

На правах рукописи

A handwritten signature in dark ink, appearing to read 'А. Гарипов', is written over a horizontal line.

ГАРИПОВ Азат Ильшатович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ РАСЧЕТА СТЕРЖНЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
ЛЕГКИХ СТАЛЬНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

Специальность 2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»

Научный руководитель:

Белый Григорий Иванович,
доктор технических наук, профессор.

Официальные оппоненты:

Зверев Виталий Валентинович,
доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РААСН,
ФГБОУ ВО «Липецкий государственный
технический университет», кафедра
металлических конструкций, заведующий;

Назмеева Татьяна Вильсовна,
кандидат технических наук,
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский
Московский государственный строительный
университет», кафедра металлических и
деревянных конструкций, доцент.

Ведущая организация:

АО «НИЦ «Строительство».

Защита диссертации состоится «02» декабря 2026 года в 11.00 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций 24.2.380.01 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4, аудитория 220, тел./факс: (812) 316-58-73.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте <https://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/garipov-azat-ilshatovich>

Автореферат разослан «26» октября 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Попов Владимир Мирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Особенностью работы элементов легких стальных тонкостенных конструкций (ЛСТК) является потеря местной устойчивости и устойчивости формы сечения в упругой стадии, до наступления предельного состояния, что учитывается в расчетах использованием сниженных (редуцированных) геометрических характеристик поперечного сечения, основной метод определения которых базируется на исследованиях Т. Кармана и Д. Винтера. Предельным состоянием в элементах ЛСТК при расчете как прочности, так и устойчивости является достижение расчетного сопротивления по пределу текучести в наиболее нагруженной точке поперечного сечения. При разработке в России свода правил проектирования ЛСТК были заимствованы европейские методы расчета, которые оказались не гармонизированы с отечественным сводом правил проектирования стальных конструкций. Кроме того, теоретические основы нормативного метода проверки общей устойчивости элементов ЛСТК имеют существенные недостатки, а практическое их использование затруднено большим количеством промежуточных вычислений. Ошибки в расчетах уже не раз приводили к авариям и разрушениям ЛСТК. Учитывая изложенное, вопрос разработки достоверных, понятных отечественному инженеру и прозрачных в своих теоретических основах методов расчета стержневых элементов ЛСТК является наиболее актуальным.

Степень разработанности темы исследования.

Расчёт элементов стальных конструкций основан, как известно, на хорошо проработанных теории тонкостенных стержней В.З. Власова и деформационной теории расчёта упругих стержней, которая разработана В.З. Власовым, Л. Н. Воробьевым, Б. М. Броуде, В. Г. Воронцовым и обобщена Е. А. Бейлиным. Метод приближенного аналитического решения системы дифференциальных уравнений равновесия тонкостенных стержней открытого профиля по пространственно-деформированной схеме и метод численно-аналитического расчета стержней с учетом развития упругопластических деформаций разработаны Г. И. Белым. Эти методы применялись для решения различных задач устойчивости с учетом упругопластической стадии работы материала в исследованиях Н. Н. Родикова, С. Н. Пичугина, С. Н. Сергеева, П. А. Пяткина, В. В. Михаськина, А. В. Аскинази и других, а также для решения задач устойчивости элементов ЛСТК в работах И. В. Астахова, А. Ю. Кузнецова, М. О. Смирнова.

Вопросами устойчивости сжатых пластин и оболочек в разное время занимались Ф. Блейх, Б. М. Броуде, В. З. Власов, А. С. Вольмир, А. А. Ильюшин, С. П. Тимошенко и многие другие. Отдельно стоит отметить работы Т. Кармана и Д. Винтера, разработавших метод «эффективной ширины», который является основой практической методики расчета элементов

ЛСТК, а также исследования Б.М. Броуде и В. И. Моисеева, на основании которых последним разработана отечественная нормативная методика обеспечения местной устойчивости при упруго-пластической работе материала. Вопросами потери устойчивости формы сечения занимались С. П. Тимошенко, Д. Гир и другие. Вопросами взаимного влияния различных форм потери местной устойчивости и влияния потери местной устойчивости на общую устойчивость, а также вопросами остаточных напряжений и начальных несовершенств занимались Д. Винтер, Д. ДеВольф, Т. Пеккоз, Д. Родес, Г. Д. Хэнкок и многие другие. Эффективный метод «конечных полос» для определения критических напряжений и соответствующих форм потери устойчивости тонкостенных стержневых элементов был разработан и получил свое развитие в работах М. С. Чанг, Я. К. Чанг, Б. В. Шафера и других.

Исследованию вопросов расчета и проектирования ЛСТК в России посвящены работы Э. Л. Айрумяна, В. Ф. Беляева, И. И. Ведякова, В. В. Егорова, В. В. Зверева, И. И. Крылова, В. В. Катюшина, В. А. Рыбакова, А. Р. Туснина и других.

В настоящей диссертации получает развитие метод аналитического решения задач устойчивости Г. И. Белого. С использованием некоторых допущений разработан аналитический метод расчета коэффициентов общей устойчивости элементов ЛСТК.

Цель исследования – разработка методов расчета прочности и общей устойчивости стержневых элементов легких стальных тонкостенных конструкций, гармонизированных с отечественным сводом правил проектирования и учитывающих потерю местной устойчивости и устойчивости формы сечения путем редуцирования геометрических характеристик.

Задачи исследования:

1. Разработать быстродействующий численный метод расчета предельных напряженно-деформированных состояний в поперечном сечении элемента ЛСТК по заданному соотношению усилий.
2. Обобщить обратный численно-аналитический метод расчета общей устойчивости на элементы ЛСТК.
3. Выполнить экспериментальные исследования общей устойчивости элементов ЛСТК.
4. Провести верификацию разработанных методов расчета путем сопоставления полученных с их помощью результатов с результатами расчетов методом конечных элементов, а также результатами проведенных испытаний.
5. Разработать практические методы расчета прочности и устойчивости элементов ЛСТК при общем нагружении, гармонизированные с отечественным сводом правил.

Объект исследования – стержневой элемент легких стальных тонкостенных конструкций.

Предмет исследования – влияние потери местной устойчивости и устойчивости формы сечения на прочность и общую устойчивость.

Область исследования соответствует требованиям Паспорта научной специальности ВАК – 2.1.1. «Строительные конструкции, здания и сооружения», пункт 1 «Построение и развитие теории, разработка аналитических и вычислительных методов расчёта механической безопасности и огнестойкости, рационального проектирования и оптимизации конструкций и конструктивных систем зданий и сооружений».

Методология и методы исследования.

Методологическую основу исследования составляют общенаучные и специальные методы. Работа стержневых элементов ЛСТК исследуется методами аналитического и численного моделирования. Метод анализа используется для изучения частных вопросов: потери местной устойчивости и устойчивости формы сечения, прочности в поперечном сечении и общей устойчивости стержня. Метод синтеза используется для исследования общей устойчивости стержня с учетом потери местной устойчивости и устойчивости формы сечения. Для верификации разработанных методов расчета выполнены численные и экспериментальные исследования.

Теоретическую основу исследования составляет техническая теория тонкостенных стержней открытого профиля и деформационная теория расчета упругих стержней в сочетании с методом упругих решений для учета редукции сечения.

Научная гипотеза: полагается, что обратный численно-аналитический метод позволит учесть потерю местной устойчивости и устойчивости формы сечения путем редуцирования геометрических характеристик с учетом фактического распределения напряжений при решении задач прочности и общей устойчивости элементов ЛСТК.

Научная новизна исследования состоит в следующем:

1. Разработан обратный численный метод расчета прочности элементов легких стальных тонкостенных конструкций по заданным соотношениям усилий.

2. Доказано, что при использовании аппроксимации поверхности прочности наиболее нагруженного сечения задача общей устойчивости имеет аналитическое решение.

3. Установлено, что учет фактической редукции сечения при общем нагружении позволяет выявить резервы прочности и общей устойчивости.

Теоретическая значимость работы:

1. Получено обратное численно-аналитическое решение задачи общей устойчивости элементов легких стальных тонкостенных конструкций, учитывающее фактическую редукцию сечения.

2. Получено аналитическое решение задачи общей устойчивости элементов легких стальных тонкостенных конструкций.

Практическая значимость работы состоит в разработке гармонизированных с отечественным сводом правил проектирования стальных конструкций практических методов расчета прочности и общей устойчивости элементов легких стальных тонкостенных конструкций.

Положения, выносимые на защиту:

1. Численный метод расчёта предельных напряжённно-деформированных состояний в редуцированном поперечном сечении элемента ЛСТК по заданному соотношению усилий.

2. Адаптация обратного численно-аналитического метода расчёта общей устойчивости на элементы ЛСТК с учётом фактической редукции сечения.

3. Результаты экспериментальных исследований устойчивости элементов ЛСТК.

4. Практические методы расчета прочности и общей устойчивости элементов ЛСТК, гармонизированные с отечественным сводом правил.

Достоверность полученных результатов обеспечена:

- использованием технической и деформационной теории расчета тонкостенных стержней открытого профиля в сочетании с методом упругих решений для учета редукции сечения;
- использованием нормативного метода определения редуцированных геометрических характеристик поперечных сечений элементов ЛСТК при общем нагружении;
- верификацией разработанных методов расчета путем сравнения полученных результатов с результатами расчетов методом конечных элементов, а также результатами испытаний.

Личный вклад автора диссертации. Все научные результаты, представленные в настоящей диссертации, получены автором лично. В работах, опубликованных в соавторстве, автору в равной степени принадлежит постановка задач и формулировка основных положений, определяющих научную новизну исследований.

Апробация результатов исследования.

Основные выводы и результаты, представленные в настоящей диссертации, докладывались на конференциях:

- Круглый стол АРСС «Возможность применения стали в многоэтажном жилом строительстве и решения на стальном каркасе в ИЖС» в рамках 30 Международной промышленной выставки «Металл-Экспо». Москва, 31 октября 2024 г.;

- 78-я научно-практическая конференция «Архитектура. Строительство. Транспорт. Экономика». Санкт-Петербург, СПбГАСУ, 21 ноября 2024 г.;
- IX Международный симпозиум РААСН «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений». Пенза. 21–24 мая 2025 г.;
- Всероссийский научно-технический совет «Металлические и деревянные конструкции» и II международно-практическая конференция «Сталь. Дерево. Сейсмика». ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко. Кемерово, 28-30 мая 2025 г.;
- XI международный форум «100+ ИНТЕРКОНСТРОЙ» в рамках международного форума и выставки «100+ TechnoBuild». Екатеринбург-Экспо. Екатеринбург. 30 сентября – 3 октября 2025 г.;
- 79-ая международная научно-практическая конференция СПбГАСУ «Архитектура – Строительство – Транспорт – Экономика». Санкт-Петербург, СПбГАСУ, 21 ноября 2025 г.

Публикации. Научные результаты, представленные в настоящей диссертации, опубликованы в четырех печатных работах, две из которых – в соавторстве. Все работы опубликованы в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, утвержденный ВАК РФ.

Внедрение результатов работы подтверждается справкой.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Объем работы – 190 страниц машинописного текста, включая 8 таблиц, 62 рисунка, 151 формулу. Список литературы содержит 168 наименований, в том числе 59 – на иностранных языках.

Работа выполнена при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» (ФГБОУ ВО «СПбГАСУ»).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приведен обзор научной литературы по двум основным темам: особенности работы элементов ЛСТК и общая устойчивость элементов стальных конструкций.

На основании анализа теоретических и экспериментальных исследований Бамбах, Бийлаарда, Винтера, Дуайта, Кармана, Пекоза, Расмуссэна, Фишера, Харви, Чилвера, Шарпа и других сделан вывод достоверности полумэмпирического метода эффективных (редуцированных) геометрических характеристик, используемого повсеместно для учета потери местной устойчивости и устойчивости формы сечения в расчетах элементов ЛСТК на прочность и общую устойчивость. Проанализированы работы Лау, Фан,

Хэнкок, Чанг и Шафера, посвященные разработке метода конечных полос, а также работы Шафера, посвященные альтернативному «прямому методу расчета прочности» ЛСТК. Отмечено, что российские нормы проектирования ЛСТК заимствовали, кроме прочего, методы расчета общей устойчивости европейских норм, которые не гармонизированы с отечественным сводом правил проектирования стальных конструкций.

Проанализированы исследования общей устойчивости элементов стальных конструкций Е. А. Бейлина, Г. И. Белого, Г. Е. Бельского, Б. М. Броуде, В. З. Власова, Л. Н. Воробьева, С. П. Вязьменского, А. В. Геммерлинга, А. З. Зарифьяна, А. А. Ильюшина, С. Д. Лейтеса, А. Р. Ржаницына, Н. С. Стрелецкого, С. П. Тимошенко и других. Отмечено, что хотя техническая и деформационная теория упругих тонкостенных стержней открытого профиля хорошо проработана, дифференциальные уравнения равновесия могут быть решены только приближенными методами, один из которых предложен Г. И. Белым и использовался в ряде работ для исследования общей устойчивости элементов с учетом наличия начальных несовершенств и развития упругопластических деформаций, а также был распространен на исследования устойчивости элементов ЛСТК.

Отдельное внимание уделено «обратному» численно-аналитическому методу расчета общей устойчивости, который предложен Г. И. Белым и был использован для исследования элементов ЛСТК в работах М. О. Смирнова. Отмечено, что этот метод может быть усовершенствован путем разработки быстродействующего алгоритма расчета на заданное соотношение усилий.

В второй главе исследуются вопросы прочности элементов ЛСТК с учетом фактической редукции сечения.

Для определения редукции сечения установлены зависимости относительной эффективной ширины пластинок и относительной эффективной толщины элементов их усиления от безразмерных параметров: условной гибкости, распределения напряжений и соотношения расчетного сопротивления к модулю упругости. Предложено использовать коэффициенты $r_x = W_{x,ef} / W_{x,g}$, $r_y = W_{y,ef} / W_{y,g}$, $r_z = A_{ef} / A_g$ в качестве интегральных безразмерных параметров редукции сечения, которые могут быть рассчитаны на этапе разработки сортамента и приведены в виде справочных данных.

Для расчета коэффициентов редукции предложено два метода: численно-аналитический метод и «обратный» численный метод «Сечение». Отмечено, что численно-аналитический метод, предполагающий итерационное уточнение координат центра тяжести сечения, слишком сложен для использования в практике проектирования.

Идея «обратного» численного метода «Сечение» состоит в расчете усилий, соответствующих заданному предельному деформированному состоянию

$$\varepsilon_z(x, y) = \varepsilon_{z, \max} \cdot \left[k_N + (1 - |k_N|) \left(k_{M_x} \frac{y}{y^*} + (1 - k_{M_x}) \frac{x}{x^*} \right) \right], \quad (1)$$

где $k_N \in [-1; 1]$ и $k_{M_x} \in [0; 1]$ – параметры распределения деформации;

x^*, y^* – координаты наиболее напряженной точки; $\varepsilon_{z, \max} = R_y / E$ – деформация в наиболее напряженной точке.

Учитывая особенности расчета ЛСТК (работа в пределах упругих деформаций, использование билинейной диаграммы работы стали) для расчета точных значений усилий, воспринимаемых поперечным сечением, можно применить простейший метод численного интегрирования Симпсона. Тогда в безразмерном виде предельные усилия получим по формулам

$$\begin{cases} \bar{N}_{\lim} = \frac{E}{2A_g R_y} \sum_{i=1}^n b_i t_i (\varepsilon_{z, s, i} + \varepsilon_{z, e, i}), \\ \bar{M}_{x, \lim} = \frac{E}{6W_{x, g} R_y} \sum_{i=1}^n b_i t_i (\varepsilon_{z, s, i} (2y_{s, i} + y_{e, i}) + \varepsilon_{z, e, i} (2y_{e, i} + y_{s, i})), \\ \bar{M}_{y, \lim} = \frac{E}{6W_{y, g} R_y} \sum_{i=1}^n b_i t_i (\varepsilon_{z, s, i} (2x_{s, i} + x_{e, i}) + \varepsilon_{z, e, i} (2x_{e, i} + x_{s, i})), \end{cases} \quad (2)$$

где b_i, t_i – редуцированная ширина и толщина i -ой пластинки; $x_{s, i}, y_{s, i}, x_{e, i}, y_{e, i}$ – координаты её начальной и конечной точек; $\varepsilon_{z, s, i} = \varepsilon_z(x_{s, i}, y_{s, i})$ и $\varepsilon_{z, e, i} = \varepsilon_z(x_{e, i}, y_{e, i})$ – деформации в этих точках.

Перебирая все возможные значения k_N и k_{M_x} , и откладывая соответствующие значения внутренних усилий по (2) в координатах $\bar{N}, \bar{M}_x, \bar{M}_y$ получим поверхность прочности сечения. Луч, проведенный из начала координат, и проходящий через точку, соответствующую действующим на элемент усилиям N, M_x, M_y , пересекает поверхность прочности в точке $\bar{F}_{\lim}$ с координатами $\bar{N}_{\lim}, \bar{M}_{x, \lim}, \bar{M}_{y, \lim}$, с учетом значений которых проверка прочности по фактическому распределению напряжений может быть записана в виде

$$K_u^{str} = \frac{1}{r R_y \gamma_c} \left(\frac{|N|}{A_g} + \frac{|M_x|}{W_{x,g}} + \frac{|M_y|}{W_{y,g}} \right) \leq 1, \quad (3)$$

где $r = \frac{|N_{\lim}|}{A_g R_y} + \frac{|M_{x,\lim}|}{W_{x,g} R_y} + \frac{|M_{y,\lim}|}{W_{y,g} R_y}$ – коэффициент фактической редукции сечения.

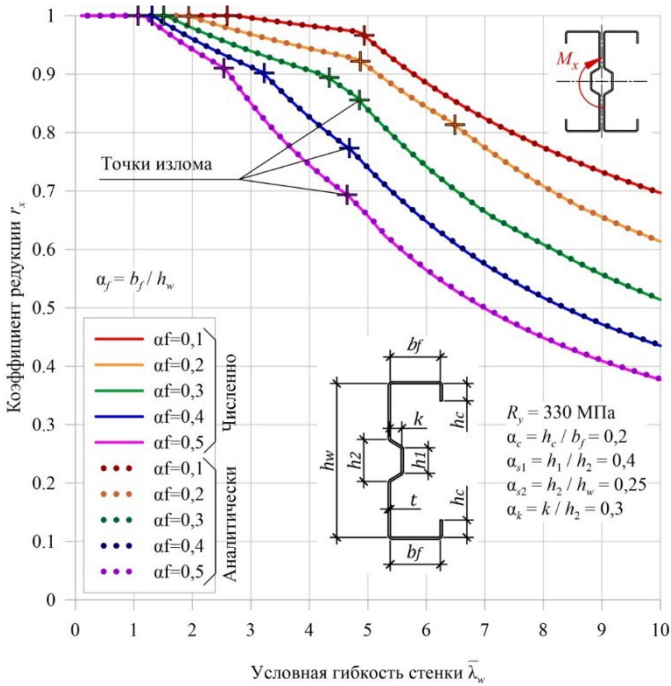


Рисунок 1 – Коэффициент редукции r_x спаренного Σ -профиля

Для нахождения координат точки $\bar{F}_{\lim}$ на поверхности прочности предложен эффективный численный метод, учитывающий особенности работы элементов ЛСТК, позволяющий получить результат с высокой точностью за считанное количество итераций и гарантирующий сходимость.

Показано, что результаты расчетов коэффициентов редукции различными методами аналогичны (см. рисунок 1), при этом аппроксимировать зависимость коэффициентов редукции сечения от условных гибкостей составляющих его пластин не представляется возможным.

Предложенный «обратный» численный метод расчета элементов ЛСТК по фактически редуцированному сечению обобщен на элементы с несимметричными сечениями.

При исследовании прочности спаренных в двутавр швеллеров, С- и Σ -профилей ЛСТК (пример изолиний поверхности прочности показан на рисунке 2) выявлен недостаток прочности при сжатии с эксцентриситетом в плоскости полка и резерв прочности при сжатии с двухосным эксцентриситетом.

В третьей главе исследуются вопросы общей устойчивости элементов ЛСТК с учетом фактической редукции сечения.

Приведен краткий анализ нормативных положений расчета общей устойчивости европейских и отечественных норм. Отмечено, что для расчета устойчивости по изгибной форме ЛСТК не могут быть применены положения отечественных норм, т.к. они разработаны в предположении упругопластической работы материала. Из анализа теоретических основ европейской методики расчета общей устойчивости сделан вывод: учет негативного влияния изгибно-крутильных деформаций путем увеличения изгибающих моментов в плоскости большей жесткости, как это сделано в европейской методике, нарушает физический смысл явления, что негативно сказывается на точности получаемых результатов.

Необходимые для построения практического метода расчета решения задач устойчивости систематизированы и изложены с использованием унифицированной системы обозначений. Исследуется устойчивость стержня, имеющего длину l , которая принимается в зависимости от решаемой задачи $l = l_x = \mu_x l_{0,x}$ или $l = l_y = \mu_y l_{0,y}$, где $l_{0,x}$ и $l_{0,y}$ – геометрическая длина, μ_x и μ_y – соответствующие коэффициенты расчетной длины. Стержень закреплен шарнирно-неподвижно с одной стороны ($u = v = w = 0$), и шарнирно-подвижно – с другой ($u = v = 0$), при этом стержень закреплен от поворота на двух концах ($\theta = 0$), но деформация не ограничена (см. рисунок 3).

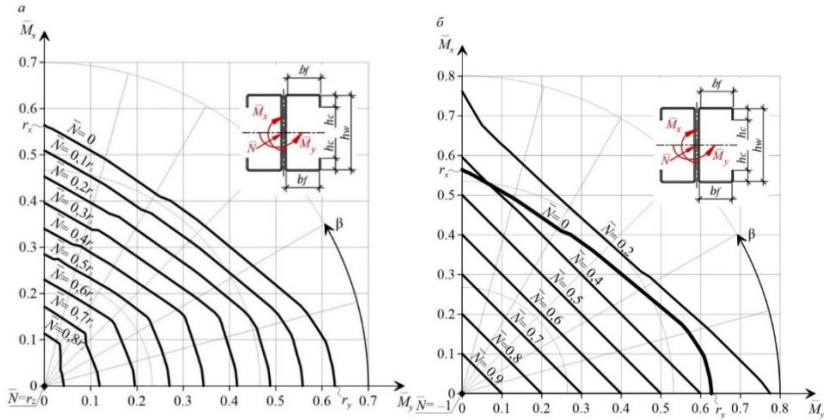


Рисунок 2 – Изолинии $\bar{N} = \text{Const}$ поверхности прочности спаренного С-профиля ($\bar{\lambda}_w = 5$, $b_f/h_w = 0,5$, $h_c/b_f = 0,2$, $R_y = 330$ МПа):
а) при $N \geq 0$; б) при $N \leq 0$

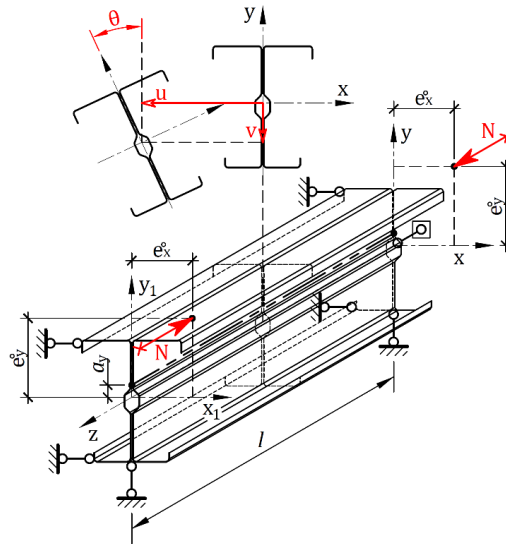


Рисунок 3 – Расчетная схема стержня

Рассматриваются поперечные сечения, имеющие хотя бы одну ось симметрии « y » такую, что $I_y \leq I_x$. Координата центра изгиба обозначена a_y .

Круг рассматриваемых загрузок ограничен внецентренным сжатием с эксцентриситетами e_x^o и e_y^o в плоскостях меньшей и большей жесткости, что соответствует подходу СП 16.13330.2017.

Отмечено, что устойчивость стержней ЛСТК определяется прочностью в наиболее нагруженном поперечном сечении при расчете по деформированной схеме.

Система дифференциальных уравнений равновесия основана на технической теории расчёта тонкостенных стержней Власова В.З. и деформационной теории упругих стержней В.З. Власова, Л.Н. Воробьёва, Б.М. Бродуе, Г.В. Воронцова, обобщенной Е. А. Бейлиным

$$EI_x v'' + Nv = -Ne_{y,v}^o, \quad (4)$$

$$\begin{cases} EI_y u'' + N \left[u + \theta(e_{y,u}^o - a_y) \right] = -Ne_x^o, \\ EI_\omega \theta'' - GI_k \theta'' + N(e_{y,u}^o - a_y)u'' + N(i_A^2 + 2\beta_y e_{y,u}^o) \theta'' = 0, \end{cases} \quad (5)$$

где E и G – модули упругости и сдвига;

I_x, I_y, I_ω, I_k – моменты инерции относительно осей « X » и « Y », секториальный момент инерции и момент инерции чистого кручения;

$$i_A^2 = i_p^2 + a_y^2, \quad \beta_y = \frac{1}{2I_{xA}} \oint (x^2 + y^2) y dA - a_y, \quad i_p^2 = \frac{I_p}{A} = \frac{I_x + I_y}{A}.$$

После решения независимого уравнения (4) и системы (5) методом Г. И. Белого получены деформационные коэффициенты, позволяющие перейти от значений концевых эксцентриситетов продольной силы к эксцентриситетам в середине пролета стержня.

$$K_{d,x} = \frac{e_{y,v}^o + v_{\max}}{e_{y,v}^o} = 1 + \frac{\pi^2}{8} \times \frac{\bar{N}}{\bar{N}_{cr,x}} \left(1 + \frac{32}{\pi^3} \times \frac{\bar{N}/\bar{N}_{cr,x}}{1 - \bar{N}/\bar{N}_{cr,x}} \right), \quad (6)$$

$$\begin{aligned} K_{d,y} = \frac{e_x^o + u_{\max}}{e_x^o} = 1 + \frac{\pi^2}{8} \times \frac{\bar{N}}{\bar{N}_{cr,y}} \left(1 + \frac{32}{\pi^3} \times \frac{\bar{N}/\bar{N}_{cr,y}}{1 - \bar{N}/\bar{N}_{cr,y}} \times \right. \\ \left. \times \left[1 + \frac{K_e}{K_k + K_\omega} \cdot \frac{\bar{N}/\bar{N}_{cr,y}}{(1 - \bar{N}/\bar{N}_{cr,1})(1 - \bar{N}/\bar{N}_{cr,2})} \right] \right). \end{aligned} \quad (7)$$

где $v_{\max} = V_n + V_{уст}$, $u_{\max} = U_n + U_{уст}$ – максимальные прогибы стержня;

$\bar{N} = \frac{N}{AR_y}$, $\bar{N}_{cr,x} = \frac{N_{cr,x}}{AR_y} = \frac{\pi^2}{\lambda_x^2}$, $\bar{N}_{cr,y} = \frac{N_{cr,y}}{AR_y} = \frac{\pi^2}{\lambda_y^2}$ – действующая и критические силы по изгибным формам в безразмерном виде;

$\bar{\lambda}_x = \lambda_x \sqrt{R_y/E}$, $\bar{\lambda}_y = \lambda_y \sqrt{R_y/E}$ – условные гибкости стержня;

$\lambda_x = l_x/i_x$, $\lambda_y = l_y/i_y$, $i_x = \sqrt{I_x/A}$, $i_y = \sqrt{I_y/A}$ – гибкости, радиусы инерции;

$K_e = (e_{y,u}^0 - a_y)^2 \pi^2 / l_y^2$ – характеристика эксцентриситета продольной силы;

$$K_p = (i_A^2 + \beta_y e_{y,u}^0) \pi^2 / l_y^2, \quad K_\omega = \frac{I_\omega \pi^2}{I_y l_y^2}, \quad K_k = \frac{GI_k}{EI_y};$$

$\bar{N}_{cr,1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{D}}{2a}$ – критические силы по изгибно-крутильной форме;

$$D = b^2 - 4ac, \quad a = K_p - K_e, \quad b = -\bar{N}_{cr,y} (K_k + K_p + K_\omega),$$

$c = \bar{N}_{cr,y}^2 (K_k + K_\omega)$ – дискриминант и коэффициенты квадратного уравнения.

Редукция сечения учитывается по методу упругих решений А. А. Ильюшина путем фиктивного догружения стержня. При этом фиктивные изгибающие моменты, рассчитанные для наиболее нагруженного поперечного сечения, согласно общепринятым положениям, в запас устойчивости предполагаются распределенными равномерно по длине стержня. Тогда опорные эксцентриситеты связаны с усилиями в наиболее нагруженном сечении следующим образом

$$\begin{cases} m_{x,0} = \frac{\bar{M}_{x,0}}{\bar{N}} = \frac{1}{\bar{N} \cdot K_{d,x}} \left(\bar{M}_x - \bar{M}_{x,f} (K_{d,x} - 1) \right), \\ m_{y,0} = \frac{\bar{M}_{y,0}}{\bar{N}} = \frac{1}{\bar{N} \cdot K_{d,y}} \left(\bar{M}_y - \bar{M}_{y,f} (K_{d,y} - 1) \right), \end{cases} \quad (8)$$

где $\bar{N}$, $\bar{M}_x$, $\bar{M}_y$ – реально действующие в наиболее нагруженном поперечном сечении усилия; $\bar{M}_{x,f} = \bar{M}_x^* - \bar{M}_x$, $\bar{M}_{y,f} = \bar{M}_y^* - \bar{M}_y$ – фиктивные и згибающие моменты; $\bar{M}_x^* = \frac{E}{W_{x,g} R_y} \cdot \oint_A \varepsilon(x,y) \cdot y \cdot dA$,

$$\bar{M}_y^* = \frac{E}{W_{y,g} R_y} \cdot \oint_A \varepsilon(x,y) \cdot x \cdot dA \text{ – полные изгибающие моменты.}$$

Задаваясь деформированным состоянием по (1), перебирая все возможные значения k_N и k_{M_x} , и откладывая соответствующие значения

опорных усилий в координатах $\bar{N}$, $\bar{M}_{x,0} = \bar{N}m_{x,0}$, $\bar{M}_{y,0} = \bar{N}m_{y,0}$, получим поверхность устойчивости элемента. Луч, проведенный из начала координат, и проходящий через точку, соответствующую действующим на элемент опорным усилиям N , M_x , M_y , пересекает поверхность устойчивости в точке $\bar{F}_{\text{лим}}$ с координатами $\bar{N}_{\text{лим}}$, $\bar{M}_{x,0,\text{лим}}$, $\bar{M}_{y,0,\text{лим}}$, с учетом значений которых проверка устойчивости по фактически редуцированному сечению может быть записана в виде

$$K_u^b = \frac{N}{\varphi A_g R_y \gamma_c} \leq 1, \quad (9)$$

где $\varphi = \bar{N}_{\text{лим}}$ – коэффициент устойчивости.

Для нахождения координат точки $\bar{F}_{\text{лим}}$ на поверхности устойчивости, как и в задачах прочности, предложен эффективный численный метод.

Отмечено, что «обратный» численный метод используется в численно-аналитическом расчете устойчивости только для установления действительной связи между реальными и фиктивными усилиями в наиболее нагруженном поперечном сечении стержня. Предложено использовать аппроксимацию связи внутренних усилий в наиболее нагруженном поперечном сечении для аналитического расчета коэффициентов устойчивости. Система уравнений для расчета коэффициентов устойчивости в общем случае имеет вид

$$\begin{cases} \frac{N}{r_z A R_y} + \frac{M_x}{r_x W_x R_y} + \frac{M_y}{r_y W_y R_y} = 1, \\ \frac{N^*}{A R_y} + \frac{M_x^*}{W_x R_y} + \frac{M_y^*}{W_y R_y} = 1, \\ m_x + \Delta m_x = \frac{A}{W_x} \times \frac{1}{N \cdot K_{d,x}} (M_x - M_{x,f} (K_{d,x} - 1)), \\ m_y + \Delta m_y = \frac{A}{W_y} \times \frac{1}{N \cdot K_{d,y}} (M_y - M_{y,f} (K_{d,y} - 1)), \\ N = r_z N^*, \\ M_x = r_x M_x^*, \end{cases} \quad (10)$$

где M_x , M_y – изгибающие моменты в середине пролета; $m_x + \Delta m_x$, $m_y + \Delta m_y$ – опорные относительные эксцентриситеты силы N .

B: Static Structural

v

Type: Directional Deformation(Y Axis)

Unit: mm

Global Coordinate System

Time: 1 s

13.12.2024 14:53

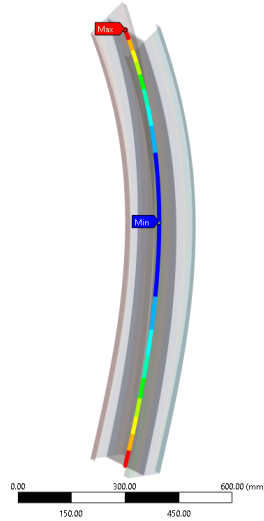
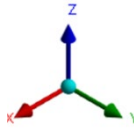
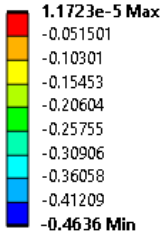


Рисунок 5 – Результаты расчета прогиба v спаренных С-профилей с параметрами

$$\bar{\lambda}_w = 6, \alpha_f = 0,4, \bar{\lambda}_y = 2,0, m_x = 0,1, m_y = m_{y,cl} = 0,14, \bar{N} = 0,271.$$

Коэффициенты увеличения деформаций (см. формулы (6) и (7)) рассчитаны по формулам

$$K_{dx,a} = \frac{y_e + v}{y_e}, \quad (11)$$

$$K_{dy,a} = \frac{x_e + u}{x_e}. \quad (12)$$

Коэффициенты использования прочности наиболее нагруженного поперечного сечения по требованиям действующих норм рассчитаны по формуле

$$K_u = \frac{\bar{N}}{r_z} + \frac{\bar{M}_x}{r_x} + \frac{\bar{M}_y}{r_y} = \bar{N} \cdot \left(\frac{1}{r_z} + K_{d,x} \frac{m_x}{r_x} + K_{d,y} \frac{m_y}{r_y} \right). \quad (13)$$

Деформационные коэффициенты и коэффициенты использования прочности в наиболее нагруженном поперечном сечении из численно-аналитического расчета и расчета методом конечных элементов сравниваются по формуле

$$\Delta = \frac{P_a - P}{P_a} \%, \quad (14)$$

где P – результат, полученный численно-аналитически; P_a – результат, полученный в Ansys Mechanical.

Результаты расчётов для различных параметров сечения α_f , $\bar{\lambda}_w$, параметров стержня $\bar{\lambda}_x$, $\bar{\lambda}_y$ и параметров нагрузки $\bar{N}$, m_x , m_y (в сумме 696 различных вариантов) сведены в таблицы приложения А диссертации.

Отмечено, что результаты расчетов деформационных коэффициентов разработанным обратным численно-аналитическим методом хорошо согласуются с результатами расчетов методом конечных элементов (МКЭ), при этом отклонения по величине усилий в наиболее нагруженном поперечном сечении не превышают 1% для стержней малой и средней гибкости.

Наибольшие отклонения численно-аналитического решения от результатов, полученных по МКЭ, выявлены при расчете устойчивости по изгибно-крутильной форме стержней большой гибкости, сжатых с большим эксцентриситетом. Эти результаты мало значимы с практической точки зрения ввиду крайне низких значений коэффициента устойчивости, при этом численно-аналитический метод дает консервативную оценку по сравнению с МКЭ.

Представлены результаты испытаний стержней ЛСТК, проведенные в секторе механических испытаний строительных конструкций СПбГАСУ. В таблице 1 показаны основные параметры испытанных стержней.

Таблица 1 – Параметры типоразмеров профилей

Профиль	Типо-размер	Длина профиля L_0 , мм	Эксцентриситеты		Расчетная длина L , мм	Гибкости		Кол-во образцов
			e_x , мм	e_y , мм		λ_x	λ_y	
Швеллер 110х40х1,5	Ш-1100	1100	–	32	1220	29,0	74,0	3
	Ш-1400	1400	–	32	1520	36,1	92,1	3
	Ш-1900	1900	–	16	2020	48,0	122,4	3
С-профиль 160х70х1,5	С-1400	1400	–	51	1520	23,8	41,9	3
	С-2100	2100	–	51	2170	33,9	59,8	3
Σ-профиль 280х80х1,5	Сигма-1400	1400	–	80	1520	14,4	42,1	3
	Сигма-2100	2100	–	80	2170	20,5	60,0	3
Всего								21

Испытания проведены с использованием испытательной универсальной машины «BISS UT-05-1000» до разрушения образца (см. рисунок 6), при этом на каждом шаге нагрузки фиксировались относительные деформации в 4 точках сечения (по 2 датчика в каждой точке с двух сторон листа) и перемещения u , v и θ в трех сечениях по длине стержня.

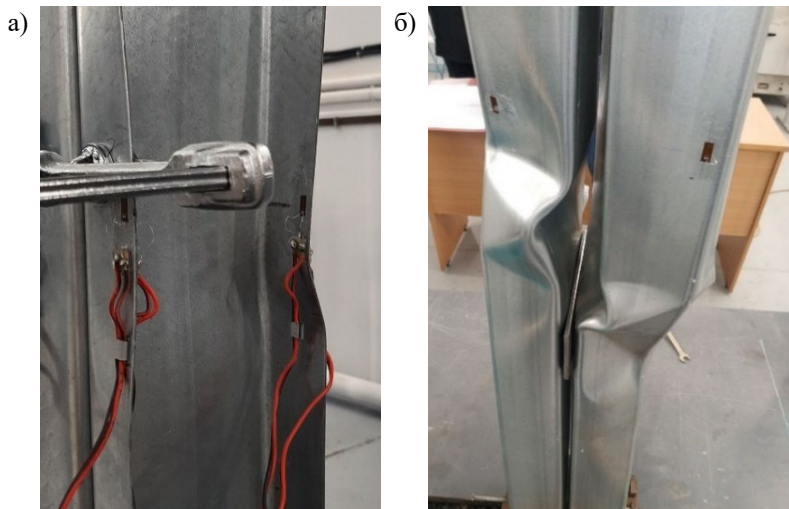


Рисунок 6 – Общий вид разрушенных образцов:
а) швеллеров; б) С-профилей

Из наименее нагруженных зон каждого разрушенного стержня отобраны образцы для определения механических характеристик сталей. По средним значениям предела текучести выполнены расчеты методом СП 260.1325800 (см. «СП 260»), представленным в пятой главе работы практическим методом (см. «Практ.»), представленным в третьей главе работы численно-аналитическим методом (см. «Числ. анализ.»), а также методом конечных элементов по рекомендациям EN 1993-1-3:2005 в физически и геометрически нелинейной постановке с учетом начальных несовершенств, принятых по первой форме потери устойчивости с амплитудой 2 мм (см. «МКЭ»). Результаты испытаний и расчетов сведены в таблицу 2.

Расчеты в целом согласуются с результатами испытаний. Расчеты МКЭ в некоторых случаях дают завышенную оценку устойчивости, прочие расчеты дают консервативную оценку, при этом результаты расчета численно-аналитическим методом практически для всех образцов позволяют учитывать значительные резервы.

Таблица 2 – Результаты испытаний и расчетов различными методами

Испытания						Расчетная предельная продольная сила, кН			
Типоразмер	Nu(ср), кН	Ry, МПа	φ	$\bar{\lambda}_y$	mх	СП 260	Практ.	Числ. аналит.	МКЭ
С-1400	121.6	418	0.29	1.9	1.0	78.5	97.2	105.4	141.3
С-2100	109.2	418	0.26	2.7	1.0	70.2	91.8	98.4	132.8
Сигма-1400	170.8	426	0.28	2.0	1.0	105.3	125.3	138.5	187.1
Сигма-2100	147.1	426	0.24	2.7	1.0	95.6	118.7	133.7	180.0
Ш-1100	53.5	370.5	0.26	3.1	1.0	33.0	34.5	39.3	54.6
Ш-1400	50.4	370.5	0.24	3.9	1.0	28.1	29.8	32.7	41.4
Ш-1900	45.5	392	0.21	5.2	0.5	27.0	23.0	25.9	35.5

В пятой главе представлены разработанные практические методы расчета прочности и общей устойчивости элементов ЛСТК. Фактическая редукция сечения при совместном действии усилий учитывается коэффициентами редукции сечения и дополнительными эксцентриситетами, которые определяются при раздельном действии усилий и могут быть приведены в сортаментах, что существенно упрощает проектирование ЛСТК.

Отмечено, что при совместном действии продольной силы и изгибающего момента в плоскости большей жесткости «двухавровых» элементов ЛСТК действительные изолинии поверхности прочности хорошо аппроксимируются нормативной формулой (см. рисунок 7 а), но при совместном действии продольной силы и изгибающего момента в плоскости меньшей жесткости прочность «двухавровых» ЛСТК может быть не обеспечена расчетом по нормативной формуле (см. зоны, закрашенные красным цветом, на рисунке 7 б), поэтому предложено использовать для их расчета дополнительный эксцентриситет Δx_H .

Расчет на прочность при внецентренном сжатии с двухосным эксцентриситетом предлагается выполнять по формуле

$$\left(\frac{M_x + \Delta M_x}{r_{x,N} W_{g,n,x} R_y \gamma_c} \right)^p + \left(\frac{M_y + \Delta M_y}{r_{y,N} W_{g,n,y} R_y \gamma_c} \right)^q \leq 1, \quad (15)$$

где $p = \sqrt{\frac{1}{r_x}}$, $q = \sqrt{\frac{1}{r_y}}$ – коэффициенты учёта фактической редукции;

$r_{x(y),N} = r_{x(y)} \cdot \left(1 - \frac{N}{N_u} \right)$ – коэффициенты редукции при действии N и $M_{x(y)}$.

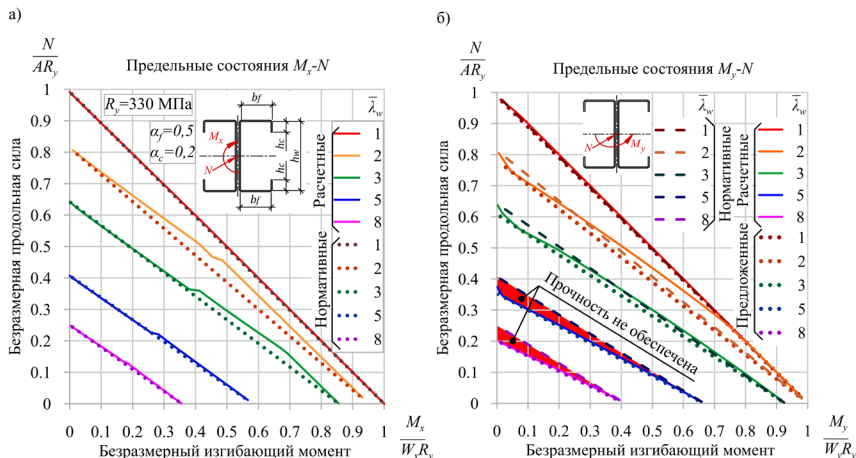


Рисунок 7 – Изолинии поверхности прочности спаренных в двутавр С-профилей: а) $M_y = 0$ при действии N и M_x ; б) $M_x = 0$ при действии N и M_y .

Формула (15) позволяет учитывать резервы прочности спаренных в двутавр С- и Сигма-профилей, выявленные расчетом по фактическому распределению напряжений (см. зоны, закрашенные зеленым цветом, на рисунке 8).

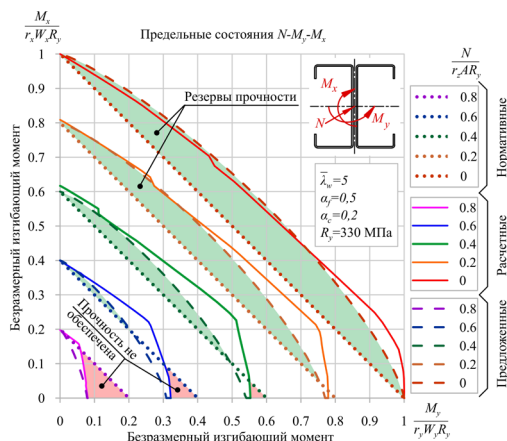


Рисунок 8 – Изолинии $N = Const$ поверхности прочности спаренных в двутавр С-профилей

Расчет на устойчивость при внецентренном сжатии предлагается выполнять по формуле, аналогичной формуле (109) СП 16.13330.2017

$$\frac{N}{\Phi_{e,x(y)} A_g R_y \gamma_c} \leq 1, \quad (16)$$

где $\Phi_{e,x(y)} = \frac{-b - \sqrt{D}}{2a} \leq r_z \frac{r_{x(y)}}{r_{x(y)} + r_z \Delta m_{x(y)}}$ – коэффициент устойчивости;

$D = b^2 - 4 \cdot a \cdot d$ – дискриминант;

$$a = 1,234 - 0,234 \left(r_{x(y)} + r_z \left(m_{x(y)} + \Delta m_{x(y)} \right) \right),$$

$$b = -\Phi_{cr,x(y)} \left(r_{x(y)} + r_z \left(m_{x(y)} + \Delta m_{x(y)} \right) \right) - r_z \left(1,234 - 0,234 r_{x(y)} \right),$$

$d = \Phi_{cr,x(y)} r_{x(y)} r_z$ – безразмерные коэффициенты;

$$\Phi_{cr,x(y)} = \pi^2 / \bar{\lambda}_{g,x(y)}^2 ;$$

$$m_{x(y)} = \frac{M_{x(y)}}{N} \times \frac{A_g}{W_{g,x(y)}} \geq m_{x(y),cl} - \text{относительный эксцентриситет};$$

$$m_{x(y),cl} = -\alpha_{x(y)} + \beta_{x(y)} \bar{\lambda}_{g,x(y)} - \text{то же, случайный};$$

$\alpha_{x(y)}$ и $\beta_{x(y)}$ – см. таблицу 7 СП 16.13330.2017;

$$\Delta m_x = \pm |\Delta y_N| \frac{A_g}{W_{g,x}}, \quad \Delta m_y = (|\Delta x_H| \pm |\Delta x_N|) \frac{A_g}{W_{g,y}} - \text{дополнительные экс-}$$

центриситеты.

Расчет на устойчивость при центральном сжатии предлагается выполнять по формуле, аналогичной формуле (7) свода правил СП 16.13330.2017

$$\frac{N}{\Phi_{x(y)} A_g R_y \gamma_c} \leq 1, \quad (17)$$

где $\Phi_{x(y)}$ – коэффициент устойчивости, рассчитывается аналогично $\Phi_{e,x(y)}$

при $m_{x(y)} = m_{x(y),cl}$.

Расчет на устойчивость по изгибно-крутильной форме при внецентренном сжатии в плоскости большей жесткости, а также при сжатии с двухосным эксцентриситетом, предлагается выполнять по формуле

$$\frac{N}{\Phi_{cy} A_g R_y \gamma_c} \leq 1, \quad (18)$$

где Φ_{cy} – коэффициент устойчивости, принимается из решения уравнения 4-ой степени.

Расчет по формуле (18) предполагает большое количество промежуточных вычислений и расчет корней уравнения 4-ой степени, но, как будет

показано ниже, позволяет учитывать значительные резервы устойчивости стержней, поэтому он будет полезен при автоматизации расчетов элементов в специализированном программном обеспечении.

Расчет на устойчивость по изгибно-крутильной форме при внецентренном сжатии в плоскости большей жесткости, а также при сжатии с двухосным эксцентриситетом, предлагается также выполнять по упрощенной формуле, аналогичной формуле (111) свода правил СП 16.13330.2017

$$\frac{N}{c \varphi_{e,y} A_g R_y \gamma_c} \leq 1, \quad (19)$$

где $c = \frac{\varphi_{e,y}^*}{\varphi_{e,y}} \leq \frac{\varphi_{e,y,\pi}^*}{\varphi_{e,y,\pi}}$ – коэффициент учета изгибающего момента M_x ; $\varphi_{e,y}^*$

рассчитывается аналогично $\varphi_{e,y}$, но при $r_z = r_z^*$; $r_z^* = r_z \frac{r_x}{r_x + r_z (m_x + \Delta m_x)}$ –

эквивалентный коэффициент редукции; $\varphi_{e,y,\pi}$ и $\varphi_{e,y,\pi}^*$ рассчитываются аналогично $\varphi_{e,y}$ и $\varphi_{e,y}^*$, но при $\bar{\lambda}_{g,y} = \pi$.

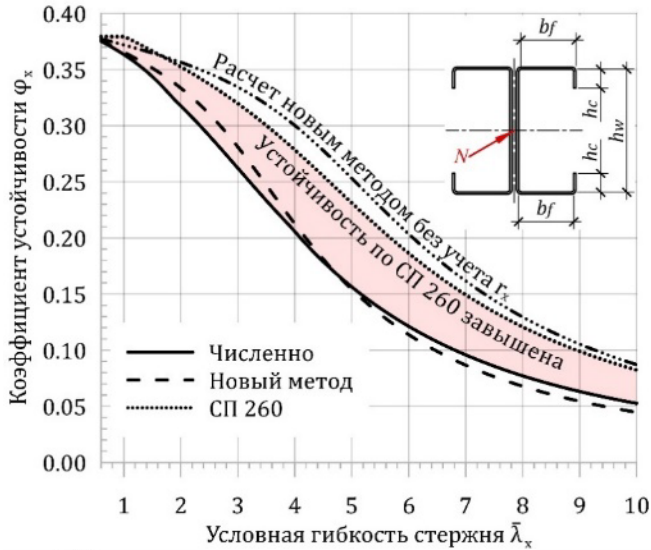
Результаты расчета коэффициентов устойчивости показаны на примере спаренных С-профилей ($R_y = 330$ МПа, $\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{t} \sqrt{\frac{R_y}{E}} = 6,0$, $\alpha_f = b_f / h_w = 0,4$, $\alpha_c = h_c / b_f = 0,2$, $r_z = 0,383$, $r_x = 0,557$, $r_y = 0,633$, $\Delta m_y = |\Delta x_H| A / W_y = 0,254$) на рисунках 9-10.

Отмечено, что использование нормативного метода расчета устойчивости элементов ЛСТК, заимствованного из европейских норм проектирования, приводит к завышению оценки устойчивости стержней при центральном сжатии и занижению оценки устойчивости по изгибно-крутильной форме. Нормативный метод СП 260.1325800.2023 не гармонизирован с СП 16.13330.2017. Его применение затруднено также большим количеством промежуточных вычислений.

Разработанный практический метод гармонизирован с отечественным сводом правил СП 16.13330.2017, при чем коэффициенты устойчивости элемента ЛСТК по изгибной (при центральном и внецентренном сжатии) и изгибно-крутильной формам определяются аналитически.

Достоверность разработанного метода расчета подтверждается результатами проведенных испытаний и верификационных расчетов методом конечных элементов.

а)



б)

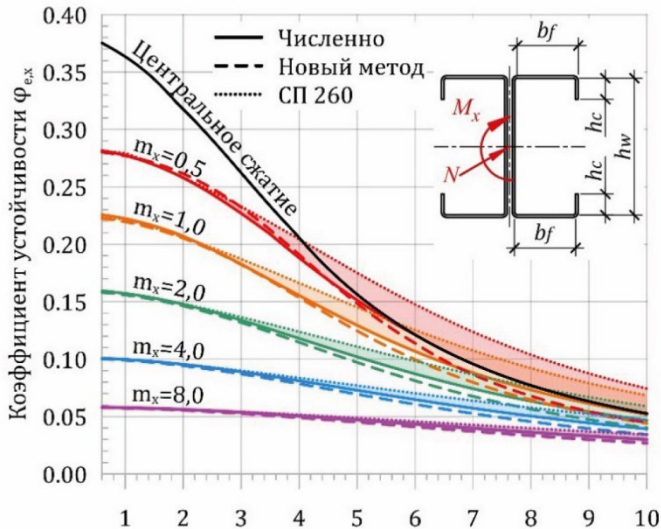
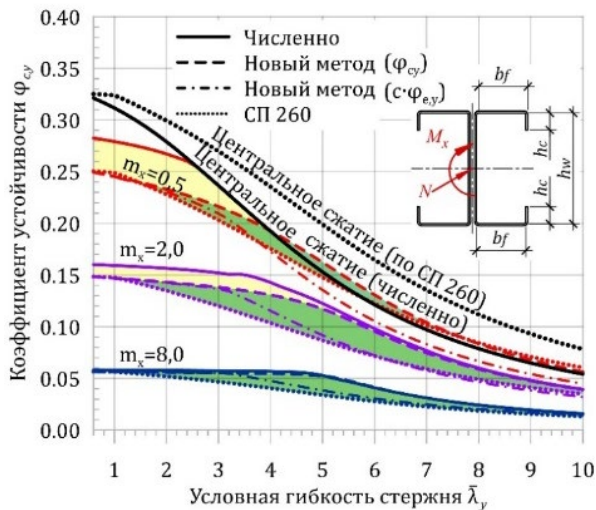


Рисунок 9 – Устойчивость С-профилей по изгибной форме в плоскости большей жесткости: а) центральное сжатие; б) внецентренное сжатие

а)



б)

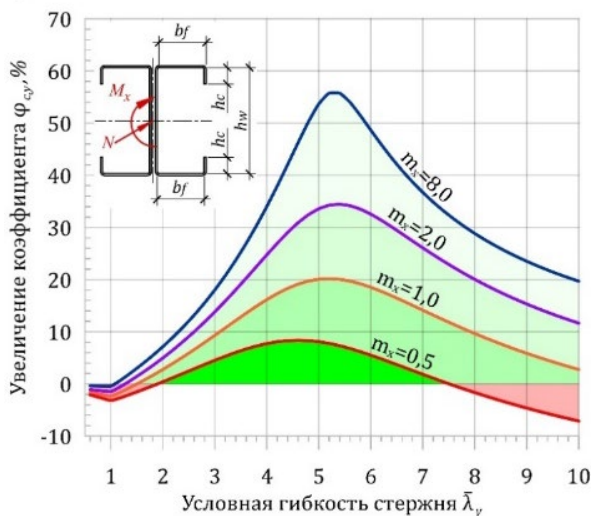


Рисунок 10 – Устойчивость С-профилей по изгибно-крутильной форме: а) коэффициент устойчивости; б) эффективность предложенного метода расчета

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработан быстродействующий «обратный» численный метод расчета предельных напряженно-деформированных состояний в поперечном сечении элемента ЛСТК по заданному соотношению усилий.

Расчет производится в безразмерных параметрах по фактической редукции сечения, учитывающей потерю местной устойчивости и устойчивости формы сечения.

2. Разработан быстродействующий «обратный» численно-аналитический метод расчета общей устойчивости элемента ЛСТК, сжатого с заданными опорными эксцентриситетами, в котором фактическая редукция сечения по методу упругих решений компенсируется догрузением фиктивными силами.
3. Обратный численно-аналитический метод расчета устойчивости верифицирован путем сравнения полученных с его помощью результатов с результатами расчетов методом конечных элементов при использовании аналогичной схемы редукции сечения.
4. Выявлены резервы общей устойчивости элементов ЛСТК по изгибно-крутильной форме, возникающие в силу принятых при разработке нормативного метода расчета допущений, нарушающих физический смысл явления.
5. Разработан практический метод расчета прочности и общей устойчивости элементов ЛСТК по изгибной (при центральном и внецентренном сжатии) и изгибно-крутильной формам, который гармонизирован с отечественным сводом правил, хорошо согласуется с численно-аналитическим методом расчета и позволяет учитывать резервы устойчивости по изгибно-крутильной форме.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в периодических научных изданиях, входящих в перечень ВАК РФ:

1. Белый Г. И., **Гарипов А. И.** Теоретические основы проверки устойчивости тонкостенных элементов стальных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2025. № 4. С. 33–42.
2. Белый Г. И., **Гарипов А. И.** Новый практический метод проверки устойчивости тонкостенных элементов стальных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2025. № 5. С. 20–30.
3. **Гарипов А. И.** Усовершенствованный инженерный метод проверки прочности ЛСТК // Вестник гражданских инженеров. 2024. № 6 (107). С. 33–44.
4. **Гарипов А. И.** Определение параметров деформированного состояния в сечении при расчете стержневых элементов стальных конструкций обратным методом // Вестник гражданских инженеров. 2025. № 3 (110). С. 29–37.

Компьютерная верстка *О. Н. Комиссаровой*

Подписано к печати 28.09.2026. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,5. Тираж 120 экз. Заказ 101.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.
190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 4.

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А