор зарубежных публикаций	38
Метод приведенной ширины (Effective Width Method)	39
Обобщенная теория балок (Generalized Beam Theory)	39
Нейронные сети (Neural Networks) и Генетическое программирование (Genetic Programming)	40
Метод конечных элементов (Finite Element Method)	40
Метод конечных полос (Finite Stripe Method) и прямой прочностной метод (Direct Strength Method)	41
Метод приведенных площадей (Effective Area Method) и	42
Метод приведенных сечений (Effective Section Method)	42
Заключение	42

¹ Контактный автор:
+7 (937) 302 5055; 273marcel@gmail.com (Гарифуллин Марсель Ринатович, аспирант)

² +7 (921) 964 3762, vatin@mail.ru (Ватин Николай Иванович, д.т.н, профессор, директор Инженерно-строительного института СПбПУ)

Введение

В последние годы в России на фоне динамично развивающейся металлургии и растущего спроса на металлическую продукцию особое внимание уделяется легким стальным тонкостенным конструкциям (ЛСТК).

Тонкостенные конструкции в сравнении с традиционными горячекатаными металлическими конструкциями имеют ряд технологических и эксплуатационных достоинств (малый удельный вес конструкций, экономичность, приспособленность для изготовления на потоковых автоматизированных линиях и т.д.) [9].

Благодаря этим достоинствам ЛСТК находят широкое применение в различных областях промышленного и гражданского строительства [9, 65, 53].

Тонкостенные конструкции хорошо зарекомендовали себя при строительстве малоэтажных жилых и гражданских, а также универсальных производственных зданий [130, 132] (рисунок 1). Не менее широко ЛСТК применяются в составе традиционных строительных систем для устройства покрытий и надстройки мансардных этажей существующих и новых строений [131].



Рисунок 1. Каркас производственного здания из ЛСТК

В последнее время ЛСТК начали активно применяться в конструкции ограждающих панелей в сборно-монолитном строительстве [9, 25, 133]. Такие панели получили название термопанелей (рисунок 2а).

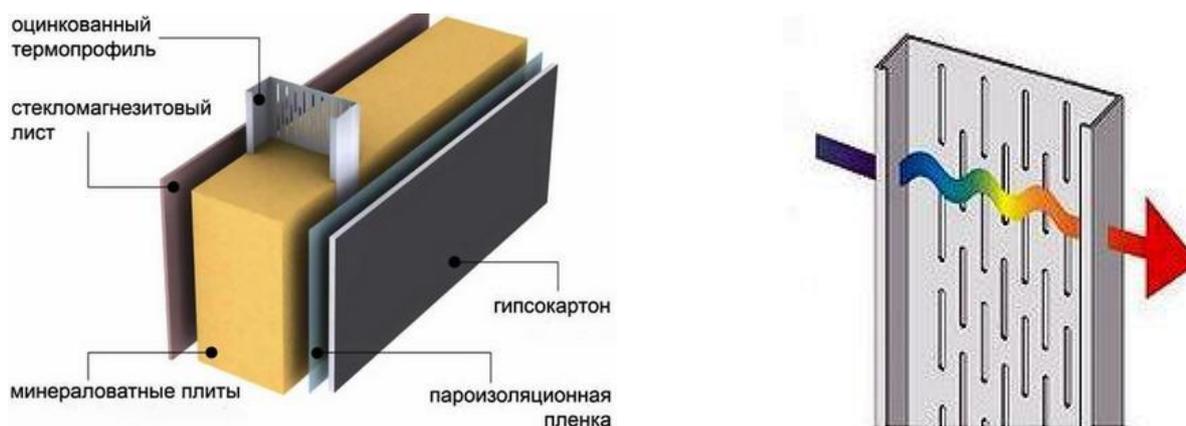


Рисунок 2. а – принципиальная схема устройства термопанели,
б – схема движения теплового потока в термопрофиле

Для уменьшения теплопотерь в подобных панелях в качестве несущих элементов применяются профили с просечками, так называемые термопрофили. Благодаря наличию просечек в панелях не образуется «мостик холода», что приводит к повышению эффективности самой панели (рисунок 2б).

Однако, такое преимущество тонкостенных конструкций, как легкость, при определенных условиях оборачивается недостатком, существенно уменьшающим их несущую способность [53, 29, 134]. Отрицательной особенностью тонкостенных конструкций является склонность к потере устойчивости при

нагрузках заметно ниже проектных, что затрудняет их проектирование и, как следствие, ограничивает их широкое применение.

Как показывает практика, зачастую из-за ошибок в проектировании зданий из ЛСТК, нередки аварийные случаи. Так, например, в ночь с 24 на 25 декабря 2010 г. в Брянской области произошло обрушение сельскохозяйственного здания. Как выяснилось позже, сооружение было изначально неверно запроектировано, в результате чего верхний пояс, соединенный на болтах жестко со стойками, потерял устойчивость и стал причиной аварии (рисунок 3).



Рисунок 3. Потеря устойчивости верхнего пояса фермы из ЛСТК

Таким образом, обеспечение устойчивой работы таких конструкций является важнейшей задачей на пути широкого внедрения ЛСТК в массовое строительство. Очевидно, тонкостенные конструкции уже на стадии проектирования требуют тщательного анализа их несущей способности и, особенно, касаются вопросов устойчивости.

Несмотря на растущую популярность подобных конструкций и большой объем научных исследований на всем этапе развития ЛСТК, на сегодняшний день в России имеются существенные недостатки в нормативной, методической и расчетно-вычислительной базах проектирования ЛСТК, которые не позволяют легко и однозначно производить их расчет.

Во введенном в 2011 г. своде правил [42] содержатся указания по проверке общей устойчивости изгибаемых элементов сплошного сечения без дифференциации конструкций на тонкостенные и толстостенные. Свод правил уделяет большое внимание вопросам проверки устойчивости стенок и поясных листов изгибаемых элементов, расстановке ребер жесткости, однако не рассматривает наиболее важный случай, когда ребра жесткости не предусмотрены по конструктивным соображениям. Устойчивость формы поперечного сечения не рассмотрена вовсе. Также не затрагиваются вопросы взаимодействия различных форм потери устойчивости.

Руководство по проектированию стальных тонкостенных балок [43] содержит указания по прочностному расчету тонкостенных стержней с учетом редуцирования поперечного сечения, однако, при этом, совершенно не рассматривает проверку их устойчивости.

Рекомендации Айрумяна Э. Л. [33] хоть и содержат более четкие указания по расчету прочности тонкостенных элементов, дифференцируют расчет устойчивости тонкостенных элементов в зависимости от типа сечения, но, несмотря на это, в вопросах проверки местной устойчивости во многом ссылаются на действующий СНиП II-23-81 «Стальные конструкции».

Подобное состояние дел приводит к неясности и отсутствию единогласия среди проектировщиков во многих вопросах проектирования ЛСТК и, как следствие, стимулирует формирование научной базы по расчету подобных конструкций для создания четких методик их расчета.

Основная задача данной статьи — провести краткий обзор отечественных и зарубежных публикаций по рассматриваемой теме, выявить основные тенденции развития расчетных методик и определить наиболее перспективные и актуальные направления дальнейших исследований.

Обзор отечественных работ

Основы развития методов расчета тонкостенных стержней на протяжении XX и начала XXI вв. подробно описываются в работе Рыбакова В.А. [53].

На сегодняшний день все существующие методы расчета тонкостенных конструкций принято условно подразделять на две основные группы: основанные на стержневом моделировании и на оболочечном [26, 53].

К первой группе относятся аналитические методы, предусматривающие моделирование стержня с учетом такого силового фактора, как бимомент [17-19, 36]. Основной проблемой таких методов является их сложность и трудоемкость, трудность их программирования и, как следствие, необходимость ограничиваться лишь рамками теоретических исследований.

В основе второй группы расчетов лежит представление тонкостенного элемента в виде оболочки и дальнейший расчет с применением численных методов, наиболее распространенным из которых является метод конечных элементов [1-8, 21-23, 26-28, 31, 32]. Важной особенностью этой группы расчетов является широкое использование для расчета программных комплексов (SCAD, MicroFE, SOFiSTiK, ANSYS и проч.), существенно уменьшающих трудоемкость вычислений и позволяющих успешно решать широкий спектр задач различного уровня. Такие способы расчета позволяют получить достаточно точные для инженерных расчетов результаты, однако являются весьма трудоемкими при проектировании многостержневых конструкций.

Большой вклад в развитие теории тонкостенных элементов внес А. Р. Туснин, в работах которого [6, 45, 46] предлагается метод тонкостенных конечных элементов (ТКЭ). В ТКЭ в каждом узле кроме учитываемых при расчете обычных стержневых систем трех линейных и трех угловых степеней свободы учитывается седьмая степень свободы узла – депланация сечения. Таким образом, ТКЭ с узлами в начале и конце имеет 14 степеней свободы.

Туснин А.Р. и Туснина О.А. [128] представили вычислительную систему «Сталькон» для расчета стальных стержневых конструкций с учетом нормативных требований.

Туснин А.Р. и Прокич М. [129] приводят теоретическое обоснование коэффициента, учитывающего развитие пластических деформаций, для балок двутаврового сечения при действии бимоента, а также предлагают методику для расчета двутавров на стесненное кручение.

Перельмутер А.В. и Сливкер А.И. в книге [10] предлагают способ моделирования тонкостенных элементов при помощи так называемой «бистержневой модели», что позволяет выполнять расчет тонкостенного стержня, оставаясь в рамках ограничений стандартного программного обеспечения, оперирующего конечными элементами с твердотельными узлами.

Каменских И.В. [62] предлагает для расчета устойчивости тонкостенных конструкций использовать метод модуль-элементов, снижающий размер системы уравнений равновесия в 10-100 раз по сравнению с методом конечных элементов. Доказывается приемлемость дискретизации конструкции на пространственные модуль-элементы, даны рекомендации по разбиению конструкций на модуль-элементы.

Рыбаков В.А. [63] предлагает метод расчета тонкостенных конструкций на основе полусдвиговой теории Сливкера (2005), учитывающий часть деформаций сдвига в срединной поверхности стенок стержней, вызванных действием секториальных сил.

Лалиным В.В. [26, 27] рассмотрено построение матриц жесткости тонкостенных конечных элементов различных типов по полусдвиговой теории Сливкера и по бессдвиговой теории расчета Власова в зависимости от способа аппроксимации функций деформаций, рассмотрены задачи о стесненном кручении тонкостенного стержня, имеющего различные граничные условия на концах с точки зрения сходимости и поиска статических силовых факторов.

Большой вклад в исследование проблем устойчивости тонкостенных конструкций внес Белый Г.И. [17-19]. В работе [17] он приводит приближенный аналитически-численный метод деформационного расчета упругопластических тонкостенных стержней двусимметричного сечения, что предполагает использование частных решений задач недеформационного расчета и бифуркационного расчета устойчивости.

В работе Белого А.Г. [20] в общем виде решена задача деформационного расчета и устойчивости для стержней произвольного профиля (открытого, замкнутого и комбинированного) при действии продольной силы, приложенной с двухосным эксцентриситетом.

В работах Воронцова Г.В. [58, 59] предложены варианты линеаризованных дифференциальных уравнений «геометрически» и «физически» нелинейных задач об изгибно-крутильных деформациях тонкостенных стержней открытого профиля. Рассмотрены два «шаговых» метода решения исходной нелинейной задачи. Получены общие выражения для формирования последовательно уточняемых матриц жесткости стержней как систем с 14-ю степенями свободы с возможностью внедрения их в программы метода конечных элементов при расчете стержневых нелинейно деформируемых конструкций [60].

Богданович А.У. [50-52] исследует работу стержней переменного сечения, для которых использование известных уравнений Власова-Тимошенко не представляется возможным. Приводятся уравнения и методики расчетов, позволяющие решать задачу прочности и устойчивости тонкостенных стержней непрерывно-переменного сечения с учетом возможного появления пластических деформаций и геометрической нелинейности процесса деформирования стержня.

В работе Юрченко В.В. [36] предложены аналитические зависимости для определения значений критических сил при расчете устойчивости центрально сжатых тонкостенных стержней С-образного профиля. Рассматриваются случаи потери устойчивости элементов поперечного сечения (местной потери устойчивости), а также потери устойчивости формы поперечного сечения тонкостенного стержня.

Евзеров И.Д. [30], рассматривая некоторые задачи устойчивости для стержней и пластин, получил представления перемещений по сечению стержня и толщине пластины для геометрически нелинейных задач, выполнил переход от вариационной постановки трехмерной задачи устойчивости к соответствующим задачам для стержней и пластин.

Методика расчета центрально и внецентренно сжатых неидеальных стержней прямоугольного профиля в критическом и закритическом состояниях изложена в работах Ильяшенко А.В. [54-56], в которых в качестве расчетного метода использован принцип возможных перемещений.

Группой ученых из ННГАСУ [11] изложены результаты исследований несущей способности тонкостенных стальных конструкций с учетом развития пластических деформаций и конструктивных факторов в неразрезных ригелях и большепролетных рамных конструкциях переменного сечения.

Юзиков В.П. и Завьялова О.Б. [41] для расчета тонкостенных стержней открытого профиля предложили методику учета сдвига срединной поверхности, получили дифференциальные уравнения изгиба и кручения, а также матрицу жесткости.

Синельщиков А. В., Юзиков В. П. [40] предлагают математическую модель тонкостенного стержневого конечного элемента с прямолинейной осью и переменным сечением.

В работе Белова И.Д. и Юрченко В.В. [39] освещен вопрос нормативного проверочного расчета устойчивости тонкостенных холодногнутых профилей открытого сечения в соответствии с российскими и украинскими строительными нормами, уделено внимание определению редуцированных размеров поперечных сечений элементов из тонкостенных холодногнутых профилей для тех случаев, когда гибкость элементов сечения превышает их предельное значение.

Анализ пространственной устойчивости элементов рам и колонн переменного сечения при действии продольной силы и изгибающего момента проведен в работе С. И. Билыка [38]. Получена система дифференциальных уравнений работы упругого стержня с переменным сечением в плоскости действия момента. Предложено приближенное решение системы дифференциальных уравнений при аппроксимации момента инерции сечения и секториального момента инерции сечения параболической зависимостью. Разработана методика проверки устойчивости упругой двутавровой колонны переменного сечения из плоскости действия изгибающего момента.

В работе Хайруллина Ф.С. [64] разработаны вариационные методы определения напряженно-деформированного состояния тонкостенных конструкций, основанных на использовании функций с конечными носителями произвольной степени аппроксимации.

Сурьянинов Н.Г. [61] для расчета тонкостенных стержней обобщил метод граничных элементов, построил математические модели тонкостенных стержневых систем открытого, замкнутого и комбинированного профиля при статических нагрузках, определил фундаментальные решения описывающих их дифференциальных уравнений.

Астахов И.В. [13-15] разработал алгоритм и программу расчета на пространственную устойчивость тонкостенных стержневых элементов из гнутых профилей открытого сечения с учетом различных условий загрузки; фактического распределения механических характеристик стали и остаточных напряжений; начальных искривлений и углов закручивания; формы сечения; а также возможной потери местной устойчивости.

Особый интерес и большую практическую ценность подставляют работы по численному анализу устойчивости тонкостенных конструкций с применением программно-вычислительных комплексов, в основе большинства из которых лежит метод конечных элементов. Компьютерное моделирование позволяет в сжатые сроки проводить исследования большого количества образцов с учетом начальных несовершенств, различных условий закрепления, а также анализировать все виды потери устойчивости, включая местную. На фоне целого ряда публикаций по этой теме особо выделяются работы ученых на базе СПбГПУ [1-5, 8, 9, 16, 25, 28], проводящих масштабные исследования перфорированных тонкостенных конструкций — термопрофилей, широко применяемых в производстве ограждающих панелей.

В работе Ватина Н.И. и Поповой Е.Н. [9] приводится история развития производства и становления тонкостенных конструкций в России, освещаются основные области их применения, проводится общий анализ напряженно-деформированного состояния, а также даются рекомендации по компьютерному моделированию термопрофилей.

Синельников А.С. и Орлова А.В. [1] приводят результаты экспериментальных и аналитических исследований прочности и устойчивости холодногнутого просечно-растяжного профиля.

Смазнов Д.Н. [3, 4] рассматривает устойчивость и формы потери устойчивости холодногнутой стоек из высокопрочной стали, дает рекомендации по оптимальным шагам разбиения элементов, приводит практические рекомендации для конструирования новых типов поперечных сечений с рациональным расположением жестких вставок [5].

Ватин Н.И., Рыбаков В.А. [16] проводят сравнительный анализ ручного и автоматизированного расчета тонкостенной консольной балки швеллерового сечения и делают вывод о применимости действующих на тот момент строительных норм к проектированию подобных сооружений.

Рыбаков В.А. и Гамаюнова О.С. [25] провели исследование прочностных и жесткостных характеристик термопрофиля, предложили способ его моделирования с учетом просечек, а также установили их влияние на его жесткостные характеристики.

Недвиг П.Н. и Рыбаков В.А. [28] предложили методику испытаний прочности стальных холодногнутой тонкостенных балок с отсутствием и наличием продольных просечек, определили зависимости прочности балок от конструктивных и технологических параметров.

В статье Гордеевой А.О. [8] разработана подробная методика построения конечно-элементных расчетных моделей перфорированных профилей в SCAD.

Задачи устойчивости центрально сжатых перфорированных стоек рассмотрены в работах Шатова Д.С. [2], Назмеевой Т.В. [29].

Юрченко В.В. [7] проводит анализ напряженно-деформированного состояния каркаса здания из тонкостенных холодногнутой профилей при помощи SCAD с использованием трехмерной конечно-элементной модели.

В статье Крестина А.Н. и Крылова И.И. [12] произведен анализ напряженно-деформированного состояния тонкостенной балки из гнутых оцинкованных профилей в упругой стадии работы материала, проведено сравнение теоретических и экспериментальных результатов.

Теплых А.В. [21] приводит результаты линейных и нелинейных статических расчетов устойчивости стенок двутавровых балок и рам с использованием расчетных комплексов SCAD и Nastran, приводит рекомендации по выбору типа расчета и соответствующих коэффициентов в зависимости от гибкости элементов.

Кикоть А.А. [22] рассматривает задачу о влиянии ширины поясов и отгибов в сечениях С- и Z-образных стальных тонкостенных холодногнутой профилей на эффективность работы в условиях изгиба и отмечает, что характер влияния ширины поясов на эффективность во многом зависит от толщины стали. В работе [23] автор разрабатывает алгоритм и компьютерную программу определения прогибов изгибаемых

элементов из стальных тонкостенных холодногнутох профилей с учетом потери местной устойчивости и потери устойчивости формы сечения, показывает области предпочтительного применения программы.

В статье Ветюкова Ю.М. и Елисеева В.В. [24] рассмотрен пример решения задачи об изгибно-крутильной потере устойчивости прямого стержня при сжатии в сравнении с классическим решением Эйлера, существующими решениями для существующих стержней и численным решением в оболочечной постановке.

В публикации Марченко Т.В. и Банникова Д.О. [34] выполнен сопоставительный анализ форм потери устойчивости стержневых тонкостенных элементов открытого профиля. В частности, проведены расчеты по определению критической силы центрально сжатых тонкостенных стержней по аналитическим и численным методикам расчета, а также по действующим нормативным документам.

В статье Лещенко А.П. [35] описан расчет устойчивости внецентренно сжатого двутаврового стержня методом аналогии и сравнение с результатами эксперимента при различном эксцентриситете.

В работе Волковой В.Е., Макаровой А.А. [37] выполнено конечноэлементное исследование напряженно-деформированного состояния балки с гибкой стенкой конвейерной галереи с учетом геометрической нелинейности. Рассмотрена проблема снижения локальных напряжений и обеспечения местной устойчивости стенки балки.

Ольков Я.И., Полторацнев А.С. [48] провели численное исследование работы тонкостенной двутавровой балки с гибкой стенкой с учетом геометрической и физической нелинейности.

Теоретические и экспериментальные исследования устойчивости стенки тонкостенного профиля несимметричного сечения проведены в работе Зверева В.В. и Мещеряковой Е.В. [44].

Максак В. И. и Максак Т. В. [47] проводят расчет основного обрешеточного тонкостенного составного неравнобокого двутаврового кронштейна открытого профиля на вертикальную нагрузку и подтверждают результаты расчета экспериментом.

Потапов А. В. [49] предлагает метод расчета на устойчивость стальных стержней открытого профиля с различными типами поперечных сечений при их работе за пределом упругости. В реализации метода учитывается возможность потери устойчивости, как в стадии упругого деформирования, так и в стадии неупругого деформирования, то есть с учетом развития пластических деформаций.

Чернов С.А. [57] рассматривает устойчивость при центральном сжатии тонкостенного стержня открытого профиля с недеформируемым контуром поперечного сечения, производит сравнение результатов аналитического расчета на устойчивость тонкостенного стержня и расчета методом конечных элементов по разработанной программе для ЭВМ.

В работе [127] авторы проводят анализ работы пространственной металлической конструкции покрытия большепролетного спортивного сооружения, а также выполняют поиск наиболее рациональной геометрической схемы главной несущей конструкции.

Вопросы устойчивости тонкостенных трапециевидных профилей при продольно-поперечном изгибе подробно рассмотрены в работах Холкина Е.Г. [66-68].

Обзор зарубежных публикаций

Широкое применение ЛСТК находят и за рубежом [65, 126]. Проблеме устойчивости тонкостенных холодногнутох конструкций посвящено множество работ, исследований, публикаций.

Стоит отметить следующее: в иностранных публикациях авторы выделяют 3 основные формы потери устойчивости: местная (local buckling), устойчивость формы поперечного сечения (distortional buckling) и общая (global buckling): изгибная (flexural) и/или крутильная (torsional). В некоторых статьях исследуются вопросы их взаимодействия [34, 35, 89, 90, 103].

В настоящее время, все методы расчета тонкостенных конструкций, как правило, делятся на две основные группы: аналитические и численные. Некоторые из этих методов кратко представлены в этой статье.

Метод приведенной ширины (Effective Width Method)

В настоящее время, *метод приведенной ширины (МПШ)* является одним из традиционных методов расчета тонкостенных конструкций. Основанный Т. фон Карманом в 1932 г., доработанный Г. Винтером МПШ превратился в основной метод расчета тонкостенных конструкций, реализованный в спецификации AISI – строительных нормах Северной Америки. Тем не менее, в связи с эмпирическим происхождением МПШ имеет приблизительные коэффициенты редуцирования и неочевидную природу используемых уравнений, что, в свою очередь, ограничивает его широкое применение.

Ю Ч. и Ян В. [69] предлагают метод расчета, основанный на МПШ для расчета устойчивости формы сечения наиболее распространенных холодногнутых С и Z секций, работающих на изгиб.

Ли Л. и Чен Дж. [108] представили аналитическую модель для анализа устойчивости формы сечения холодногнутого Z и Σ профилей.

Чу К. и Кеттл Р. [109] представили аналитическую модель для расчета изгибно-крутильной формы потери устойчивости тонкостенных швеллеровых балок, частично раскрепленных в поперечном направлении листовым металлом, при воздействии подъемных нагрузок.

Унгуреану В. [111] создал базу данных для геометрических и аналитических моделей расчета несущей способности некоторых наиболее часто используемых холодногнутого профилей.

Виейра Дж. [113] предложил и верифицировал упрощенные модели для расчета продольных усилий, возникающих в С-образных тонкостенных прогонах.

Роджерс К. и Шустер Р. [117] исследовали поперечные деформации сопряжения полок и стенок сечений тонкостенных элементов, сравнили аналитические методы расчета на изгиб с существующими результатами экспериментальных исследований.

Трахаир Н. и Хэнкок Г. [118] разработали упрощенный метод расчета устойчивости тонкостенных элементов из плоскости действия момента, в котором редуцированный модуль упругости используется для моделирования влияния остаточных напряжений и начальных несовершенств.

Ли Л. [124] представил аналитическую модель для предварительного расчета изгибно-крутильной формы потери устойчивости холодногнутого Z-образного прогона, частично раскрепленного из плоскости листовым металлом.

Обобщенная теория балок (Generalized Beam Theory)

Обобщенная теория балок (ОТБ) была первоначально разработана Шардтом Р. [70] и доработана Дэвисом Дж. и коллегами [71]. ОТБ позволяет эффективно прогнозировать различные формы потери устойчивости тонкостенных конструкций, и, что главное, исследовать их взаимодействие.

Сильвестр Н. и Камотим Д. [72] применили ОТБ для исследования изгиба стальных холодногнутого конструкций. В [73, 74] они представили аналитическую формулу на основе ОТБ для оценки бифуркационных напряжений холодногнутого колонн, балок и балок-колонн с произвольно наклоненными продольными ребрами жесткости.

Абамбре М. [75] использовал подход на основе ОТБ для исследования геометрически и/или физически нелинейной работы призматических тонкостенных стержней, испытывающих произвольные деформации и сделанных из нелинейных изотропных материалов.

Базалья К. [76] представил результаты ОТБ-исследований устойчивости холодногнутого стальных С и Z прогонов, раскрепленных листовой сталью.

Бебиано Р. с коллегами [77] представили GBTUL 1.0 β – бесплатную программу, позволяющую рассчитывать холодногнутые элементы на устойчивость и динамические нагрузки. Программа, разработанная на кафедре строительства и архитектуры Технического университета Лиссабона, является численной реализацией ОТБ.

Гонсалвес Р. [110] представил формулировку ОТБ для выполнения анализа потери устойчивости тонкостенных стержней с произвольными поперечными сечениями.

Базалья К. [123] представил результаты численного исследования на основе ОТБ различных форм потери устойчивости холодногнутого стальных прогонов, раскрепленных из плоскости момента и подверженных действию подъемной нагрузки.

Луо Х. [125] представил две вычислительные модели на основе ОТБ, позволяющих анализировать несущую способность холодногнутого тонкостенных швеллеров, изгибающихся в плоскости наибольшей жесткости.

Нейронные сети (Neural Networks) и Генетическое программирование (Genetic Programming)

Нейронные сети (НС) успешно используются в решении сложных проблем в различных областях техники. Адели Х. впервые применил НС для проектирования зданий и сооружений. Ташакори А. и Адели Х. [78] использовали НС для оптимизации холодногнутого стальных пространственных конструкций. Эль-Кассас Е. с коллегами [79] использовали НС для расчета критической нагрузки для холодногнутого стальных профилей.

Пала М. в [80] рассмотрел применение НС для расчета критической силы при потере устойчивости стальных тонкостенных элементов. В [81] он предлагает новую формулу на основе НС для исследования устойчивости формы поперечного сечения стальных холодногнутого шарнирно-закрепленных швеллеров.

В [82] Пала М. исследует упругую устойчивость формы поперечного сечения стальных холодногнутого элементов помощью генетического программирования.

Метод конечных элементов (Finite Element Method)

Метод конечных элементов (МКЭ) – один из наиболее распространенных численных методов, используемых для исследования тонкостенных конструкций. На сегодняшний день существует множество вычислительных комплексов на основе МКЭ, которые позволяют успешно анализировать работу холодногнутого элементов.

Шафер Ч. Ю и Шафер Б. в работах [83, 84] описывают серию экспериментов по исследованию местной устойчивости [83] и устойчивости формы поперечного сечения [84] холодногнутого стержней при работе на изгиб. В статьях приводится сравнение различных методов расчета с прямым прочностным методом. Статья [85], будучи логическим продолжением статей [83, 84], верифицирует используемые конечноэлементные модели и выполняет параметрические исследования, выходя за рамки описываемых экспериментов.

В статье [86] представлен КЭ анализ устойчивости холодногнутого стальных элементов с круглыми отверстиями, усиленными ребрами жесткости.

Жао И. с коллегами [87] описывают упрощенные методы расчета устойчивости формы поперечного сечения стальных тонкостенных конструкций.

Гарднер Л. и Незеркот Д. [88] представляют последовательный подход к численному моделированию работы стержней круглого замкнутого сечения из нержавеющей стали, подвергнутых различным видам нагрузок.

Расмуссен К. [89, 90] приводит экспериментальные результаты и последующее подробное КЭ моделирование взаимодействия различных форм потери устойчивости тонкостенных балок из нержавеющей стали.

Хайдарали М. и Незеркот Д. [91] рассматривают два вида конечноэлементных моделей для исследования устойчивости раскрепленных из плоскости тонкостенных холодногнутого балок с учетом свойств материала и геометрических нелинейностей.

В работе [92] Хайдарали М. и Незеркот Д. исследуют влияние краевых ребер жесткости на работу сжатых полок сечений. В статье [93] они оценивают влияние размера и расположения промежуточных ребер жесткости на процесс потери устойчивости поперечно раскрепленных холодногнутого стальных балок.

Пастор М. и Рур Ф. [104, 105] приводят результаты экспериментальных и численных исследований тонкостенных U- и Ω- образных элементов, подвергнутых чистому изгибу.

Айдин М. [112] проводит КЭ анализ изгибной и изгибно-крутильной форм потери устойчивости элементов тонкостенных рамных конструкций.

Мозн К. и Шафер Б. [114] разработали и обобщили упрощенные методы аппроксимации общей местной форм потери устойчивости, а также устойчивости формы поперечного сечения перфорированных холодногнутых колонн и балок.

Ренс В. коллегами [115] представляют точные конечно-элементные модели для прогнозирования работы и критической силы тонкостенных стальных швеллеров, подвергнутых чистому изгибу.

Саманта А. и Кумар А. в работе [116] рассматривают устойчивость формы поперечного сечения моносимметричных двутавровых балок в зависимости от характера приложения нагрузки.

Пачош П. и Василевич П. [121] представляют результаты экспериментальных исследований тонкостенных балок двутаврового сечения, сравнивают значения критической нагрузки с результатами, полученными аналитически и с помощью метода конечных элементов.

Магнушки К. [122] описывает теоретические решения проблемы устойчивости холодногнутого тонкостенных балок открытого и закрытого профиля и подтверждают результаты экспериментально.

Метод конечных полос (Finite Stripe Method) и прямой прочностной метод (Direct Strength Method)

Метод конечных полос (МКП) – эффективный, легко программируемый метод для анализа тонкостенных конструкций. В настоящее время МКП получил широкое распространение благодаря целому ряду преимуществ по сравнению с МКЭ.

Большой вклад в развитие применения МКП для расчета тонкостенных конструкций внес Шафер Б. . На основе МКП он разработал прямой прочностной метод (ППМ) [94], который был принят американским институтом стали и сплавов (AISI) в 2003-2004 годах в качестве альтернативного метода расчета холодногнутого тонкостенных конструкций.

В статье [97] Шафер Б. сравнивает три новые оценочные методики, основанные на ППМ, с расчетными методами в американских нормативных документах; отмечает ограничения ППМ.

Адани С. и Шафер Б. [119, 120] приводят теоретическое обоснование и практические примеры для модального разложения форм потери устойчивости тонкостенных элементов, ограничивая традиционные решения МКП.

Шафер Б. и Адани С. [95] приводят техническое обоснование и примеры анализа устойчивости холодногнутого стальных элементов с использованием ими же разработанной программы CUFSM, в основе которой лежит МКП.

Шафер Б. и Пекоч Т. [96] рассматривают МКП-моделирование холодногнутого стальных элементов, уделяя особое внимание вопросам геометрических несовершенств и остаточных напряжений.

Эккер Г. [98, 99] применил изопараметрический метод конечных полос (ИМКП) к анализу перфорированных тонкостенных стальных конструкций.

Яо З. и Расмуссен К. [100, 101] представили аналитические разработки и численную реализацию ИМКП к физически и геометрически нелинейному анализу перфорированных тонкостенных стальных конструкций.

Зиракян Т. в исследовании [106] проводит анализ потери устойчивости формы поперечного сечения симметричных двутавровых балок с гибкой стенкой.

Чу К. с коллегами [107] описывают исследование местной устойчивости и устойчивости формы поперечного сечения стальных холодногнутого швеллеровых балок при воздействии на них равномерно распределенной нагрузки.

Метод приведенных площадей (Effective Area Method) и Метод приведенных сечений (Effective Section Method)

Метод приведенных площадей (МПП) является прямым методом, первоначально разработанным Батистой М. для расчета тонкостенных колонн [102]. Основанный на компьютерных разработках метода конечных полос МПП в настоящее время используется для исследования взаимодействия местной и общей форм потери устойчивости холодногнутых стальных элементов. Метод приведенных сечений (МПС), являющийся продолжением МПП, недавно был включен в строительные нормы Бразилии в качестве метода расчета стальных холодногнутых элементов.

Батиста М. [103] проводит анализ прочности стальных холодногнутых балок и колонн с использованием МПС, сравнивает его с традиционный методом приведенной ширины.

Заключение

Подводя итоги проведенного обзора работ, можно сделать следующие выводы:

1. На сегодняшний день тема исследований тонкостенных холодногнутых конструкций является актуальной и перспективной — это подтверждается огромным количеством публикаций результатов теоретических и экспериментальных исследований ЛСТК, как российских, так и иностранных.

2. Как видно из анализа зарубежных работ и публикаций, на сегодняшний день большинство стран в мире имеют собственные, устоявшиеся, четко сформулированные и проверенные многочисленными экспериментальными исследованиями нормативные базы для расчета тонкостенных конструкций (система еврокодов в Европе, спецификация AISI в Северной Америке и др.). Тем не менее, налицо активное развитие и внедрение других, более прогрессивных и точных расчетных методов, как например Direct Strength Method в Америке, Effective Section Method в Бразилии, Generalized Beam Theory и проч. Кроме того, большое внимание уделяется исследованиям местной устойчивости и устойчивости формы сечения, множество публикаций посвящено проблемам начальных несовершенств и различных условий закрепления. Освещены вопросы взаимодействия различных форм потери устойчивости.

3. В России отсутствует единый нормативный документ, позволяющий проектировщикам просто и однозначно рассчитывать соединения из тонкостенных конструкций, что порождает большой интерес к данной теме. Однако, несмотря на целый ряд теоретических исследований, в настоящее время не сформулирован и не реализован практический подход к решению данной задачи. Очень мало публикаций экспериментальных исследований работы тонкостенных конструкций на сжатие и, особенно, на изгиб, практически отсутствуют публикации по исследованию местной устойчивости и устойчивости формы сечения. Все это, на фоне активного развития компьютерных технологий, подталкивает проектировщиков и исследователей все чаще прибегать к помощи мощных вычислительных комплексов на основе МКЭ для моделирования работы тонкостенных конструкций. Стоит отметить целый ряд подобных работ, в которых авторы добились достаточной для инженерной практики совпадения теоретических и практических результатов. Однако, среди проектировщиков нет единого мнения в вопросах применимости таких методов, нет четких рекомендаций по шагу разбиения сетки и вопросам закрепления, остается открытым вопрос моделирования и учета действия просечек термопрофиля и, самое главное, не определены коэффициенты запаса. Все это, с учетом большой трудоемкости процесса компьютерного моделирования, создает определенные трудности для инженеров. И все же, положительная тенденция полученных результатов на фоне растущего интереса к тонкостенным конструкциям оставляет надежду, что в скором времени отечественные инженеры увидят столь долгожданный и желанный нормативный документ, который позволит без проблем рассчитывать тонкостенные конструкции и откроет им дорогу на отечественный рынок.

Литература

1. Синельников А.С., Орлова А.В. Прочность просечно растяжного профиля: испытания и математическое моделирование // Вестник МГСУ. 2013. № 12. С. 41-54.
2. Шатов Д.С. Конечноэлементное моделирование перфорированных стоек открытого сечения из холодногнутох профилей // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 3(21). С. 32-35.
3. Смазнов Д.Н. Устойчивость при сжатии составных колонн, выполненных из профилей из высокопрочной стали // Инженерно-строительный журнал. 2009. № 3(5). С. 42-49.
4. Смазнов Д.Н. Моделирование работы тонкостенных стальных профилей в «СКАД» // Наука и инновации в технических университетах: материалы Третьего Всерос. форума студентов, аспирантов и молодых ученых. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2009. С. 33-34.
5. Смазнов Д.Н. Конечноэлементное моделирование работы жестких вставок тонкостенных холодноформованных стальных профилей // Научный журнал КубГАУ. 2011. № 67(03). С. 54-67.
6. Туснин А.Р. Численный расчет конструкций из тонкостенных стержней открытого профиля. М. : МГСУ: Изд-во АСВ, 2009. 143 с.
7. Юрченко В.В. Проектирование каркасов зданий из тонкостенных холодногнутох профилей в среде «SCAD Office» // Инженерно-строительный журнал. 2010. № 8(18). С. 38-46.
8. Гордеева А.О., Ватин Н.И. Расчетная конечно-элементная модель холодногнутого перфорированного тонкостенного стержня в программно-вычислительном комплексе SCAD Office // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 3(21). С. 36-46.
9. Ватин Н.И., Попова Е.Н. Термопрофиль в легких стальных строительных конструкциях. СПб. : Изд-во СПбГПУ, 2006. 63 с.
10. Перельмутер А.В., Сливкер, В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. М. : Изд-во ДМК Пресс. 2002. 618 с.
11. Колесов А.И., Лапшин А.А., Валов А.В. Современные методы исследования тонкостенных стальных конструкций // Приволжский научный журнал. 2007. № 1. С. 28-33.
12. Кретинин А.Н., Крылов И.И. Особенности работы тонкостенной балки из гнутых оцинкованных профилей // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2008. № 6. С. 1-11.
13. Белый Г.И., Астахов И.В. Пространственная устойчивость элементов конструкций из стальных холодногнутох профилей // Монтажные и специальные работы в строительстве. 2006. № 9. С. 21-25.
14. Астахов И.В. Особенности расчета на прочность и устойчивость стержневых элементов из гнутых профилей // Доклады 61-ой научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета. СПб.: Изд-во СПбГАСУ, 2004.
15. Астахов И.В. Пространственная устойчивость элементов конструкций из холодногнутох профилей. Дисс. на соиск. учен. степ. к.т.н.: Спец. 05.23.01. С-Пб., 2006. 123 с.
16. Ватин Н.И., Рыбаков В.А. Расчет металлоконструкций: седьмая степень свободы // СтройПРОФИЛЬ. 2007. № 2(56). С. 60-63.
17. Белый Г.И. К деформационному расчету тонкостенных стержней несимметричного сечения // Металлические конструкции и испытания сооружений. Л. : ЛИСИ, 1984. С. 26-30.
18. Белый Г.И. Влияние эксцентричного опирания концов и уровня приложения нагрузки на устойчивость плоской формы изгиба тонкостенного криволинейного стержня // Сборник трудов ЛИСИ. Л. : ЛИСИ, 1974. С. 18-25.
19. Белый Г.И. Расчет упругопластических тонкостенных стержней по пространственно-деформируемой схеме // Строительная механика: Межвуз. темат. сб. тр. Л. : ЛИСИ, 1983. С. 40-48.
20. Белый А.Г. Деформационный расчет и устойчивость тонкостенных призматических стержней произвольного профиля сжатых с двухосным эксцентриситетом. Дисс. на соиск. учен. степ. к.т.н.: Спец. 05.23.17. С-Пб., 2000. 114 с.
21. Теплых А.В. Применение оболочечных и объемных элементов при расчетах строительных стальных конструкций в программах SCAD и Nastran с учетом геометрической и физической нелинейности // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 3(21). С. 4-20.

22. Кикоть А.А. Влияние ширины поясов и отгибов в сечениях С- и Z-образных стальных тонкостенных холодногнутых профилей на эффективность работы в условиях изгиба // Ползуновский вестник. 2011. № 1. С. 70-75.
23. Кикоть А.А., Мурзин Е.В. Определение прогибов изгибаемых элементов из стальных тонкостенных холодногнутых профилей // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2011. № 2. С. 99-108.
24. Ветюков Ю.М., Елисеев В.В. Упругие деформации и устойчивость равновесия тонкостенных стержней открытого профиля // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2007. № 52-1. С. 49-53.
25. Рыбаков В.А., Гамаюнова О.С. Влияние перфорации стенки на несущую способность термопрофилей // СтройПРОФиль. 2008. № 1. С. 128.
26. Лалин В.В., Рыбаков В.А. Конечные элементы для расчета ограждающих конструкций из тонкостенных профилей // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 8(26). С. 69-80.
27. Лалин В.В., Рыбаков В.А., Морозов С.А. Исследование конечных элементов для расчета тонкостенных стержневых систем // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 1(27). С. 53-73.
28. Недвига П.Н., Рыбаков В.А. Эмпирические методы оценки несущей способности стальных тонкостенных просечно-перфорированных балок и балок со сплошной стенкой // Инженерно-строительный журнал. 2009. № 8(10). С. 27-30.
29. Назмеева Т.В. Несущая способность сжатых стальных тонкостенных элементов сплошного и перфорированного сечения из холодногнутого С-профиля // Инженерно-строительный журнал. 2013. № 5(40). С. 44-51.
30. Евзеров И.Д. Задачи устойчивости для стержней и пластин // Инженерно-строительный журнал. 2014. № 1(45). С. 6-11.
31. Ал Али М., Томко М., Бадак М. Расчет сопротивления сжатых элементов легких стальных тонкостенных конструкций закрытого профиля. Часть 1 // Инженерно-строительный журнал. 2013. № 5(40). С. 38-43.
32. Ал Али М., Томко М. Расчет сопротивления сжатых элементов легких стальных тонкостенных конструкций закрытого профиля. Часть 2 // Инженерно-строительный журнал. 2014. № 1(45). С. 53-58.
33. Айрумян Э.Л. Рекомендации по проектированию, изготовлению и монтажу конструкций каркаса малоэтажных зданий и мансард из холодногнутого стальных оцинкованных профилей производства ООО «Балтпрофиль» / ЦНИИПСК им. Мельникова. М., 2004. 64 с.
34. Марченко Т.В., Банников Д.О. Сопоставительный анализ форм потери устойчивости тонкостенных стержневых элементов // Металлические конструкции. 2009. № 3(15). С. 178-188.
35. Лещенко А.П., Евтушенко С.И., Текутов Е.Г. Экспериментальные исследования устойчивости тонкостенных стержней // Вестник ВолгГАСУ. Строительство и архитектура. 2009. № 16(35). С. 24-27.
36. Юрченко В.В. Разработка аналитических зависимостей для оценки значений критических сил потери местной устойчивости и потери устойчивости формы сечения тонкостенных стержней открытого профиля // Металлические конструкции. 2012. № 3(18). С. 185-196 (укр).
37. Волкова В.Е., Макарова А.А. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния балки с гибкой стенкой // Металлические конструкции. 2012. № 4(17). С. 261-269.
38. Билык С.И. Методология проверки пространственной устойчивости колонн с переменной высотой стенки из плоскости действия изгибающего момента // Металлические конструкции. 2008. № 4(14). С. 279-284.
39. Белов И.Д., Юрченко В.В. Про проверку устойчивости центрально-сжатых стержней из одиночных тонкостенных холодногнутого профилей открытого сечения // Металлические конструкции. 2010. № 4(16). С. 239-250.
40. Синельщиков А.В., Юзиков В.П. Математическая модель тонкостенного стержневого конечного элемента с прямолинейной осью и переменным сечением // Промышленное и гражданское строительство. 2007. № 9. С. 19-21.
41. Юзиков В.П. Завьялова О.Б. Расчет тонкостенных стержней открытого профиля с учетом сдвига срединной поверхности // Известия вузов. Строительство. 2011. № 1. С. 108-115.
42. СП 16.13330.2011 Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81.

43. Руководство по проектированию стальных тонкостенных балок. М. : Госстрой СССР, Главпромстройпроект, Союзметаллостройниипроект, ЦНИИПроектстальконструкция. 1977. 28 с.
44. Зверев В.В., Мещерякова Е.В. Исследование устойчивости тонкостенного стального U-образного профиля несимметричного сечения в составе покрытия поэлементной сборки // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2007. № 7. С. 55-58.
45. Туснин А.Р. Применение тонкостенного конечного элемента при расчёте прогона открытого профиля // Научно-технический вестник Поволжья. 2012. № 6. С. 405-408.
46. Туснин А.Р. Конечный элемент для численного расчета конструкций из тонкостенных стержней открытого профиля // Металлические конструкции. 2009. Т. 15. С. 73-78.
47. Максак В.И., Максак Т.В. Расчет тонкостенной балки-кронштейна открытого профиля // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2012. № 2. С. 91-100.
48. Ольков Я.И., Полторацнев А.С. Актуальность и возможность исследования работы стальных балок с гибкой стенкой на основе численного моделирования // Academia. Архитектура и строительство. 2011. № 2. С. 95-99.
49. Потапов А.В. Устойчивость стальных стержней открытого профиля с учетом реальной работы материала // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2009. № 1(11). С. 112-115.
50. Кузнецов И.Л., Богданович А.У. Устойчивость тонкостенного стержня переменного сечения при продольном сжатии и учет нелинейных деформаций // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2003. № 2. С. 123-128.
51. Богданович А.У., Кузнецов И.Л. Устойчивость тонкостенного стержня непрерывно-переменного сечения при продольном сжатии с учетом нормативных эксцентриситетов // Известия вузов. Строительство, 2003. № 9. С. 11-18.
52. Богданович А.У., Абдюшев А.А. Устойчивость стержня переменного эллиптического сечения при продольном сжатии // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2006. № 2(6). С. 38-41.
53. Рыбаков В.А., Гамаюнова О.С. Напряженно-деформированное состояние элементов каркасных сооружений из тонкостенных стержней // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2013. № 7(12). С. 79-123.
54. Ильяшенко А.В., Ефимов И.Б. Экспериментальное исследование тонкостенных стержней с искривлёнными пластинчатыми элементами // Организация и производство строительных работ. М. : Центр. Бюро н.-т. информации Минпромстроя, 1983. С. 3-38.
55. Ильяшенко А.В., Ефимов И.Б. Напряжённо-деформированное состояние после местной потери устойчивости сжатых тонкостенных стержней с учётом начальной погиби // Строительные конструкции и материалы. Защита от коррозии. Уфа: Труды НИИПромстроя, 1981. С. 110-119.
56. Ильяшенко А.В. О внецентренном сжатии тонкостенных стержней, составленных из начально искривленных пластинчатых элементов // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2008. Т. 4. № 1. С. 71-74.
57. Чернов С.А. К расчету на устойчивость тонкостенной стержневой системы // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. 2013. № 2(21). С. 162-170.
58. Воронцов Г.В. Расчет геометрически и физически нелинейно деформируемых тонкостенных стержней на прочность, устойчивость и колебания // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2007. № 5. С. 29-35.
59. Воронцов Г.В., Кабельков А.Н. Методы расчета геометрически нелинейно деформируемых тонкостенных стержней // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2007. № 6. С. 49-52.
60. Воронцов Г.В., Петров И.А., Алексеев С.А. Матрицы жесткости пространственно загруженных нелинейно деформируемых стержней. Часть 2 // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2008. № 4. С. 68-72.
61. Сурьянинов Н. Г. Обобщение метода граничных элементов к расчету стержней, пластин и оболочек. Дисс. на соиск. учен. степ. д.т.н.: Спец. 01.02.04. Луцк, 2010. 409 с.

62. Каменских И. В. Математическое и численное моделирование задач устойчивости тонкостенных конструкций методом модуль-элементов. Дисс. на соиск. учен. степ. к.ф.-м.н.: Спец. 05.13.18. Комсомольск-на-Амуре, 2004. 210 с.
63. Рыбаков В. А. Применение полусдвиговой теории В.И. Сливкера для анализа напряженно-деформированного состояния систем тонкостенных стержней. Дисс. на соиск. учен. степ. к.т.н.: Спец. 01.02.04. С-Пб., 2012. 184 с.
64. Хайруллин Ф. С. Вариационные методы расчета тонкостенных конструкций сложной формы на основе аппроксимирующих функций произвольного порядка с конечными носителями. Дисс. на соиск. учен. степ. д.ф.-м.н.: Спец. 01.02.04. Казань, 2007. 267 с.
65. Жмарин Е.Н. Международная ассоциация легкого стального строительства // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2012. № 2. С. 27-30.
66. Холкин Е.Г. Исследование местной устойчивости тонкостенных трапециевидных профилей при продольно-поперечном изгибе. Дисс. на соиск. учен. степ. к.т.н.: Спец. 01.02.06. Омск, 2010. 120 с.
67. Холкин Е.Г., Соколовский З.Н. Методика расчета трапециевидных тонкостенных профилей с учетом местной потери устойчивости // Омский научный вестник. 2010. № 3-93. С. 50-53.
68. Соколовский З.Н., Холкин Е.Г. Определение несущей способности тонкостенных конструкций с учетом местной потери устойчивости // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2013. № 3(31). С. 93-96.
69. Yu C., Yan W. (2011). Effective Width Method for determining distortional buckling strength of cold-formed steel flexural C and Z sections. *Thin-walled structures*. 2011. Vol. 49. Issue 2. Pp. 233-238.
70. Schardt R. (1994). Generalized beam theory—an adequate method for coupled stability problems. *Thin-Walled Structures*. 1994. Vol. 19. Issue 2. Pp. 161-180.
71. Davies J. M., Leach P., Heinz D. (1994). Second-order generalized beam theory. *Journal of Constructional Steel Research*. 1994. Vol. 31. Issue 2. Pp. 221-241.
72. Silvestre N., Camotim D. (2002). Second-order generalised beam theory for arbitrary orthotropic materials. *Thin-walled structures*. 2002. Vol. 40. Issue 9. Pp. 791-820.
73. Silvestre N., Camotim D. (2004). Distortional buckling formulae for cold-formed steel C and Z-section members: Part I—derivation. 2004. *Thin-Walled Structures*. Vol. 42. Issue 11. Pp. 1567-1597.
74. Silvestre N., Camotim D. (2004). Distortional buckling formulae for cold-formed steel C-and Z-section members: Part II—Validation and application. *Thin-Walled Structures*. Vol. 42. Issue 11. Pp. 1599-1629.
75. Abambres M., Camotim D., Silvestre N. et. al. (2014). GBT-based structural analysis of elastic-plastic thin-walled members. *Computers Structures*. 2014. Issue 136. Pp. 1-23.
76. Basaglia C., Camotim D., Gonçalves R. et. al. (2013). GBT-based assessment of the buckling behaviour of cold-formed steel purlins restrained by sheeting. *Thin-walled structures*. 2013. Issue 72. Pp. 217-229.
77. Bebiano R., Silvestre N., Camotim D. (2008) GBTUL — a code for the buckling analysis of cold-formed steel members. In Nineteenth international specialty conference on cold-formed steel structures. St. Louis. Missouri U.S.A., October 14-15. 2008.
78. Tashakori A., Adeli H. (2002). Optimum design of cold-formed steel space structures using neural dynamics model. *Journal of Constructional Steel Research*. 2002. Vol. 58. Issue 12. Pp. 1545-1566.
79. El-Kassas E. M. A., Mackie R. I., El-Sheikh A. I. Using neural networks in cold-formed steel design. *Computers Structures*. 2001. Vol. 79. Issue 18. Pp. 1687-1696.
80. Pala M., Caglar N. (2007). A parametric study for distortional buckling stress on cold-formed steel using a neural network. *Journal of Constructional Steel Research*. 2007. Vol. 63. Issue 5. Pp. 686-691.
81. Pala M. (2006). A new formulation for distortional buckling stress in cold-formed steel members. *Journal of Constructional Steel Research*. 2006. Vol. 62. Issue 7. Pp. 716-722.
82. Pala M. (2008). Genetic programming-based formulation for distortional buckling stress of cold-formed steel members. *Journal of Constructional Steel Research*. 2008. Vol. 64. Issue 12. Pp. 1495-1504.
83. Yu C., Schafer B. W. (2003) Local buckling tests on cold-formed steel beams. *Journal of Structural Engineering*. 2003. Vol. 129. Issue 12. Pp. 1596-1606.
84. Yu C., Schafer B. W. (2006). Distortional buckling tests on cold-formed steel beams. *Journal of structural engineering*. 2006. Vol. 132. Issue 4. Pp. 515-528.

85. Yu C., Schafer B. W. (2007). Simulation of cold-formed steel beams in local and distortional buckling with applications to the direct strength method. *Journal of Constructional Steel Research*. 2007. Vol. 63. Issue 5. Pp. 581-590.
86. Yu C. (2012). Cold-formed steel flexural member with edge stiffened holes: Behavior, optimization, and design. *Journal of Constructional Steel Research*. 2012. Issue 71. Pp. 210-218.
87. Zhao Y., Yan W. M., Yu C. (2012). Simplified Method for Elastic Distortional Buckling Stress of Cold-Formed Thin-Wall Steel Members. *Applied Mechanics and Materials*. 2012. No. 166. Pp. 3391-3398.
88. Gardner L., Nethercot D. A. (2004). Numerical modeling of stainless steel structural components-A consistent approach. *Journal of structural Engineering*. 2004. Vol. 130. Issue 10. Pp. 1586-1601.
89. Niu S., Rasmussen K. J. Fan F. (2014). Distortional-global interaction buckling of stainless steel C-beams: Part I—Experimental investigation. *Journal of Constructional Steel Research*. 2014. Issue 96. Pp. 127-139.
90. Niu S., Rasmussen K. J., Fan F. (2014). Distortional–global interaction buckling of stainless steel C-beams: Part II—Numerical study and design. *Journal of Constructional Steel Research*. 2014. Issue 96. Pp. 40-53.
91. Haidarali M. R., Nethercot D. A. (2011). Finite element modelling of cold-formed steel beams under local buckling or combined local/distortional buckling. *Thin-Walled Structures*. 2011. Vol. 49. Issue 12. Pp. 1554-1562.
92. Haidarali M. R., Nethercot D. A. (2012). Local and distortional buckling of cold-formed steel beams with edge-stiffened flanges. *Journal of Constructional Steel Research*. 2012. Issue 73. Pp. 31-42.
93. Haidarali M. R., Nethercot D. A. (2012). Local and distortional buckling of cold-formed steel beams with both edge and intermediate stiffeners in their compression flanges. *Thin-Walled Structures*. 2012. Issue 54. Pp. 106-112.
94. Schafer B. W. (2008). Review: The Direct Strength Method of cold-formed steel member design. *Journal of Constructional Steel Research*. 2008. Vol. 67. Issue 7. Pp. 766-778.
95. Schafer B. W., Ádány S. (2006). Buckling analysis of cold-formed steel members using CUFSM: conventional and constrained finite strip methods. 18th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures. 2006. Orlando. Florida. 16 p.
96. Schafer B. W., Peköz T. (1998). Computational modeling of cold-formed steel: characterizing geometric imperfections and residual stresses. *Journal of Constructional Steel Research*. 1998. Vol. 47. Issue 3. Pp. 193-210.
97. Schafer B.W., Pekoz T. (1998). Direct strength prediction of cold-formed steel members using numerical elastic buckling solutions. Fourteenth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures. St. Louis. Missouri U.S.A., October 15-16. 1998.
98. Eccher G., Rasmussen K. J. R., Zandonini R. (2008). Linear elastic isoparametric spline finite strip analysis of perforated thin-walled structures. *Thin-Walled Structures*. 2008. Vol. 46. Issue 3. Pp. 242-260.
99. Eccher G., Rasmussen K. J. R., Zandonini R. (2009). Geometric nonlinear isoparametric spline finite strip analysis of perforated thin-walled structures. *Thin-walled structures*. 2009. Vol. 47. Issue 2. Pp. 219-232.
100. Yao Z., Rasmussen K. J. (2011). Material and geometric nonlinear isoparametric spline finite strip analysis of perforated thin-walled steel structures—Analytical developments. *Thin-walled structures*. 2011. No. 49(11). Pp. 1359-1373.
101. Yao Z., Rasmussen K. J. (2011). Material and geometric nonlinear isoparametric spline finite strip analysis of perforated thin-walled steel structures—Numerical investigations. *Thin-walled structures*. 2011. Vol. 49. Issue 11. Pp. 1374-1391.
102. De Miranda Batista E. (1989). E'tude de la stabilite' des profils a` parois minces et section ouverte de types U et C. Collection des publications de la Faculte' des Sciences Applique'es. Issue 119. University of Liege. 1989.
103. De Miranda Batista E. (1989). Effective section method: A general direct method for the design of steel cold-formed members under local-global buckling interaction. *Thin-Walled Structures*. 2010. Vol. 48. Issue 4. Pp. 345-356.
104. Pastor M. M., Roure F. (2008). Open cross-section beams under pure bending. I. Experimental investigations. *Thin-walled structures*. 2008. Vol. 46. Issue 5. Pp. 476-483.

105. Pastor M. M., Roure F. (2009). Open cross-section beams under pure bending II. Finite element simulation. Thin-walled structures. 2009. Vol. 47. Issue 5. Pp. 514-521.
106. Zirakian T. (2008). Elastic distortional buckling of doubly symmetric I-shaped flexural members with slender webs. Thin-walled structures. 2008. Vol. 46. Issue 5. Pp. 466-475.
107. Chu X. T., Ye Z. M., Kettle R., Li L. Y. (2005). Buckling behaviour of cold-formed channel sections under uniformly distributed loads. Thin-walled structures. 2005. Vol. 43. Issue 4. Pp. 531-542.
108. Li L. Y., Chen J. K. (2008). An analytical model for analysing distortional buckling of cold-formed steel sections. Thin-walled structures. 2008. Vol. 46. Issue 12. Pp. 1430-1436.
109. Chu X. T., Kettle R., Li L. Y. (2004). Lateral-torsion buckling analysis of partial-laterally restrained thin-walled channel-section beams. Journal of Constructional Steel Research. 2004. Vol. 60. Issue 8. Pp. 1159-1175.
110. Gonçalves R., Dinis P. B., Camotim D. (2009). GBT formulation to analyze the first-order and buckling behaviour of thin-walled members with arbitrary cross-sections. Thin-walled structures. 2009. Vol. 47. Issue 5. Pp. 583-600.
111. Ungureanu V., Kotelko M., Mania R. J. et. al. (2010). Plastic mechanisms database for thin-walled cold-formed steel members in compression and bending. Thin-walled structures. 2010. Vol. 48. Issue 10. Pp. 818-826.
112. Aydin M. R. (2010). Elastic flexural and lateral torsional buckling analysis of frames using finite elements. KSCE Journal of Civil Engineering. 2010. Vol. 14. Issue 1. Pp. 25-31.
113. Vieira Jr L. C. M., Malite M., Schafer B. W. (2010). Simplified models for cross-section stress demands on C-section purlins in uplift. Thin-walled structures. 2010. Vol. 48. Issue 1. Pp. 33-41.
114. Moen C. D., Schafer B. W. (2009). Elastic buckling of cold-formed steel columns and beams with holes. Engineering Structures. 2009. Vol. 31. Issue 12. Pp. 2812-2824.
115. Ren W. X., Fang S. E., Young B. (2006). Analysis and design of cold-formed steel channels subjected to combined bending and web crippling. Thin-walled structures. 2006. Vol. 44. Issue 3. Pp. 314-320.
116. Samanta A., Kumar A. (2006). Distortional buckling in monosymmetric I-beams. Thin-walled structures. 2006. Vol. 44. Issue 1. Pp. 51-56.
117. Rogers C. A., Schuster R. M. (1997). Flange/web distortional buckling of cold-formed steel sections in bending. Thin-walled structures. 1997. Vol. 27. Issue 1. Pp. 13-29.
118. Trahair N. S., Hancock G. J. (2004). Steel member strength by inelastic lateral buckling. Journal of structural Engineering. 2004. Vol. 130. Issue 1. Pp. 64-69.
119. Ádány S., Schafer B. W. (2006). Buckling mode decomposition of single-branched open cross-section members via finite strip method: derivation. Thin-walled structures. 2006. Vol. 44. Issue 5. Pp. 563-584.
120. Ádány S., Schafer B. W. (2006). Buckling mode decomposition of single-branched open cross-section members via finite strip method: application and examples. Thin-walled structures. 2006. Vol. 44. Issue 5. Pp. 585-600.
121. Paczos P., Wasilewicz P. (2009). Experimental investigations of buckling of lipped, cold-formed thin-walled beams with I-section. Thin-Walled Structures. 2009. Vol. 47. Issue 11. Pp. 1354-1362.
122. Magnucki K., Paczos P., Kasprzak J. (2010). Elastic buckling of cold-formed thin-walled channel beams with drop flanges. Journal of structural engineering. 2010. Vol. 136. Issue 7. Pp. 886-896.
123. Basaglia C., Camotim D., Gonçalves R. et. al. (2013). GBT-based assessment of the buckling behaviour of cold-formed steel purlins restrained by sheeting. Thin-walled structures. 2013. Issue 72. Pp. 217-229.
124. Li L. Y. (2004). Lateral-torsional buckling of cold-formed zed-purlins partial-laterally restrained by metal sheeting. Thin-walled structures. 2004. Vol. 42. Issue 7. Pp. 995-1011.
125. Luo H. G., Guo Y. J., Ma S. C. (2011). Distortional buckling of thin-walled inclined lipped channel beams bending about the minor axis. Journal of Constructional Steel Research. 2011. Vol. 67. Issue 12. Pp. 1884-1889.
126. Davies J. M. (2000). Recent research advances in cold-formed steel structures. Journal of Constructional Steel Research. 2000. Vol. 55. Issue 1. Pp. 267-288.
127. Поиск рациональной геометрической схемы пространственной металлической конструкции покрытия большепролетного спортивного сооружения / Гарифуллин М. Р., Семенов С. А., Беляева С. В.,

- Порываев И. А., Сафиуллин М. Н., Семенов А. А. // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. №2 (17). С. 107-124.
128. Туснин А. Р., Туснина О. А. Вычислительная система «Сталькон» для расчета и проектирования стержневых конструкций из тонкостенных стержней открытого профиля // Промышленное и гражданское строительство. 2012. № 8. С. 62-64
129. Туснин А. Р., Прокич М. Прочность двутавровых профилей при стесненном кручении с учетом развития пластических деформаций // Вестник МГСУ. 2014. № 1. С. 75-82.
130. Ватин Н.И., Синельников А.С. Большепролетные надземные пешеходные переходы из легкого холодногнутого стального профиля // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2012. №1. С.47-52.
131. Реконструкция крыш Санкт-Петербурга на основе легких стальных тонкостенных конструкций и антиобледенительной системы / Ватин Н. И., Володин В. В., Золотарева Е. А., Петров К. В., Жмарин Е.Н. // Инженерно-строительный журнал. 2010. №2(12). С. 59-64.
132. Ватин Н. И., Синельников А. С. Холодногнутый стальной профиль в малых мостовых конструкциях // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2012. №3. С. 39-51.
133. Кузьменко Д.В., Ватин Н.И. Ограждающая конструкция «нулевой толщины» -термопанель //Инженерно-строительный журнал. 2008. №1. С. 13-21.
134. Местная потеря устойчивости стальных холодногнутых профилей в условиях поперечного изгиба / Трубина Д.А., Кононова Л.А., Кауров А.А., Пичугин Е.Д., Абдулаев Д.А. // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. №4 (19). С. 109-127.

Buckling analysis of thin-walled cold-formed beams — short review

M.R. Garifullin¹, N.I. Vatin²

Saint-Petersburg Polytechnical University, 29 Polytechnicheskaya st., St.Petersburg, 195251, Russia

ARTICLE INFO

Analytical review

Article history

Received 12 April 2014
Accepted 12 June 2014

Keywords

bending,
local buckling,
distortional buckling,
global buckling,
interaction.

ABSTRACT



This article provides a review of recent publications relating to buckling analysis of cold-formed profile in bending. Nowadays thin-walled structures offer a promising direction of development of civil engineering in Russia and worldwide and can be used in the construction of a number of structures for various purposes. The rapid pace of the scientific and technological progress, as well as the emerging trends towards rationalization of design and installation works, assign thin-walled structures one of the major roles in modern civil and industrial engineering. The review includes both theoretical works based on the rod and shell modeling of structures and experimental research results.

Attention is paid to the publications containing a comprehensive analysis of the problem and including a comparison of analytical and experimental results.

¹ Corresponding author:

+7 (937) 302 5055; 273marcel@gmail.com (Marsel Rinatovich Garifullin, Post-graduate Student)

² +7 (921) 964 3762, vatin@mail.ru (Nikolay Ivanovich Vatin, D. Sc., Professor, Director of Civil Engineering Institute)

References

1. Sinelnikov A.S., Orlova A.V. (2013). Strength of the expanded stretching profile: tests and mathematical modeling. *Vestnik MGSU*. 2013. Issue 12. Pp. 41-54. (rus)
2. Shatov D.S. (2011). Finite element modelling of open section perforated thin-walled studs made from thin-walled steel profiles. *Magazine of Civil Engineering*. 2011. Issue 3. Pp. 32-35. (rus)
3. Smaznov D.N. (2009). *Ustoychivost pri szhatii sostavnykh kolonn, vypolnennykh iz profiley iz vysokoprochnoy stali* [Compressive resistance of composite columns made of high strength steel profiles]. *Magazine of Civil Engineering*. 2009. Vol. 5. Issue 3. Pp. 42-49. (rus)
4. Smaznov D.N. (2009) *Modelirovaniye raboty tonkostennykh stalnykh profiley v «SKAD»*. [Modeling of thin-walled steel profiles in the SKAD soft]. *Nauka i innovatsii v tekhnicheskikh universitetakh: materialy Tretyego Vseros. foruma studentov, aspirantov i molodykh uchenykh*. SPb. : Izd-vo Politekhn. un-ta, 2009. Pp. 33-34. (rus)
5. Smaznov D.N. (2011). MFE modelling of behave of stiffeners for thin walled steel profiles. *Scientific Journal of KubSAU*. 2011. Vol. 63. Issue 3. Pp. 54-67. (rus)
6. Tusnin A.R. (2009). *Chislenny raschet konstruksiy iz tonkostennykh sterzhney otkrytogo profilya* [Numerical calculation of thin-walled structures of public profile] *M.: MGSU: Izd-vo ASV*, 2009. 143 p. (rus)
7. Yurchenko V.V. (2010). Designing of steel frameworks from thin-walled cold-formed profiles in SCAD Office. *Magazine of Civil Engineering*. 2010. Vol.18 Issue 8. Pp. 38–46. (rus)
8. Gordeeva A. O., Vatin N. I. (2011). Finite element calculation model of thin-walled cold-formed profile in software package SCAD Office. *Magazine of Civil Engineering*. 2011. Issue 3. Pp. 36-46. (rus)
9. Vatin N.I., Popova Ye.N. (2006). *Termoprofil v legkikh stalnykh stroitelnykh konstruksiyakh* [Thermoprofile in light steel building structures] *SPb.: Izd-vo SPbGPU*, 2006. 63 p. (rus)
10. Perelmuter A.V., Slivker V.I. (2002) *Raschetnyye modeli sooruzheniy i vozmozhnost ikh analiza* [Computational models of structures and the possibility of their analysis] *M. : Izd-vo DMK Press*. 2002. 618 p. (rus)
11. Kolesov A. I., Lapshin A. A., Valov A. V (2007). The present day methods of the structural analysis of steel shell constructions. *Privolzhsky Scientific Journal*. 2007. Issue 1. Pp. 28-33. (rus)
12. Kretinin A. N., Krylov I. I. (2008). Behaviour Features of a Thin-Walled Beam Made of Formed Galvanized Sections. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitelstvo*. 2008. Issue 6. Pp. 1-11. (rus)
13. Belyy G.I., Astakhov I.V. (2006). *Prostranstvennaya ustoychivost elementov konstruksiy iz stalnykh kholodnognutnykh profiley*. [Spatial stability of structural elements of steel cold-formed profiles]. *Montazhnyye i spetsialnyye raboty v stroitelstve*. 2006. Issue 9. Pp. 21-25. (rus)
14. Astakhov I.V. (2004). *Osobennosti rascheta na prochnost i ustoychivost sterzhnevnykh elementov iz gnutykh profiley*. [Features based on the strength and stability of the core elements bent profiles]. *Doklady 61-oy nauchnoy konferentsii professorov, prepodavateley, nauchnykh rabotnikov, inzhenerov i aspirantov universiteta*. SPb.: Izd-vo SPbGASU, 2004. (rus)
15. Astakhov I.V. (2006). *Prostranstvennaya ustoychivost elementov konstruksiy iz kholodnognutnykh profiley* [Spatial stability of structural elements of cold-formed profiles.]. *Diss. na soisk. uchen. step. k.t.n.: Spets. 05.23.01. S-Pb.*, 2006. 123 p. (rus)
16. Vatin N.I., Rybakov V.A. (2007). *Raschet metallokonstruksiy: sedmaya stepen svobody*. [Calculation of metal: the seventh degree of freedom]. *StroyPROFIL*. 2007. Vol. 56. Issue 2. Pp. 60-63. (rus)
17. Belyy G.I. (1984). *K deformatsionnomu raschetu tonkostennykh sterzhney nesimmetrichnogo secheniya*. [Calculating of deformation of thin-walled cross-section]. *Metallicheskiye konstruksii i ispytaniya sooruzheniy*. L. : LISI, 1984. Pp. 26-30. (rus)
18. Belyy G.I. (1974). *Vliyaniye ekstsentrchnogo opiraniya kontsov i urovnya prilozheniya nagruzki na ustoychivost ploskoy formy izgiba tonkostennogo krivolinyenogo sterzhnya*. [Influence of eccentric bearing and all application-level load on the stability of plane bending of thin-walled curved bar]. *Sbornik trudov LISI*. L. : LISI, 1974. Pp. 18-25. (rus)
19. Belyy G.I. (1983). *Raschet uprugoplasticheskikh tonkostennykh sterzhney po prostranstvenno-deformiruyemoy scheme*. [Calculation of elastic-plastic thin-walled space on deformable scheme]. *Stroitel'naya mekhanika: Mezhdvuz. temat. sb. tr.* L. : LISI, 1983. Pp. 40-48. (rus)
20. Belyy A.G. (2000). *Deformatsionnyy raschet i ustoychivost tonkostennykh prizmaticheskikh sterzhney proizvol'nogo profilya szhatykh s dvukhosnym ekstsentrisitetom*. [Deformation calculation and stability of thin-

- walled prismatic bars of arbitrary profile compressed biaxial eccentricity]. *Diss. na soisk. uchen. step. k.t.n.: Spets.* 05.23.17. S-Pb., 2000. 114 p. (rus)
21. Teplykh A. V. (2011). Application of shell and solid elements in the analysis of building steel designs with software SCAD and Nastran accounting for geometrical and physical nonlinearity. *Magazine of Civil Engineering*. 2011. Issue 3. Pp. 4-20. (rus)
 22. Kikot A.A. (2011). *Vliyaniye shiriny poyasov i otgibov v secheniyakh C- i Z-obraznykh stalnykh tonkostennykh kholodnognutykh profilye na effektivnost raboty v usloviyakh izgiba*. [Effect of the width of belts and limb in sections C-and Z-shaped steel thin-walled cold-formed profiles on the performance in terms of bending] *Polzunovskiy vestnik*. 2011. № 1. Pp. 70-75. (rus)
 23. Kikot A.A., Murzin Ye.V. (2011). *Opredeleniye progibov izgibayemykh elementov iz stalnykh tonkostennykh kholodnognutykh profilye* [The deflections are bent elements of cold-formed thin-walled steel profiles]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitelstvo*. 2011. Issue 2. Pp. 99-108. (rus)
 24. Vetyukov Yu.M., Yeliseyev V.V. (2007). *Uprugiye deformatsii i ustoychivost ravnovesiya tonkostennykh sterzhney otkrytogo profilya* [Elastic deformation and stability of equilibrium of thin-walled open section]. *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*. 2007. Issue 52-1. Pp. 49-53. (rus)
 25. Rybakov V.A., Gamayunova O.S. (2008). *Vliyaniye perforatsii stenki na nesushchuyu sposobnost termoprofiley*. [Influence of wall perforation on the bearing capacity thermo] *StroyPROFIL*. 2008. Issue 1. Pp. 128. (rus)
 26. Lalin V.V., Rybakov V.A. (2011). The finite elements for design of building walling made of thin-walled beams. *Magazine of Civil Engineering*. 2011. Vol. 26. Issue 8. Pp. 69-80. (rus)
 27. Lalin V.V., Rybakov V.A., Morozov S.A. (2012). The finite elements research for calculation of thin-walled bar systems. *Magazine of Civil Engineering*. 2012. Vol. 27. Issue 1. Pp. 53-73. (rus)
 28. Nedviga P.N., Rybakov V.A. (2009). Estimation of load carrying capacity of the steel thin-walled dinking punched beams and beams with a continuous wall by empirical methods. *Magazine of Civil Engineering*. 2009. Vol.10. Issue 8. Pp. 27-30. (rus)
 29. Nazmeeva T.V. (2013). Bearing capacity of compressed continuous and perforated thin-walled steel members of C-shaped cold-formed profiles. *Magazine of Civil Engineering*. 2013. Vol. 40. Issue 5. Pp. 44–51. (rus)
 30. Ievzerov I.D. (2014). The stability problems for bars and plates. *Magazine of Civil Engineering*. 2014. Vol. 45. Issue 1. Pp. 6–11. (rus)
 31. Al Ali M., Tomko M., Badak M. (2013). Analysis of the resistance of thin-walled cold-formed compressed steel members with closed cross-sections. Part 1. *Magazine of Civil Engineering*. 2013. Vol. 40 Issue 5. Pp. 38–43.
 32. Al Ali M., Tomko M. (2014). The resistance calculation of the thin-walled cold-formed compressed steel members with closed cross-sections. Part 2 . *Magazine of Civil Engineering*. 2014. Vol. 45. Issue 1. Pp. 53–58. (rus)
 33. Ayrumyan E.L. (2004). *Rekomendatsii po proyektirovaniyu, izgotovleniyu i montazhu konstruktivnykh karkasa maloetazhnykh zdaniy i mansard iz kholodnognutykh stalnykh otsinkovannykh profilye proizvodstva OOO «Baltprofil»* [Recommendations for the design, fabrication and installation of the frame structures of low-rise buildings and attics of cold-formed galvanized steel profiles produced by "Baltprofil"] / *TsNIIPSK im. Melnikova.M.*, 2004.64 p. (rus)
 34. Marchenko T.V., Bannikov D.O. (2009). Comparative analysis of collapse forms of thin-walled bar elements. *Steel structures*. 2009. Vol. 15. Issue 3. Pp. 178-188. (rus)
 35. Leshenko A.P., Evtushenko S.I., Tekutov E.G. (2009) Experimental basis of the analogy method in performing calculations of the thin-walled rods strength. *Internet-Vestnik VolgGASU*. 2009. Vol. 35. Issue 16. Pp. 24-27. (rus)
 36. Yurchenko V. (2012). Development of analytical dependences for evaluation of elastic critical loads for local and distortional buckling of thin-walled bars with open profiles. *Metal Constructions Journal*. 2012. Vol. 18. Issue 3. Pp. 185-196 (ukr)
 37. Volkova V., Makarova G. (2012). The numerical simulation of thin-walled girder deflected mode. *Steel structures*. 2012. Vol. 17. Issue 4. Pp. 261-269. (rus)
 38. Bilyk S.I. (2008). Methods of controlling spatial stability of steel columns with a variable web height from a bending moment cross for section. *Metal Constructions Journal*. 2008. Vol. 14 Issue 4. Pp. 279-284. (rus)
 39. Byelov I., Yurchenko V. (2010). Resistance check of central struts composed of isolated thin-webbed cold roll-formed shapes with open cross section. *Metal Constructions Journal*. 2010. Vol. 16. Issue 4. Pp. 239-250. (rus)
 40. Sinelshchikov A. V., Juzikov V. P. (2007). Mathematical model of a thin-walled rod-type finite element with a straight axis and variable cross-section. *Industrial and civil engineering*. 2007. Issue 9. Pp. 19-21. (rus)

41. Yuzikov V.P., Zavyalova O.B. (2011). *Raschet tonkostennykh sterzhney otкрытого profilya s uchetom sdviga sredinnoy poverkhnosti*. [Calculation of thin-walled open section, taking into account the shift of the middle surface] *Izvestiya vuzov. Stroitelstvo*. 2011. Issue 1. Pp. 108-115. (rus)
42. SP 16.13330.2011 *Stalnyye konstruksii. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP II-23-81*. [SP 16.13330.2011 Steel structures. Updated edition SNiP II-23-81]. (rus)
43. *Rukovodstvo po proyektirovaniyu stalnykh tonkostennykh balok*. [Design Manual steel thin-walled beams.]. M.: Gosstroy SSSR, Glavpromstroyproyekt, Soyuzmetallostroyeniiprojekt, TsNIIProyektstalkonstruksiya. 1977. 28 p. (rus)
44. Zverev V.V., Mescheryakova Ye.V. (2007). Investigation of stability of thin-walled asymmetric Usection as part of element-wise assembling coating. *Internet-Vestnik VolgGASU*. 2007. Issue 7. Pp. 55-58. (rus)
45. Tusnin A.R. (2012). Use thin-walled finite element in calculating chase an open profile. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Povolzhya*. 2012. Issue 6. Pp. 405-408. (rus)
46. Tusnin A.R. (2009) Finite element for numeric computation of structures of thin-walled open profile bars. *Metal Constructions Journal*. 2009. Vol. 15. Pp. 73-78. (rus)
47. Maksak V. I., Maksak T. V. (2012). Calculation of a thin-walled beam as an open profile bracket. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2012. Issue 2. Pp. 91-100.
48. Olkov Y. I., Poltoradnev A.S. (2011). Thin-Walled I-Beam Finite Element Research Possibility and Urgency Academia. *Architecture and Construction*. 2011. Issue 2. Pp. 95-99. (rus)
49. Potapov A.V. (2009). Stability of steel rods of open section taking into account the real work of material. *News of the KSUAE*. 2009. Vol. 11. Issue 1. Pp. 112-115. (rus)
50. Kuznetsov I.L., Bogdanovich A.U. (2003) *Ustoychivost tonkostennogo sterzhnya peremennogo secheniya pri prodolnom szhatii i uchet nelineynykh deformatsiy*. [Stability of thin-walled rod of variable cross-section of the longitudinal compression and inclusion of nonlinear deformation] *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitelstvo*. 2003. Issue 2. Pp. 123-128.
51. Bogdanovich A.U., Kuznetsov I.L. (2003) *Ustoychivost tonkostennogo sterzhnya nepreryvno-peremennogo secheniya pri prodolnom szhatii s uchetom normativnykh eksstentsititetov*. [Stability of thin-walled bar continuously-variable section in longitudinal compression subject to regulatory eccentricities] *Izvestiya vuzov. Stroitelstvo*, 2003. Issue 9. Pp. 11-18.
52. Bogdanovich A.U., Abdyushev A.A. (2006). *Ustoychivost sterzhnya peremennogo ellipticheskogo secheniya pri prodolnom szhatii*. [Rod of variable resistance elliptical cross section in longitudinal compression] *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2006. Vol. 6. Issue 2. Pp. 38-41.
53. Rybakov V.A., Gamayunova O.S. (2013). The stress-strain state of frame constructions' elements from thin-walled cores. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2013. Vol. 12 Issue 7. Pp. 79-123. (rus)
54. Ilyashenko A.V., Yefimov I.B. (1983). *Eksperimentalnoye issledovaniye tonkostennykh sterzhney s iskrivlennymi plastinchatymi elementami. Organizatsiya i proizvodstvo stroitelnykh rabot*. [Experimental study of thin-walled plate with curved elements] M.: Tsentr. Byuro n.-t.informatsii Minpromstroya, 1983. Pp. 3-38. (rus)
55. Ilyashenko A.V., Yefimov I.B. (1981). *Napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye posle mestnoy poteri ustoychivosti szhatykh tonkostennykh sterzhney s uchetom nachalnoy pogibi*. [Stress-strain state after local buckling of compressed thin-walled considering initial deflection]. *Stroitelnyye konstruksii i materialy. Zashchita ot korrozii. Ufa: Trudy NIIpromstroya*, 1981. Pp. 110-119. (rus)
56. Ilyashenko A.V. (2008). About eccentric compression of thin-walled bars composed of initially curved finned elements. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2008. Vol. 4. Issue 1. Pp. 71-74. (rus)
57. Chernov S.A. (2013). Calculation of stability of a thin-walled beam structure. *Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences*. 2013. Vol. 21. Issue 2. Pp. 162-170. (rus)
58. Vorontsov G.V. (2007). Calculation Geometrically and Physically non-linear Deformable Thin-Walled Cores on Durability, Stability and Fluctuations. *Izvestiya Vuzov. Severo-Kavkazskii Region*. 2007. Issue 5. Pp. 29-35. (rus)
59. Vorontsov G.V., Kabelkov A.N. (2007). Calculation Methods of Geometrically Nonlinear Deformable Thin-Walled Shanks. *Izvestiya Vuzov. Severo-Kavkazskii Region*. 2007. Issue 6. Pp. 49-52. (rus)
60. Vorontsov G.V., Petrov I.A., Alekseyev P.A. (2008). *Matritsy zhestkosti prostranstvenno zagruzhennykh nelineyno deformiruyemykh sterzhney. Chast 2*. [Stiffness matrix spatially loaded nonlinear deformable rods. Part 2] *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Seriya: Tekhnicheskiye nauki*. 2008. Issue 4. Pp. 68-72. (rus)

61. Suryaninov N.G. (2010). *Obobshcheniye metoda granichnykh elementov k raschetu sterzhney, plastin i obolochek*. [Generalization of the boundary element method to the calculation of rods, plates and shells.] *Diss. na soisk. uchen. step. d.t.n.: Spets. 01.02.04. Lutsk, 2010. 409 p.* (rus)
62. Kamenskikh I.V. (2004). *Matematicheskoye i chislennoye modelirovaniye zadach ustoychivosti tonkostennykh konstruktsiy metodom modul-elementov*. [Mathematical and numerical modeling of problems of stability of thin-walled structures using modular elements] *Diss. na soisk. uchen. step. k.f.m.n.: Spets. 05.13.18. Komsomolsk-na-Amure, 2004. 210 p.* (rus)
63. Rybakov V.A. (2012). *Primeneniye polusdvigovoy teorii V.I. Slivkera dlya analiza napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya sistem tonkostennykh sterzhney* [Application of half-moving theory VI Slivkera for analysis of stress-strain state of thin-walled systems] *Diss. na soisk. uchen. step. k.t.n.: Spets. 01.02.04. S-Pb., 2012. 184 p.* (rus)
64. Khayrullin F.Pp. *Variatsionnyye metody rascheta tonkostennykh konstruktsiy slozhnoy formy na osnove approksimiruyushchikh funktsiy proizvol'nogo poryadka s konechnymi*. [Variational methods for calculating thin-walled structures of complex shape on the basis of approximating functions of arbitrary order with finite supports] (rus)
65. Zhmarin E.N. (2012). International association of light-gauge steel construction. *Construction of Unique Buildings and Structures. 2012. Issue 2. Pp. 27-30.* (rus)
66. Kholkin Ye.G. (2010). *Issledovaniye mestnoy ustoychivosti tonkostennykh trapetsiyevidnykh profiley pri prodolno-poperechnom izgibe* [Study local stability of thin-walled trapezoidal profiles with longitudinal and transverse bending] *Diss. na soisk. uchen. step. k.t.n.: Spets. 01.02.06. Omsk, 2010. 120 p.* (rus)
67. Kholkin E.G., Sokolovskiy Z.N. (2010). Design of trapezoid thin-walled profiles taking into account local loss of stability. *Omskiy nauchnyy vestnik. 2010. Issues 3-93. Pp. 50-53.* (rus)
68. Sokolovsky Z. N., Holkin E. G. (2013). Determination of bearing ability of thin-walled designs taking into account local loss of stability. *SibADI Journal. 2013. Vol. 31. Issue 3. Pp. 93-96.* (rus)
69. Yu C., Yan W. (2011). Effective Width Method for determining distortional buckling strength of cold-formed steel flexural C and Z sections. *Thin-walled structures. 2011. Vol. 49. Issue 2. Pp. 233-238.*
70. Schardt R. (1994). Generalized beam theory—an adequate method for coupled stability problems. *Thin-Walled Structures. 1994. Vol. 19. Issue 2. Pp. 161-180.*
71. Davies J. M., Leach P., Heinz D. (1994). Second-order generalized beam theory. *Journal of Constructional Steel Research. 1994. Vol. 31. Issue 2. Pp. 221-241.*
72. Silvestre N., Camotim D. (2002). Second-order generalised beam theory for arbitrary orthotropic materials. *Thin-walled structures. 2002. Vol. 40. Issue 9. Pp. 791-820.*
73. Silvestre N., Camotim D. (2004). Distortional buckling formulae for cold-formed steel C and Z-section members: Part I—derivation. *Thin-Walled Structures. Vol. 42. Issue 11. Pp. 1567-1597.*
74. Silvestre N., Camotim D. (2004). Distortional buckling formulae for cold-formed steel C-and Z-section members: Part II—Validation and application. *Thin-Walled Structures. Vol. 42. Issue 11. Pp. 1599-1629.*
75. Abambres M., Camotim D., Silvestre N. et. al. (2014). GBT-based structural analysis of elastic-plastic thin-walled members. *Computers Structures. 2014. Issue 136. Pp. 1-23.*
76. Basaglia C., Camotim D., Gonçalves R. et. al. (2013). GBT-based assessment of the buckling behaviour of cold-formed steel purlins restrained by sheeting. *Thin-walled structures. 2013. Issue 72. Pp. 217-229.*
77. Bebiano R., Silvestre N., Camotim D. (2008) GBTUL — a code for the buckling analysis of cold-formed steel members. In Nineteenth international specialty conference on cold-formed steel structures. St. Louis. Missouri U.S.A., October 14-15. 2008.
78. Tashakori A., Adeli H. (2002). Optimum design of cold-formed steel space structures using neural dynamics model. *Journal of Constructional Steel Research. 2002. Vol. 58. Issue 12. Pp. 1545-1566.*
79. El-Kassas E. M. A., Mackie R. I., El-Sheikh A. I. Using neural networks in cold-formed steel design. *Computers Structures. 2001. Vol. 79. Issue 18. Pp. 1687-1696.*
80. Pala M., Caglar N. (2007). A parametric study for distortional buckling stress on cold-formed steel using a neural network. *Journal of Constructional Steel Research. 2007. Vol. 63. Issue 5. Pp. 686-691.*
81. Pala M. (2006). A new formulation for distortional buckling stress in cold-formed steel members. *Journal of Constructional Steel Research. 2006. Vol. 62. Issue 7. Pp. 716-722.*
82. Pala M. (2008). Genetic programming-based formulation for distortional buckling stress of cold-formed steel members. *Journal of Constructional Steel Research. 2008. Vol. 64. Issue 12. Pp. 1495-1504.*

83. Yu C., Schafer B. W. (2003) Local buckling tests on cold-formed steel beams. *Journal of Structural Engineering*. 2003. Vol. 129. Issue 12. Pp. 1596-1606.
84. Yu C., Schafer B. W. (2006). Distortional buckling tests on cold-formed steel beams. *Journal of structural engineering*. 2006. Vol. 132. Issue 4. Pp. 515-528.
85. Yu C., Schafer B. W. (2007). Simulation of cold-formed steel beams in local and distortional buckling with applications to the direct strength method. *Journal of Constructional Steel Research*. 2007. Vol. 63. Issue 5. Pp. 581-590.
86. Yu C. (2012). Cold-formed steel flexural member with edge stiffened holes: Behavior, optimization, and design. *Journal of Constructional Steel Research*. 2012. Issue 71. Pp. 210-218.
87. Zhao Y., Yan W. M., Yu C. (2012). Simplified Method for Elastic Distortional Buckling Stress of Cold-Formed Thin-Wall Steel Members. *Applied Mechanics and Materials*. 2012. No. 166. Pp. 3391-3398.
88. Gardner L., Nethercot D. A. (2004). Numerical modeling of stainless steel structural components-A consistent approach. *Journal of structural Engineering*. 2004. Vol. 130. Issue 10. Pp. 1586-1601.
89. Niu S., Rasmussen K. J. Fan F. (2014). Distortional-global interaction buckling of stainless steel C-beams: Part I—Experimental investigation. *Journal of Constructional Steel Research*. 2014. Issue 96. Pp. 127-139.
90. Niu S., Rasmussen K. J., Fan F. (2014). Distortional–global interaction buckling of stainless steel C-beams: Part II—Numerical study and design. *Journal of Constructional Steel Research*. 2014. Issue 96. Pp. 40-53.
91. Haidarali M. R., Nethercot D. A. (2011). Finite element modelling of cold-formed steel beams under local buckling or combined local/distortional buckling. *Thin-Walled Structures*. 2011. Vol. 49. Issue 12. Pp. 1554-1562.
92. Haidarali M. R., Nethercot D. A. (2012). Local and distortional buckling of cold-formed steel beams with edge-stiffened flanges. *Journal of Constructional Steel Research*. 2012. Issue 73. Pp. 31-42.
93. Haidarali M. R., Nethercot D. A. (2012). Local and distortional buckling of cold-formed steel beams with both edge and intermediate stiffeners in their compression flanges. *Thin-Walled Structures*. 2012. Issue 54. Pp. 106-112.
94. Schafer B. W. (2008). Review: The Direct Strength Method of cold-formed steel member design. *Journal of Constructional Steel Research*. 2008. Vol. 67. Issue 7. Pp. 766-778.
95. Schafer B. W., Ádány S. (2006). Buckling analysis of cold-formed steel members using CUFSM: conventional and constrained finite strip methods. 18th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures. 2006. Orlando. Florida. 16 p.
96. Schafer B. W., Peköz T. (1998). Computational modeling of cold-formed steel: characterizing geometric imperfections and residual stresses. *Journal of Constructional Steel Research*. 1998. Vol. 47. Issue 3. Pp. 193-210.
97. Schafer B.W., Pekoz T. (1998). Direct strength prediction of cold-formed steel members using numerical elastic buckling solutions. Fourteenth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures. St. Louis. Missouri U.S.A., October 15-16. 1998.
98. Eccher G., Rasmussen K. J. R., Zandonini R. (2008). Linear elastic isoparametric spline finite strip analysis of perforated thin-walled structures. *Thin-Walled Structures*. 2008. Vol. 46. Issue 3. Pp. 242-260.
99. Eccher G., Rasmussen K. J. R., Zandonini R. (2009). Geometric nonlinear isoparametric spline finite strip analysis of perforated thin-walled structures. *Thin-walled structures*. 2009. Vol. 47. Issue 2. Pp. 219-232.
100. Yao Z., Rasmussen K. J. (2011). Material and geometric nonlinear isoparametric spline finite strip analysis of perforated thin-walled steel structures—Analytical developments. *Thin-walled structures*. 2011. No. 49(11). Pp. 1359-1373.
101. Yao Z., Rasmussen K. J. (2011). Material and geometric nonlinear isoparametric spline finite strip analysis of perforated thin-walled steel structures—Numerical investigations. *Thin-walled structures*. 2011. Vol. 49. Issue 11. Pp. 1374-1391.
102. De Miranda Batista E. (1989). E´tude de la stabilite´ des profils a` parois minces et section ouverte de types U et C. *Collection des publications de la Faculte´ des Sciences Applique´es*. Issue 119. University of Liege. 1989.
103. De Miranda Batista E. (1989). Effective section method: A general direct method for the design of steel cold-formed members under local-global buckling interaction. *Thin-Walled Structures*. 2010. Vol. 48. Issue 4. Pp. 345-356.
104. Pastor M. M., Roure F. (2008). Open cross-section beams under pure bending. I. Experimental investigations. *Thin-walled structures*. 2008. Vol. 46. Issue 5. Pp. 476-483.

105. Pastor M. M., Roure F. (2009). Open cross-section beams under pure bending II. Finite element simulation. Thin-walled structures. 2009. Vol. 47. Issue 5. Pp. 514-521.
106. Zirakian T. (2008). Elastic distortional buckling of doubly symmetric I-shaped flexural members with slender webs. Thin-walled structures. 2008. Vol. 46. Issue 5. Pp. 466-475.
107. Chu X. T., Ye Z. M., Kettle R., Li L. Y. (2005). Buckling behaviour of cold-formed channel sections under uniformly distributed loads. Thin-walled structures. 2005. Vol. 43. Issue 4. Pp. 531-542.
108. Li L. Y., Chen J. K. (2008). An analytical model for analysing distortional buckling of cold-formed steel sections. Thin-walled structures. 2008. Vol. 46. Issue 12. Pp. 1430-1436.
109. Chu X. T., Kettle R., Li L. Y. (2004). Lateral-torsion buckling analysis of partial-laterally restrained thin-walled channel-section beams. Journal of Constructional Steel Research. 2004. Vol. 60. Issue 8. Pp. 1159-1175.
110. Gonçalves R., Dinis P. B., Camotim D. (2009). GBT formulation to analyze the first-order and buckling behaviour of thin-walled members with arbitrary cross-sections. Thin-walled structures. 2009. Vol. 47. Issue 5. Pp. 583-600.
111. Ungureanu V., Koteřko M., Mania R. J. et. al. (2010). Plastic mechanisms database for thin-walled cold-formed steel members in compression and bending. Thin-walled structures. 2010. Vol. 48. Issue 10. Pp. 818-826.
112. Aydin M. R. (2010). Elastic flexural and lateral torsional buckling analysis of frames using finite elements. KSCE Journal of Civil Engineering. 2010. Vol. 14. Issue 1. Pp. 25-31.
113. Vieira Jr L. C. M., Malite M., Schafer B. W. (2010). Simplified models for cross-section stress demands on C-section purlins in uplift. Thin-walled structures. 2010. Vol. 48. Issue 1. Pp. 33-41.
114. Moen C. D., Schafer B. W. (2009). Elastic buckling of cold-formed steel columns and beams with holes. Engineering Structures. 2009. Vol. 31. Issue 12. Pp. 2812-2824.
115. Ren W. X., Fang S. E., Young B. (2006). Analysis and design of cold-formed steel channels subjected to combined bending and web crippling. Thin-walled structures. 2006. Vol. 44. Issue 3. Pp. 314-320.
116. Samanta A., Kumar A. (2006). Distortional buckling in monosymmetric I-beams. Thin-walled structures. 2006. Vol. 44. Issue 1. Pp. 51-56.
117. Rogers C. A., Schuster R. M. (1997). Flange/web distortional buckling of cold-formed steel sections in bending. Thin-walled structures. 1997. Vol. 27. Issue 1. Pp. 13-29.
118. Trahair N. S., Hancock G. J. (2004). Steel member strength by inelastic lateral buckling. Journal of structural Engineering. 2004. Vol. 130. Issue 1. Pp. 64-69.
119. Ádány S., Schafer B. W. (2006). Buckling mode decomposition of single-branched open cross-section members via finite strip method: derivation. Thin-walled structures. 2006. Vol. 44. Issue 5. Pp. 563-584.
120. Ádány S., Schafer B. W. (2006). Buckling mode decomposition of single-branched open cross-section members via finite strip method: application and examples. Thin-walled structures. 2006. Vol. 44. Issue 5. Pp. 585-600.
121. Paczos P., Wasilewicz P. (2009). Experimental investigations of buckling of lipped, cold-formed thin-walled beams with I-section. Thin-Walled Structures. 2009. Vol. 47. Issue 11. Pp. 1354-1362.
122. Magnucki K., Paczos P., Kasprzak J. (2010). Elastic buckling of cold-formed thin-walled channel beams with drop flanges. Journal of structural engineering. 2010. Vol. 136. Issue 7. Pp. 886-896.
123. Basaglia C., Camotim D., Gonçalves R. et. al. (2013). GBT-based assessment of the buckling behaviour of cold-formed steel purlins restrained by sheeting. Thin-walled structures. 2013. Issue 72. Pp. 217-229.
124. Li L. Y. (2004). Lateral-torsional buckling of cold-formed zed-purlins partial-laterally restrained by metal sheeting. Thin-walled structures. 2004. Vol. 42. Issue 7. Pp. 995-1011.
125. Luo H. G., Guo Y. J., Ma S. C. (2011). Distortional buckling of thin-walled inclined lipped channel beams bending about the minor axis. Journal of Constructional Steel Research. 2011. Vol. 67. Issue 12. Pp. 1884-1889.
126. Davies J. M. (2000). Recent research advances in cold-formed steel structures. Journal of Constructional Steel Research. 2000. Vol. 55. Issue 1. Pp. 267-288.
127. The search of rational shape of spatial metal roof of long-span sport arena. (2014) / Garifullin M.R., Semenov S.A., Belyaeva S.V., Porivaev I.A., Safiullin M.N., Semenov A.A. Construction of Unique buildings and Structures. 2014. Vol. 17. Issue 2. Pp. 107-124. (rus)
128. Tusnin A.R., Tusnins O.A. (2012). Computing System «STALKON» for Analysis and Design of Lattice Structures from Thin-Walled Rods of Open Profile. Industrial and Civil Engineering. 2012. Issue 8. Pp. 62-64. (rus)
129. Tusnin A.R., Prokic M. (2014). Resistance of i-beams in warping torsion with account for the development of plastic deformations // Vestnik MGSU. 2014. Issue 1. Pp. 75-82. (rus)

130. Vatin N.I., Sinelnikov A.S. (2012). Long span footway bridges: coldformed steel cross-section. Construction of Unique buildings and Structures. 2012. Issue 1. Pp. 47-52. (rus)
131. Reconstruction of St. Petersburg roofs based on light steel thin-walled structures and de-icing system / Vatin N.I., Volodin V.V., Zolotareva E.A., Petrov K.V., Zhmarin E.N. Magazine of Civil Engineering. 2010. Vol. 12 Issue 2. Pp. 59-64. (rus)
132. Vatin N.I., Sinelnikov A.S. (2012). Footway bridges: cold formed steel cross-section. Construction of Unique buildings and Structures. 2012. Issue 3. Pp. 39-51. (rus)
133. Kuzmenko D.V., Vatin N.I. (2008). *Ograzhdayushchaya konstruktsiya «nulevoy tolshchiny» -termopanel.* [Cladding "zero thickness"-thermo panel] Magazine of Civil Engineering. 2008. Issue 1. Pp. 13-21. (rus)
134. Local buckling of steel cold-formed profiles under transverse bending (2014). / Trubina D.A., Kononova L.A., Kaurov A.A., Pichugin Y.D., Abdulaev D.A. Construction of Unique buildings and Structures. 2014. Vol. 19. Issue 4. Pp. 109-127. (rus)