

На правах рукописи



ФОМЕНКО Евгений Юрьевич

**ИЗГИБНО-КРУТИЛЬНАЯ ФОРМА ПОТЕРИ
УСТОЙЧИВОСТИ ВНЕЦЕНТРЕННО-СЖАТЫХ СТАЛЬНЫХ
ДВУТАВРОВЫХ СТОЕК С ПЕРФОРИРОВАННОЙ
СТЕНКОЙ**

Специальность 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Красноярск – 2011

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет»

Научный руководитель: член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, профессор **Енджиевский Лев Васильевич**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор **Зверев Виталий Валентинович**

доктор технических наук, профессор **Сильченко Петр Никифорович**

Ведущая организация: ГОУ ВПО «Томский государственный архитектурно-строительный университет»

Защита состоится 29 апреля 2011 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета ДМ 212.099.08 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет» по адресу: 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82, аудитория К-120.

Тел. (8-391) 252-78-68; факс (8-391) 252-78-68; e-mail end-lev@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет».

Автореферат разослан « 27 » марта 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Пересыпкин Е.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Сложившаяся тенденция увеличения стоимости металлопроката, затрат на отопление и эксплуатацию зданий приводит к необходимости проектирования экономичных строительных конструкций. К настоящему времени недостаточно реализованы возможности применения тонкостенных двутавровых элементов с перфорированной стенкой. Они обладают рядом преимуществ: рациональным распределением материала по сечению, технологичностью изготовления, компактностью, высокой степенью транспортабельности.

Двутавровые элементы с перфорированной стенкой широко применяются в различных типах строительных конструкций, работающих на изгиб; реже – на внецентренное сжатие и сжатие.

В настоящий момент расчеты внецентренно-сжатых двутавровых элементов с перфорированной стенкой производятся на устойчивость и прочность в плоскости действия момента, а также на местную устойчивость. В работах Г. И. Белого и В. М. Дарипаско предложена приближенная численно-аналитическая методика расчета на пространственную устойчивость таких элементов. Недостаточно разработана методика по расчету внецентренно-сжатых двутавровых элементов с перфорированной стенкой при изгибно-крутильной форме потери устойчивости.

Разработка такой методики позволит более обоснованно использовать резервы несущей способности внецентренно-сжатых стальных двутавровых элементов с перфорированной стенкой и активнее внедрять их в практику проектирования и строительства.

Цель работы. На основе сопоставительных анализов численных решений с известными экспериментальными и теоретическими разработать конечноэлементные модели и алгоритмы, адаптированные к задачам потери устойчивости по изгибно-крутильной форме внецентренно-сжатых стальных стоек двутаврового сечения с перфорированной стенкой.

Задачи исследований:

- обосновать расчетные модели и произвести поиск их параметров;
- определить степень влияния различных форм отверстий перфорации на устойчивость двутавровых стоек;
- произвести анализ НДС перфорированных стоек в упругой и упруго-пластической стадиях работы при расчетах на прочность и устойчивость в

плоскости действия момента, а также в упругопластической стадии при изгибно-крутильной форме потери устойчивости;

- выполнить анализ влияния постановки поперечной связи в плоскости наименьшей жесткости на изгибно-крутильную форму потери устойчивости внецентренно-сжатых стальных двутавровых стоек с перфорированной стенкой;
- выявить область применения расчетных моделей с приведенными сплошными стенками вместо перфорированных;
- разработать инженерную методику расчета внецентренно-сжатых стальных двутавровых стоек с перфорированной стенкой при изгибно-крутильной форме потери устойчивости.

Научная новизна:

1. Обоснованы конечноэлементные модели и их параметры для расчета внецентренно-сжатых стоек двутаврового сечения с перфорированной стенкой на изгибную и изгибно-крутильную формы потери устойчивости.

2. Выявлена область применения расчетных моделей с приведенными сплошными стенками вместо перфорированных.

3. Впервые произведена оценка влияния постановки промежуточного закрепления из плоскости стенки на изгибно-крутильную форму потери устойчивости внецентренно-сжатых стальных стоек двутаврового сечения с перфорированной стенкой при начальных искривлениях по дуге окружности и синусоиде.

Достоверность результатов обеспечивается корректным применением сертифицированной расчетной программы ANSYS 11, а также высокой степенью сопоставимости по частным задачам, общей теории пространственной устойчивости тонкостенных стержней В. З. Власова, по СНиП II-23-81* и СП 53-102-2004, а также с экспериментальными данными, полученными Г. М. Чувикиным, М. М. Копытовым и другими авторами.

Практическая значимость результатов исследований состоит в следующем:

- разработана инженерная методика расчета внецентренно-сжатых стальных двутавровых стоек с перфорированной стенкой при изгибно-крутильной форме потери устойчивости;
- предложен способ замены перфорированной стенки сплошностенчатой при расчете изгибно-крутильной формы потери устойчивости.

Основные положения, выносимые на защиту:

- результаты численных исследований изгибно-крутильной формы потери устойчивости внецентренно-сжатых стальных двутавровых стоек с перфорированной стенкой при различной форме отверстий;
- результаты анализа влияния постановки поперечной связи в плоскости наименьшей жесткости на изгибно-крутильную форму потери устойчивости внецентренно-сжатых стальных двутавровых стоек с перфорированной стенкой;
- результаты анализа области применения расчетных моделей с приведенными сплошными стенками вместо перфорированных;
- инженерная методика расчета внецентренно-сжатых стальных двутавровых стоек с перфорированной стенкой при изгибно-крутильной форме потери устойчивости.

Внедрение результатов. Алгоритмы и инженерная методика расчёта внецентренно-сжатых стальных двутавровых стоек с перфорированной стенкой при изгибно-крутильной форме потери устойчивости использованы при разработке проектов стальных несущих конструкций поперечных рам зданий Новосибирским ЗАО Научно-технический центр «ЭРКОНСиб».

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы доложены на XXV региональной научно-технической конференции (г. Красноярск, 2007 г.), на Всероссийских научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых, проходивших в СФУ (г. Красноярск, 2008, 2010 гг.), на Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Интеллект – 2008» (г. Красноярск, 2008 г.), а также на научной конференции СибРО РААСН (г. Новосибирск, 2010 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 работ: в журналах, сборниках научных статей и материалах научно-технических конференций, в том числе две статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ.

Личный вклад автора. Представленные в диссертации результаты получены лично автором или при его непосредственном участии; в совместных публикациях более 50 % результатов исследований принадлежит автору.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка используемой литературы и приложений. Объем диссертации – 158 страниц: в том числе 100 рисунков, 37 таблиц, 5 приложений, библиографический список, включающий 78 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована актуальность темы, сформулированы цель, задачи исследования, основные положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе представлен обзор публикаций, посвященных устойчивости решетчатых стержней на планках, работе и экспериментальным исследованиям сжатых перфорированных элементов; проанализированы работы по исследованию влияния поперечных связей на устойчивость сплошностенчатых элементов и способов определения расчетной длины сжатых стальных элементов.

Устойчивость решетчатых стержней на планках исследовали Ф. Блейх, С. П. Тимошенко, Б. М. Броуде, А. Р. Ржаницын, Н. С. Стрелецкий, В. В. Горев, И. Д. Грудев и другие ученые. Несмотря на хорошую разработанность методов расчета составных стержней на планках, их применение для различных форм перфорации требует дополнительных исследований по учету действительной работы перемычек, отличающихся от соответствующих при прямоугольном очертании. Подобные исследования выполнялись К. М. El-Sawy, А. М. I. Sweedan, М. I. Martini в упругой стадии работы колонн с круглыми и шестиугольными отверстиями в стенке.

Исследованиями работы тонкостенных стержней занимались Г. М. Чувикин, Г. И. Белый, И. И. Ведяков, В. В. Зверев, И. С. Холопов и другие ученые. Наиболее полно выполнены исследования изгибаемых перфорированных балок в работах F. Faltus, Я. И. Олькова, В. В. Бирюлева, В. М. Добрачева, А. А. Юрченко, I. Radić, D. Markulak, H. Showkati и других ученых.

Теоретические и экспериментальные исследования сжатых перфорированных элементов представлены в работах А. Н. Stang, М. Greenspan, М. М. Копытова, В. М. Дарипаско, А. И. Складнева, Т. М. Рогатовских, П. П. Гайджура, А. Г. Кожихова и других ученых.

Вопросами прочности внецентренно-сжатых перфорированных двутавровых стоек с шестиугольными отверстиями занимались А. И. Складнев, Т. М. Рогатовских, П. П. Гайджуров, А. Г. Кожихов, В. М. Дарипаско.

Изгибную форму потери устойчивости центрально-сжатых стержней открытого профиля сечения (типа составных швеллеров и двутавров) с различной формой отверстий перфорации исследовали А. Н. Stang и М. Greenspan, а

центрально- и внецентренно-сжатых стержней коробчатого сечения с овальными и круглыми отверстиями – М. М. Копытов.

В. М. Дарипаско исследовал устойчивость по изгибно-крутильной форме двутавровых стержней с перфорированной стенкой, нагруженных продольной силой с двухосным эксцентриситетом и равномерно распределенной нагрузкой. Опорные закрепления в двух главных плоскостях принимаются шарнирными, закручивание концевых сечений отсутствует. При изучении устойчивости изгибная жесткость в плоскости стенки определялась из выражения для прогиба шарнирно-опертой перфорированной балки с шестиугольными отверстиями, нагруженной равномерно распределенной нагрузкой. Для решения задачи устойчивости по изгибно-крутильной форме использовалась деформационная теория расчета упругих стержней В. З. Власова, обобщенная Б. М. Броуде и Е. А. Бейлиным. Развитие пластических деформаций учитывалось применением методики определения напряжений и деформаций В. П. Коломийца, обобщенной Г. И. Белым на общий случай загрузки. Оценка достоверности таких упрощений недостаточна.

Оценка влияния поперечных связей на устойчивость сжатых сплошностенчатых элементов дана в работах Д. В. Вайнберга, И. М. Киселя, А. П. Коновалова, Син Вань Сян, В. В. Катюшина. Отмечено, что подобные исследования перфорированных элементов отсутствуют. Для реализации кососимметричной формы, отмеченной Д. В. Вайнбергом, И. М. Киселем и В. В. Катюшиным, было принято начальное несовершенство в виде синусоиды.

При анализе вопросов устойчивости отдельных элементов стержневых несущих конструкций в первую очередь возникают вопросы определения расчетных длин сжатых стальных элементов. Частично эти вопросы рассмотрены в работах А. Н. Раевского, Г. И. Белого, А. И. Колесова, А. А. Лапшина, А. В. Валова, С. А. Санкина, А. М. Иващенко и других ученых.

В конце главы сформулированы цель и задачи настоящей диссертации.

Во второй главе обоснована целесообразность выбора МКЭ как основного универсального метода расчета недостаточно изученного класса задач, к которому отнесены изгибная форма потери устойчивости, предел прочности при изгибе, изгибно-крутильная форма потери устойчивости внецентренно-сжатых стальных перфорированных двутавровых стоек без промежуточной связи и с ее учетом.

Указаны физико-геометрические особенности названных задач и про-

граммные комплексы (ПК), с помощью которых успешно они могут быть реализованы.

Выполнены сравнения ПК SCAD 11.0, Лира 9.4 и ANSYS 11. Рассмотрены возможности использования моделей из оболочечных и объемных конечных элементов при расчетах по линейной теории устойчивости упругих тел, с учетом геометрической, физической нелинейности, с одновременным учетом геометрической и физической нелинейностей, а также с учетом начальных несовершенств в виде дуги окружности или синусоиды.

В дальнейшем предпочтение отдано ПК ANSYS 11 ввиду возможности его использования для всего названного класса задач.

На конкретных численных примерах путем сравнительного анализа с результатами решения частных задач определены минимальные значения параметров конечноэлементной модели, при которых достигается требуемая инженерная точность и достоверность решения.

В качестве расчетной модели конструктивных элементов, выполненных в виде сварных листовых или прокатных с параллельными гранями полок, сплошностенчатых и с перфорированной стенкой двутавров обоснованы вместо объемной геометрической модели по каждому подэлементу их срединные поверхности с дискретизацией двумерными конечными элементами оболочки SHELL43, а для конструктивных элементов типа двутавров с полками, имеющими уклон, обоснована объемная геометрическая модель с дискретизацией трехмерными конечными элементами SOLID45.

При рассмотрении работы тонкостенных стержней согласно теории В. З. Власова помимо граничных условий, соответствующих изгибным формам потери устойчивости $\mu=1$, необходимо учитывать граничные условия, соответствующие крутильной форме потери устойчивости.

Конструктивное решение узлов сопряжения сжатых стоек и колонн с фундаментом и стропильными конструкциями дает возможность пренебречь закручиванием торцевых сечений, а плиты, приваренные по концам элементов (база колонны и оголовки), обеспечивают стеснение деформаций торцевых сечений, что позволяет принимать коэффициент условий закрепления при крутильной форме потери устойчивости $k=0,5$.

Для реализации стеснения деформаций торцевых сечений конечноэлементных моделей предлагается использовать оформление торца, представленное на рисунке 1. Оно заключается в соединении каждого узла торцевого сечения с узлом А при помощи балочных элементов BEAM4 большой жест-

кости (0,2x0,2 м). Такое оформление торца позволяет прикладывать сосредоточенные силы и связи, а также исключить погрешности при проведении нелинейных расчетов.

Вдоль стенки торцевого сечения прикладываются связи, не позволяющие ему перемещаться параллельно полкам. В зависимости от центрального или внецентренного сжатия запрещающая перемещение вдоль стенки связь находится в центре тяжести сечения или эксцентрично вдоль стенки.

Связь, препятствующая вертикальному перемещению нижнего торцевого сечения, прикладывается в том же узле, в котором приложена связь, запрещающая перемещение вдоль стенки. Такая реализация граничных условий приводит к отсутствию закручивания торцевых сечений вокруг продольной оси стойки, а также моделирует работу сферического шарнира.

При проведении анализа по линейной теории устойчивости упругих тел и в геометрически нелинейной постановке используются физические зависимости линейной теории упругости. Расчет прочности возможен с учетом физической нелинейности с описанием поведения материала по Хуберу – Мизесу. В ПК использована полилинейная диаграмма работы стали для задания криволинейного участка, а на прямолинейном участке она подобна идеальной Прандтля.

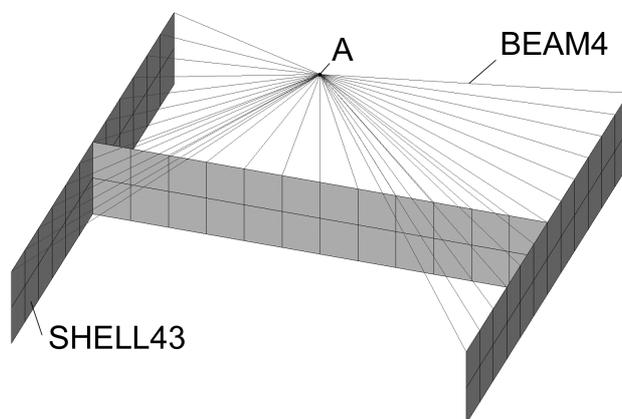


Рисунок 1. Оформление торцов конечноэлементных моделей

Анализ устойчивости конструкций с учетом обеих нелинейностей, а также начального искривления стоек производится в два этапа:

- сначала путем линейного статического расчета получаем начальное искривление модели в виде дуги окружности или синусоиды со стрелкой прогиба f ;

- далее, прикладывая нагрузку большую, чем критическая при центральном сжатии, проводим нелинейный расчет.

При расчете критических сил в программном комплексе момент потери устойчивости фиксировался остановкой расчета. При этом касательная матрица жесткости была сингулярна. За силу, соответствующую критической, принималось значение на предпоследнем шаге загрузки (в этот момент касательная матрица жесткости $[K_T]$ была положительно определена).

В связи с тем, что геометрически нелинейный расчет дает незначительное уточнение критической силы по сравнению с анализом по линейной теории, в дальнейшем проводится только анализ по линейной теории, требующий значительно меньше времени.

В практике конечноэлементного моделирования часто используется последовательность решений на сгущающихся сетках. Установленный факт незначительного изменения результатов расчета при уменьшении размеров конечных элементов свидетельствует о достижении практической сходимости при заданных исходных данных. Для обоснования конечноэлементной модели и ее параметров и подтверждения достоверности результатов конечноэлементного расчета выполнены численные эксперименты с сопоставлением их результатов с результатами расчетов по линейной теории пространственной устойчивости В. З. Власова, по методикам СНиП II-23-81* и СП 53-102-2004, а также с экспериментальными данными Г. М. Чувикина, М. М. Копытова, А. И. Скляднева и Т. М. Рогатовских.

Для сопоставления по теории В. З. Власова предварительно автором получены формулы для критических сил симметричных сечений.

При центральном приложении нагрузки получаем три критические силы:

$$P_x = \frac{\pi^2 EJ_x}{(\mu L)^2}; P_z = \frac{\pi^2 EJ_z}{(\mu L)^2}; P_\omega = \frac{1}{r^2} \left(\frac{\pi^2 EJ_\omega}{(kL)^2} + GJ_k \right). \quad (1)$$

При внецентренном приложении сжимающей силы в плоскости стенки получаем две критические силы:

$$P_z = \frac{\pi^2 EJ_z}{(\mu L)^2}; P_{\omega 1} = \frac{(P_\omega + P_x) - \sqrt{P_\omega^2 + P_x^2 + 2P_\omega P_x (2e_x^2/r^2 - 1)}}{2(1 - e_x^2/r^2)}, \quad (2)$$

где $r^2 = (J_x + J_z)/A$; P_x и P_ω принимаем из формулы (1).

Рассматривается стальная стойка длиной 5 м из двутавра 20К2 (ГОСТ

26020-83) при центральном и внецентренном сжатии с гибкостями в двух плоскостях $\lambda_x = 97,47$ и $\lambda_z = 58,07$.

При линейном анализе потери устойчивости расчетных моделей из оболочечных конечных элементов в упругой стадии работы произведена оценка сходимости критических сил для различных форм потери устойчивости на сетках различной густоты. Задаем четное количество конечных элементов по ширине полки n_1 (4, 8, 12 или 16), что соответствует ширине конечного элемента вдоль полки двутавра: $a = b_f/n_1$. Соотношение длины конечного элемента вдоль оси стойки b принято: $b = 8a; 4a; 2a; a$. Тогда количество конечных элементов вдоль стенки и оси стойки представлено в виде: $n_2 = (h_w + t_f)/a$; $n_3 = L/b$.

При сопоставлении результатов, полученных на сетках различной густоты, выявлено, что практическая сходимость для изгибных форм потери устойчивости достигается даже на сетках с крупным разбиением. Для крутильных и изгибно-крутильных форм потери устойчивости практическая сходимость достигается при $n_1 = 12$ конечным элементам, а $b = 4a$ или $2a$.

Анализ полученных величин показывает, что разница между критическими силами, полученными по формулам (1), (2) и численно на оболочечных моделях при $n_1 = 12$ конечным элементам и $b = 2a$, не превышает 4,3 %.

Исследована задача устойчивости центрально- и внецентренно-сжатых стальных стоек из прокатного двутавра №14 (ОСТ 10016-39), испытанных Г. М. Чувикиным. Результаты сопоставлены также с решениями по СНиП II-23-81* и СП 53-102-2004.

В эксперименте исследовалась изгибная форма потери устойчивости центрально-сжатых стоек из плоскости стенки с длинами 0,855; 1,724 и 2,59 м. Экспериментальные и численные результаты при величине стрелки начального искривления от $L/1300$ до $L/3900$ удовлетворительно совпадают, значения критических сил отличаются не более 4 % при гибкостях из плоскости стенки 48,69 и 98,18; несколько большая разница при гибкости 147,49 – 8,9 %. Разница между значениями критических сил, найденных численно и по СНиП II-23-81*, и по СП 53-102-2004 при $f = L/750 + i/20$, составляет от 2,1 до 6,4 %.

Для изгибных форм потери устойчивости в плоскости наибольшей жесткости при центральном и внецентренном сжатии производилось сравнение значений критических сил, рассчитанных численно, а также по СНиП II-23-

81* и СП 53-102-2004. При внецентренном сжатии нагрузка прикладывалась с относительными эксцентриситетами $m_x = 1$ и 2. При расчете стоек на центральное сжатие $f = L/750 + i/20$, а на внецентренное – f не учитывалось. Разница между значениями критических сил, определенными численно и по СНиП II-23-81*, находится в диапазоне от 0,9 до 4,3 %, а по СП 53-102-2004 – в диапазоне от 0,9 до 5,6 %.

При расчете стойки длиной 5 м из двутавра 20К2 на центральное и внецентренное сжатие выявлено, что разница между значениями критических сил, найденными численно и по методике СНиП II-23-81*, не превышает 3,4 %, а по СП 53-102-2004 – 5,5 %.

Наряду с испытаниями стоек на центральное сжатие Г. М. Чувикин испытывал стойки на внецентренное сжатие. При этом стойки теряли устойчивость по изгибно-крутильной форме. Расхождение значений критических сил, найденных численно и экспериментально при величине стрелки начального искривления из плоскости стенки от $L/1300$ до $L/3900$, не превышает 4,4 %.

Выполнено сопоставление значений критических сил, найденных численно, по СНиП II-23-81*, по СП 53-102-2004 при $f = L/750 + i/20$.

Изгибно-крутильная форма потери устойчивости и эквивалентные напряжения по Мизесу (Па) для стойки длиной 0,855 м при $m_x = 2$ показаны на рисунке 2.

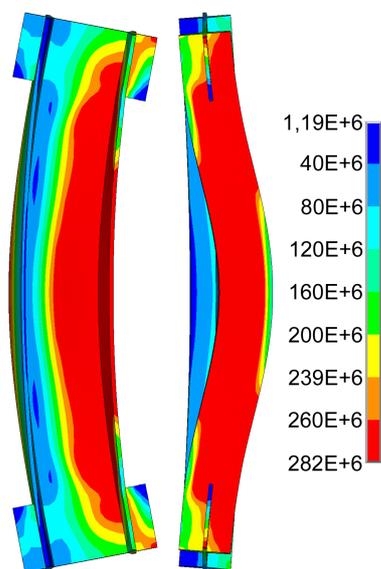


Рисунок 2. Форма потери устойчивости стойки

рисунке 2.

Определение критической силы, соответствующей изгибно-крутильным формам потери устойчивости по СНиП II-23-81* и СП 53-102-2004, выполняем по формуле

$$N = c \cdot \varphi_x \cdot A \cdot \sigma_m; \quad (3)$$

при этом коэффициент c по СНиП II-23-81*

$$c = \beta / (1 + \alpha \cdot m_x), \quad (4)$$

по СП 53-102-2004

$$c = \beta / (1 + \alpha \cdot v \cdot m_x). \quad (5)$$

Отличие величин критических сил, полученных численно и по СНиП II-23-81*, составляет от 7,6 до 34 %. Разница между значениями критических сил, найденными численно и по СП 53-102-2004, составляет от 0,3 до 3,4 %. Значения критических сил, найденных по СП 53-102-2004,

выше, чем по СНиП II-23-81*, за счет введения в формулу (5) коэффициента v , увеличивающего коэффициент c .

Произведено сравнение результатов численного анализа и экспериментальных данных, полученных М. М. Копытовым, для перфорированных пластин при центральном и внецентренном растяжении. Из сопоставления траекторий главных напряжений в векторном виде, полученных численно, и полей изостат, полученных экспериментально, а также значений и характера эпюр относительных продольных напряжений следует, что они удовлетворительно совпадают.

Сопоставительному анализу подверглись результаты экспериментальных исследований М. М. Копытова и численные исследования внецентренно-сжатых стальных стоек коробчатого сечения, составленных из четырех листов толщиной 4,1 мм при помощи сварки. Были рассмотрены стержни длиной 1780 и 3550 мм при двух вариантах овальных отверстий. Относительные эксцентриситеты приложения сжимающей силы в плоскости, параллельной перфорированным пластинам, составляли $m = 0,27, 0,54$ и $1,08$.

Для неотожженных стержней разница между величинами критических сил, полученными численно и экспериментально, составляет от 21,2 до 23,4 %, а для отоженного стержня – 12,6 %. При численных расчетах не учитывалось влияние сварочных деформаций.

Для оценки влияния формы и размеров отверстий перфорации на изгибную форму потери устойчивости в плоскости стенки рассмотрены стойки с одинаковой высотой сечения, полученные разрезкой исходного двутавра (14С ГОСТ 19425-74*) с различным очертанием линий реза (рисунок 3). Длины двутавровых элементов – 0,855, 1,724 и 2,59 м, эксцентриситеты приложения нагрузки в плоскости стенки – 4,73 и 9,46 см, начальное искривление стоек в плоскости стенки принято равным $f = L/750$.

Полуволна синусоиды рассчитывалась из следующего уравнения:

$$y = 0,25 \cdot h_0 \cdot \sin\left(\pi\left(\frac{3}{2} + \frac{x}{b}\right)\right) + 0,25 \cdot h_0, \quad (6)$$

где $b = (a_0 - w)/2$; $x \in [3\pi/2; 5\pi/2]$.

Количество отверстий в перфорированных элементах с шестиугольными, синусоидальными и овальными отверстиями равно двум для стоек длиной 0,855 м, пяти – 1,724 м и восьми – 2,59 м. В перфорированных элементах с круглыми отверстиями эти соотношения равны четырем для стоек длиной

0,855 м, восьми – 1,724 м и тринадцати – 2,59 м.

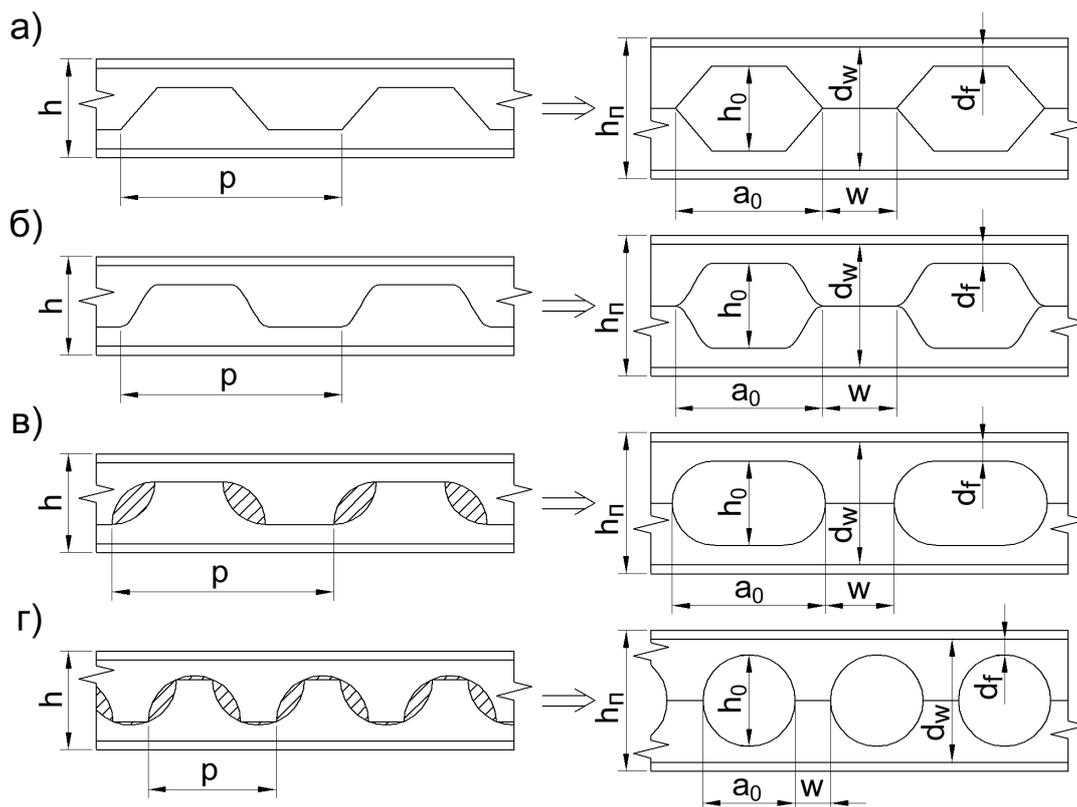


Рисунок 3. Разрезка исходного двутавра и полученные перфорированные элементы: а – с шестиугольными отверстиями ($h_0 \leq 0,75d_w$); б – с синусоидальными отверстиями ($h_0 \leq 0,75d_w$); в – с овальными отверстиями ($h_0 \leq 0,75d_w$); г – с круглыми отверстиями ($h_0 \leq 0,8d_w$)

Ограничения по другим параметрам: $d_f \geq 0,1d_w$; $0,25a_0 \leq w \leq 0,50a_0$

Значения геометрических характеристик реза и параметров перфорированных элементов (рисунок 3) сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Форма отверстий перфорации	h, мм	h _п , мм	p, мм	h ₀ , мм	a ₀ , мм	w, мм	d _w , мм	d _f , мм
Шестиугольные	140	200	312	120	208	104	174,	27,333
Синусоидальные					216	96		
Овальные								
Круглые					180	130		

Не вошедшие в таблицу 1 геометрические размеры сечений (рисунок 4) следующие: $b_f = 8$ см, $s = 0,6$ см, $t_f = 1,2667$ см, $t_w = 0,55$ см.

Относительные эксцентриситеты приложения нагрузки для стоек с круглыми отверстиями $m_{x,p} = 0,55$ и $1,1$; для остальных $m_{x,p} = 0,56$ и $1,12$. Гиб-

кости стоек с шестиугольными, синусоидальными и овальными отверстиями в плоскости стенки равны 9,3; 18,75; 28,17, а из плоскости стенки – 44,83; 90,4; 135,82. При круглых отверстиях эти величины, соответственно, 9,22; 18,6; 27,94 и 44,16; 89,05; 133,78.

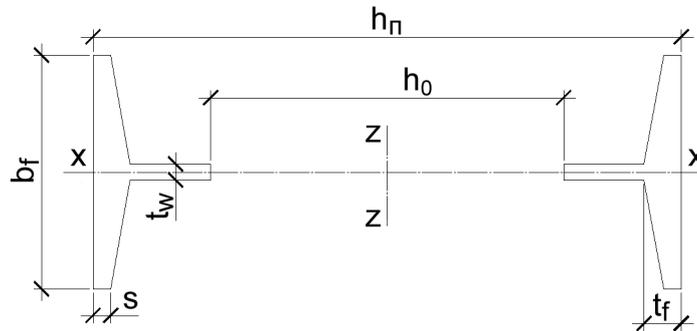


Рисунок 4. Сечение перфорированного элемента по центру отверстия

Изгибная форма потери устойчивости в плоскости стенки перфорированных стоек длиной 0,855 м при $m_{x,p} = 1,12 / 1,1$, а также эквивалентные напряжения по Мизесу (Па) показаны на рисунке 5.

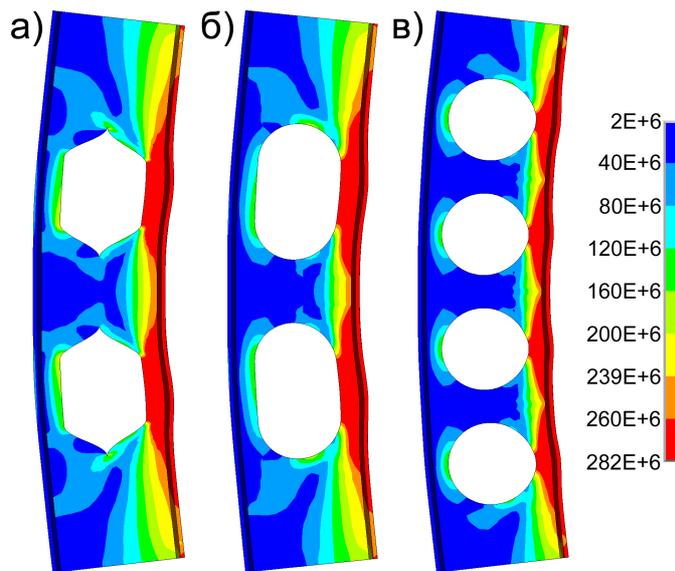


Рисунок 5. Изгибная форма потери устойчивости

Из сравнения изополей эквивалентных напряжений по Мизесу (рисунки 5) можно сделать вывод, что проникновение пластических деформаций вглубь сечения стенки сдерживается прямыми участками синусоидальных и овальных отверстий. При круглых отверстиях таким участком является дуга, имеющая небольшую протяженность.

Разница между значениями критических сил, соответствующими элементам с шестиугольными, синусоидальными и овальными отверстиями, не превышает 1 %, а для элементов с круглыми отверстиями – 3 %.

Разница между величинами критических сил, соответствующими изгибной форме потери устойчивости, в перфорированном и исходном элементах при $m_{x,p} = 0,56$ и $m_x = 1$ достигает 4,6÷10 %, а при $m_{x,p} = 1,12$ и $m_x = 2$ –

6,3÷17 %.

Выполнен также сопоставительный анализ численных результатов с экспериментальными данными, полученными А. И. Складневым и Т. М. Рогатовских. В эксперименте исследовалась прочность внецентренно-сжатых шарнирно-опертых в плоскости стенки стальных стоек двутаврового сечения с перфорированной стенкой, полученных из прокатного двутавра 14Б1 (ГОСТ 26020-83). Все образцы имели три отверстия в стенке. К опорным пластинам крепились стальные траверсы коробчатого сечения, высоты которых были равны приблизительно 160 мм. Длины образцов с учетом траверс составляли 1300 мм. Геометрические характеристики реза, величины эксцентриситетов и гибкости в плоскости стенки приведены в таблице 2.

Таблица 2

Наименование образца	h, мм	h _п , мм	p, мм	h ₀ , мм	a ₀ , мм	w, мм	d _w , мм	d _f , мм	e _x , см	m _{x,p}	λ _{z,p}
Б1	137,4	204	274	134	184	90	192,8	29,4	50	5,56	13,57
Б2		214	236	154	146	90	202,8	24,4	15	1,55	12,77
Б3		194	296	114	181	115	182,8	34,4	30	3,58	14,43

Материал стоек – сталь марки СтЗпс с пределом текучести 315 МПа.

По численным расчетам при потере устойчивости в плоскости наибольшей жесткости пластические деформации образуются только в сжатой полке и примыкающей стенке, а при достижении предела прочности – либо в обеих полках и стенках (стойки Б1 и Б2) при эксцентриситетах $m_{x,p} = 5,56$ и $3,58$, либо в сжатой полке и стенках (стойка Б3) при $m_{x,p} = 1,55$. При достижении предела прочности напряжения в растянутых полках имеют положительные значения, а в примыкающих к ним стенках – отрицательные значения. Поперечные и касательные напряжения в предельном состоянии при расчетах на устойчивость и прочность значительно ниже продольных нормальных напряжений.

Разница между предельными нагрузками, полученными экспериментально и при расчете на прочность, достигает значений от 4,6 до 15,4 %, а при расчете на устойчивость – от 8,9 до 18,2 %. При этом значения экспериментальных нагрузок были выше численных. Подобные количественные расхождения экспериментальных данных и численных с реализацией по программе «Ли́ра» отмечены Т. М. Рогатовских и объясняются принятыми допущениями, в том числе использованием диаграммы Прандтля при расчете

МКЭ.

Разница между значениями предельных нагрузок, найденных при расчетах на прочность и устойчивость при $\lambda_{z,p}$ менее 13,6, не превышает 3 %, а при $\lambda_{z,p} = 14,43$ равна 4,1 %. Из чего можно сделать вывод о том, что при $\lambda_{z,p}$ менее 13,6 для определения предельной нагрузки можно производить только расчет на прочность.

Для определения диапазона гибкостей внецентренно-сжатых перфорированных двутавровых стоек, в пределах которых можно производить только расчет на прочность, рассматривались перфорированные элементы с шестиугольными отверстиями в стенке (см. рисунок 3) с геометрическими характеристиками реза (см. таблицу 1).

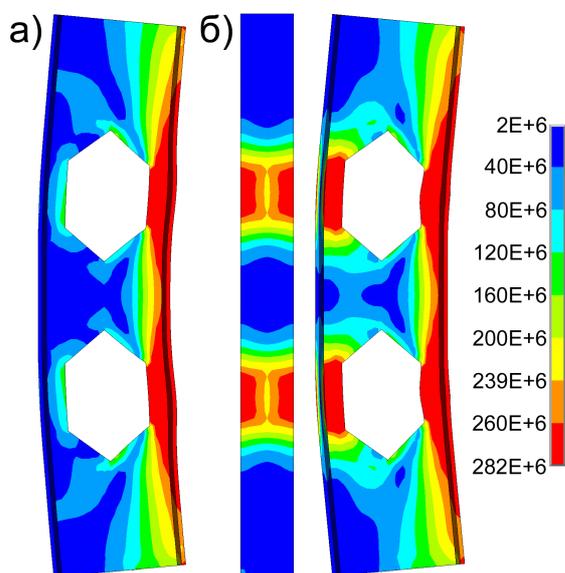


Рисунок 6. Перфорированная стойка

Изгибная форма потери устойчивости и предел прочности при изгибе в плоскости стенки перфорированной стойки с гибкостью в плоскости стенки $\lambda_{z,p} = 9,3$ при $m_{x,p} = 1,12$, а также эквивалентные напряжения по Мизесу (Па), показаны на рисунке 6. Изгибная форма потери устойчивости показана на рисунке 6, а. Предел прочности при изгибе изображен на рисунке 6, б (наименее сжатая полка и стенка).

Из сравнения предельных нагрузок следует, что для перфорированной стойки с гибкостью менее 9,3 разница между значениями критической и соответствующей пределу прочности нагрузками составляет $2,5 \div 3,5$ %, что позволяет производить расчет только на прочность. При гибкости стоек более 18,75 разница между величинами этих нагрузок составляет более 5,5 %, что обуславливает необходимость расчета на устойчивость.

В третьей главе рассмотрена изгибно-крутильная форма потери устойчивости внецентренно-сжатых двутавровых стоек с перфорированной стенкой, полученных разрезкой исходного прокатного двутавра (14С ГОСТ 19425-74*) по линиям реза с различным очертанием (см. рисунок 3) и геометрическими характеристиками реза (см. таблицу 1).

Изгибно-крутильная форма потери устойчивости перфорированных стоек длиной 0,855 м при $m_{x,p} = 1,12 / 1,1$, а также эквивалентные напряжения по Мизесу (Па) показаны на рисунке 7. Из анализа изополей напряжений следует, что проникновение пластических деформаций вглубь сечения стенки сдерживается отверстиями перфорации при длинах стоек 0,855 и 1,724 м. В стойках длиной 2,59 м перфорированная стенка работает упруго. Распределение напряжений в наиболее сжатой полке неравномерно, что связано с влиянием отверстий перфорации. Так в стойках длиной 0,855 м почти во всем сечении наиболее сжатой полки напряжения превышают предел пропорциональности, в стойках длиной 1,724 м более половины сечения работает неупруго, а в стойках длиной 2,59 м в неупругой стадии работает менее 30 %.

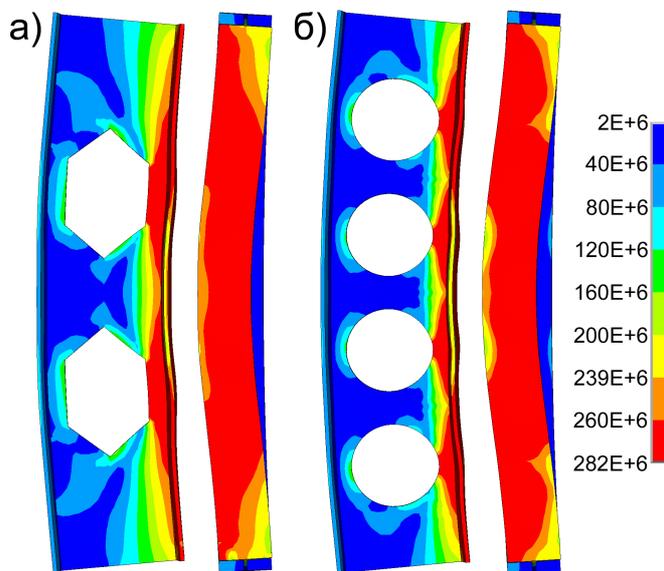


Рисунок 7. Перфорированные стойки:
а – с шестиугольными отверстиями;
б – с круглыми отверстиями

Из сопоставления значений критических сил, соответствующих изгибно-крутильной форме потери устойчивости, следует, что разница между величинами критических сил, соответствующими элементам с шестиугольными, синусоидальными и овальными отверстиями, не превышает 1,7 %, а при сравнении со значениями критических сил, соответствующими элементам с круглыми отверстиями, – 4 %. Разница между значениями критических сил, соответствующими изгибно-крутильной форме потери устойчивости, в перфорированном элементе с шестиугольными отверстиями и исходном соответственно при $m_{x,p} = 0,56$ и $m_x = 1$ достигает 2,5÷5 %, а при $m_{x,p} = 1,12$ и $m_x = 2$ составляет 7÷12 %.

При анализе влияния поперечной связи на изгибно-крутильную форму потери устойчивости начальное искривление стоек принималось по дуге окружности (рисунок 8, а) или синусоиде (рисунок 8, б). При сравнении критических сил, соответствующих изгибной и изгибно-крутильной формам потери устойчивости стоек, можно сделать вывод, что постановка промежуточно-

го закрепления в стойках длиной 0,855 м не требуется. Изгибно-крутильная форма потери устойчивости перфорированной стойки длиной 1,724 м при $m_{x,p} = 1,12$, а также эквивалентные напряжения по Мизесу (Па) показаны на рисунке 9.

Из сопоставления критических сил, соответствующих изгибно-крутильной форме потери устойчивости при постановке промежуточного закрепления из плоскости стенки, следует, что разница между значениями критических сил, соответствующими элементам с шестиугольными, синусоидальными и овальными отверстиями, не превышает 1 %, а для элементов с круглыми отверстиями – 2,7 %. Сравнение критических сил элементов с шестиугольными отверстиями, соответствующих изгибно-крутильной форме потери устойчивости с промежуточным закреплением, с критическими силами, соответствующими изгибно-крутильной форме потери устойчивости без промежуточного закрепления, выявило, что при $L = 1,724$ м и $e_x = 4,73$ см разница достигает 26÷31 %, а при $e_x = 9,46$ см она 18÷22 %; при длине $L = 2,59$ м и $e_x = 4,73$ см разница достигает 87÷107 %, а при $e_x = 9,46$ см она 61÷76 %.

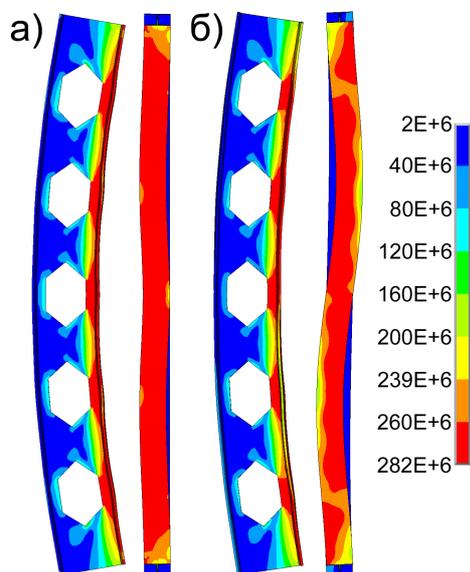


Рисунок 9. Формы потери устойчивости стойки

элементу сплошностенчатый сечением. При этом рассматривались способы замены, предложенные А. А. Юрченко и автором диссертации.

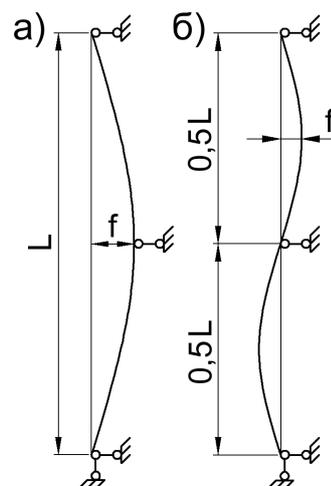


Рисунок 8. Начальные искривления стоек:
а – в виде дуги окружности; б – в виде синусоиды

Сравнение критических сил, соответствующих изгибно-крутильной форме потери устойчивости исходных и перфорированных элементов с шестиугольными отверстиями при постановке промежуточного закрепления, показало, что при $m_{x,p} = 0,56$ и $m_x = 1$ разница достигает 4,5÷8,9 %, а при $m_{x,p} = 1,12$ и $m_x = 2$ она составляет 11,8÷17,5 %.

Рассмотрены различные способы замены участка в сечении перфорированного

А.А. Юрченко был предложен способ замены участка сечения перфорированного элемента, в котором находится отверстие, на сплошной с приведенной толщиной (рисунок 10, а)

$$t'_w = (L - p \cdot n/2) \cdot t_w / L, \quad (7)$$

где L – длина элемента; n – количество отверстий в элементе; t_w – толщина стенки исходного элемента.

Автором диссертации предложен способ замены перфорированной стенки на сплошнотенчатую с приведенной толщиной (рисунок 10, б), рассчитываемой из равенства моментов инерции стенок

$$J_{x, \text{перф}} = J_{x, \text{спл}}; \quad J_{x, \text{перф}} = \frac{d_w \cdot (t_w)^3}{12} - \frac{h_0 \cdot (t_w)^3}{12};$$

$$J_{x, \text{спл}} = \frac{d_w \cdot (t_w'')^3}{12}; \quad t_w'' = \sqrt[3]{\frac{(d_w - h_0) \cdot (t_w)^3}{d_w}}. \quad (8)$$

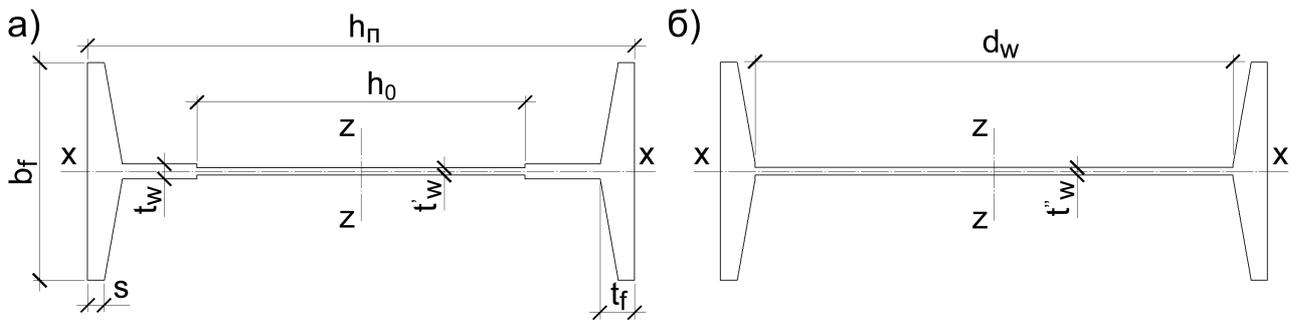


Рисунок 10. Поперечные сечения элементов: а – с приведенной толщиной стенки, вычисленной по формуле (7); б – с приведенной толщиной стенки, определенной по формуле (8)

Способы приведения рассмотрены на основе перфорированных элементов с шестиугольными отверстиями.

Разница между значениями критических сил, соответствующими изгибно-крутильной форме потери устойчивости, в элементе с приведенным сечением, вычисленным по формуле (7) и в перфорированном при $L = 0,855$ м достигает $14,8 \div 15,6$ %, при $L = 1,724$ м она $4,8 \div 5,4$ %, а при $L = 2,59$ м – $0,7 \div 0,9$ %. Разница между значениями критических сил, соответствующими изгибной в плоскости стенки форме потери устойчивости, в элементе с приведенным сечением и перфорированном при $L = 0,855$ м достигает $23 \div 24,4$ %, при $L = 1,724$ м – $16,6 \div 17,8$ %, а при $L = 2,59$ м – $14,4 \div 15,4$ %; при изгибно-крутильной форме потери устойчивости с промежуточным закреплением эта разница при $L = 1,724$ м – $12 \div 15,4$ %, а при $L = 2,59$ м –

7,6÷12,1 %.

Несколько меньшая разница между критическими силами получается при использовании элементов с приведенным сечением, определенным по формуле (8), особенно при рассмотрении изгибно-крутильной формы потери устойчивости, так как она при длине $L = 1,724$ м достигает 4 %, а при $L = 2,59$ м – 0,4-0,44 %.

В четвертой главе изложена инженерная методика расчета критической силы при изгибно-крутильной форме потери устойчивости внецентренно-сжатых симметричных моностабильных двутавровых перфорированных шарнирно-опертых в двух плоскостях стоек, закручивание и депланации торцевых сечений которых отсутствуют.

Методика основывается на предположении, что внецентренно-сжатая стальная двутавровая стойка с перфорированной стенкой теряет устойчивость по изгибно-крутильной форме в момент потери устойчивости наиболее сжатой полки с примыкающей частью стенки по изгибной форме из плоскости стенки.

В качестве расчетной модели принят центрально-сжатый стержень таврового сечения, расчетную длину которого находим из анализа кривой перемещений наиболее сжатой полки перфорированного двутавра.

Для описания кривой перемещений используется аппроксимирующая функция в виде синусоиды, расстояние между точками перегиба которой будет являться расчетной длиной наиболее сжатой полки:

$$z = A \cdot \sin(\pi(y - C)/B) + D, \quad (9)$$

где A, B, C, D – постоянные, зависящие от задаваемых точек пересечения синусоиды и кривой перемещений (рисунок 11).

Значения коэффициентов расчетной длины при величине начального несовершенства $f = L/750 + i/20$, найденных для элементов с шестиугольными и круглыми отверстиями перфорации при различных относительных эксцентриситетах приложения нагрузки, приведены в таблице 3.

Таким же образом можно получить коэффициенты расчетной длины при других гибкостях и относительных эксцентриситетах приложения нагрузки.

В общем случае проектирование и расчет внецентренно-сжатых перфорированных двутавровых стоек на устойчивость по изгибно-крутильной форме предполагает выполнение последовательности, представленной в виде блок-схемы (рисунок 12).

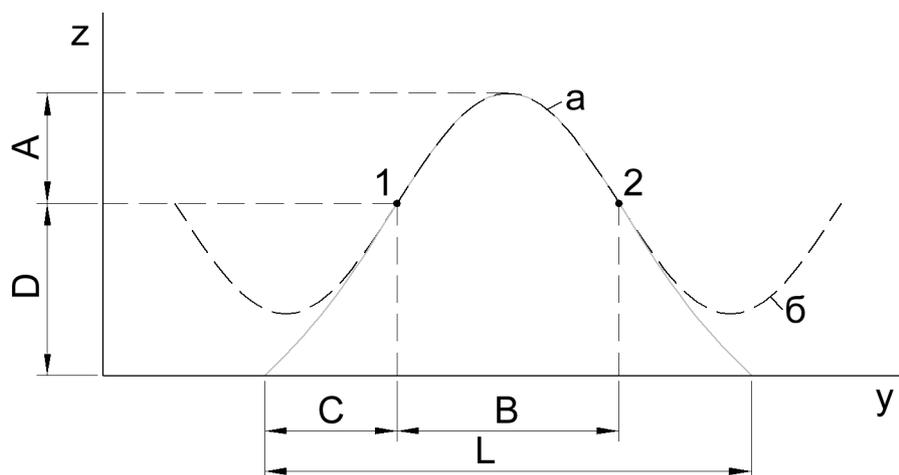


Рисунок 11. Аппроксимация графика перемещений при помощи синусоиды (а – график перемещений наиболее сжатой полки в плоскости наименьшей жесткости перфорированного элемента; б – аппроксимирующая функция (9); 1 и 2 – задаваемые точки пересечения графиков)

Таблица 3

Форма отверстий перфорации	$\lambda_{x,p}$	$m_{x,p} = 0,56$	$m_{x,p} = 1,12$	$2 \leq m_{x,p} \leq 7$	$8 \leq m_{x,p} \leq 10$
Шестиугольные	44,83	0,5839	0,5352	0,4865	0,5109
	$\lambda_{x,p}$	$m_{x,p} = 0,56$	$m_{x,p} = 1,12$	$2 \leq m_{x,p} \leq 10$	
Круглые	44,16	0,5965	0,5497	0,5263	

В качестве примера рассмотрена перфорированная стойка длиной 5,5 м с восемью круглыми отверстиями диаметром 440 мм, полученная из прокатного двутавра 40К2 (ГОСТ 26020-83). Характеристики реза приняты по рисунку 3. Высота сечения перфорированной стойки в 1,5 раза больше чем у исходного прокатного двутавра; гибкость в плоскости стенки $\lambda_{z,p} = 19,18$, а из плоскости стенки $\lambda_{x,p} = 49,91$; материал стойки – сталь С245.

Одновременно был проведен численный расчет изгибно-крутильной формы потери устойчивости. Сравнение результатов расчетов показало, что разница не превышает 3,4 %.

В приложении диссертационной работы приведены иллюстрации изгибно-крутильной формы потери устойчивости стоек с шестиугольными и круглыми отверстиями, графики сопоставления аппроксимирующих функций с кривыми перемещений наиболее сжатых полок, таблицы значений постоянных из формулы (9) и коэффициенты расчетных длин при различных относительных эксцентриситетах приложения нагрузки, а также акт о внедрении.

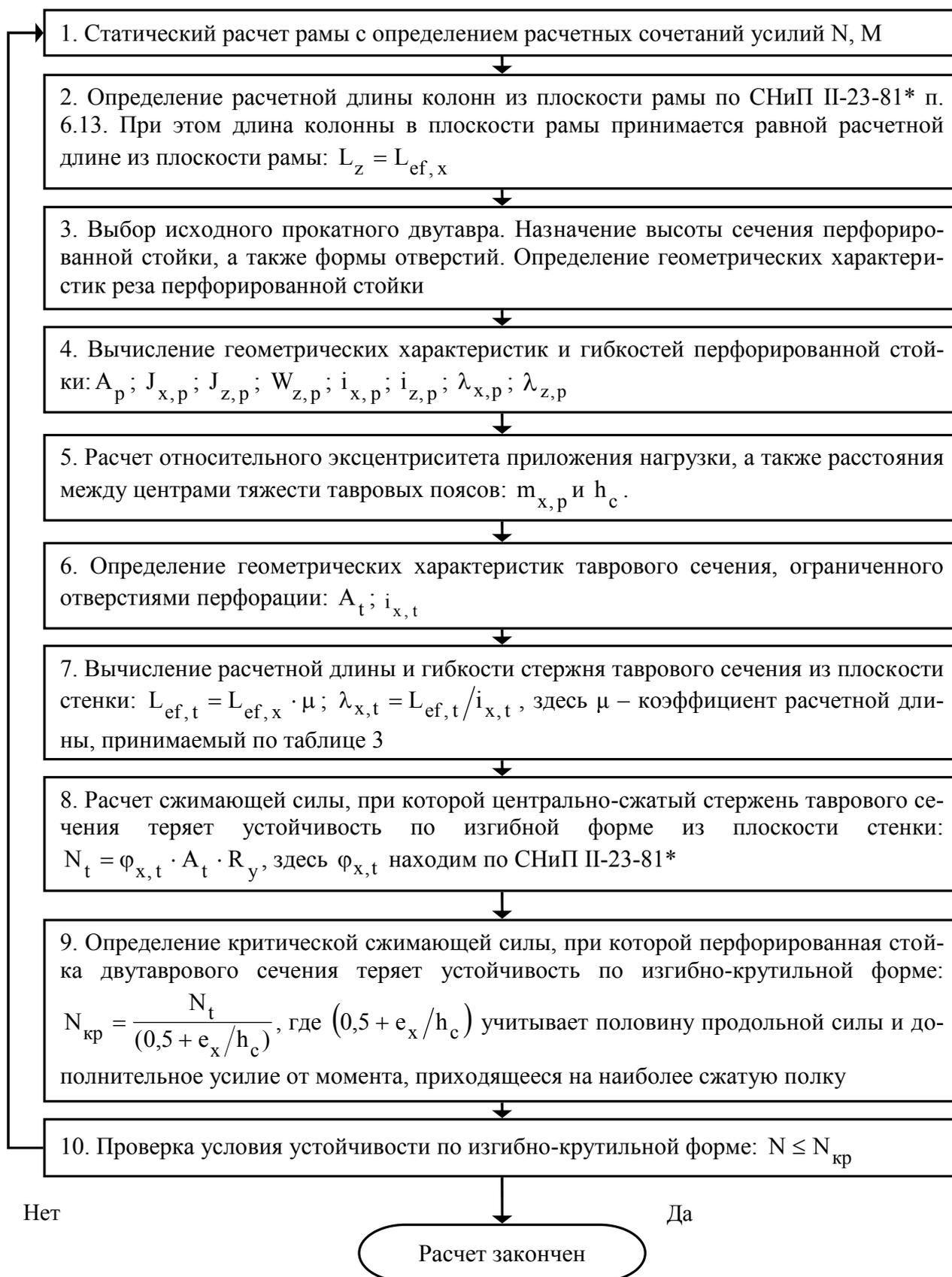


Рисунок 12. Блок-схема проектирования и расчета внецентренно-сжатых перфорированных двутавровых стоек на устойчивость по изгибно-крутильной форме

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИИ

1. Обоснованы конечноэлементные модели и их параметры.
2. Впервые решена задача об изгибно-крутильной форме потери устойчивости внецентренно-сжатых перфорированных элементов с учетом реальной геометрии реза отверстий, а также при постановке промежуточной связи из плоскости стенки. Наличие промежуточной связи из плоскости стенки по середине длины перфорированных элементов приводит к изменению изгибно-крутильной формы и повышает устойчивость от 18 до 107 %. Причем с увеличением эксцентриситета эффективность снижается, а при увеличении расчетной длины – увеличивается.
3. При сравнении критических нагрузок в перфорированных стержнях с различной формой перфорации (шестиугольные, синусоидальные, овальные, круглые), получаемых из одного исходного профиля и имеющих одинаковую высоту сечений, выявлено, что при малых эксцентриситетах приложения нагрузки влияние формы отверстий перфорации не превышает 1 % для шестиугольных, синусоидальных, овальных отверстий и 4 % в сравнении с круглыми отверстиями.
4. В задачах линейной устойчивости практическая сходимость МКЭ для изгибных форм потери устойчивости достигается при разбиении всех подобластей на квадратные элементы шириной не менее одной четверти ширины полки. Для крутильных и изгибно-крутильных форм потери устойчивости практическая сходимость достигается при разбиении полок по ширине на двенадцать конечных элементов.
5. Отличие значений критических сил, найденных численно и по линейной теории пространственной устойчивости тонкостенных стержней В. З. Власова, не превышает 4,3 %.
6. Значения критических сил для изгибной формы потери устойчивости из плоскости стенки центрально-сжатых стоек, полученные экспериментально Г.М. Чувикиным и численно, отличаются не более 4 % при гибкостях из плоскости стенки 48,69 и 98,18, и 8,9 % при гибкости 147,49. Разница между значениями критических сил, найденных численно и по методикам СНиП II-23-81* и СП 53-102-2004 при $f = L/750 + i/20$, составляет от 2,1 до 6,4 %.
7. Разница между значениями критических сил для изгибных форм потери устойчивости в плоскости наибольшей жесткости при центральном ($f = L/750 + i/20$) и внецентренном сжатии ($f = 0$), полученными численно и по методикам СНиП II-23-81* и СП 53-102-2004, находится в диапазоне от 0,9

до 5,6 %.

8. Сравнительный анализ критических сил, соответствующих изгибно-крутильной форме потери устойчивости сплошностенчатых стоек, полученных экспериментально Г. М. Чувикиным и численно при величине стрелки начального искривления от $L/1300$ до $L/3900$, показал, что разница между ними не превышает 4,4 %. Хорошее соответствие отмечено при сравнении результатов по численным расчетам и по СП 53-102-2004 при $f = L/750 + i/20$.

9. Расчет на прочность внецентренно-сжатых перфорированных элементов при изгибе в плоскости наибольшей жесткости может быть использован как основной при гибкости в плоскости стенки менее 13,6.

10. Использование способа приведенного сплошного сечения вместо перфорированного эффективно при расчете изгибно-крутильной формы потери устойчивости при гибкостях элементов из плоскости стенки более 90.

11. Предложена инженерная методика расчета внецентренно-сжатых стальных двутавровых стоек с перфорированной стенкой при изгибно-крутильной форме потери устойчивости, основанная на синусоидальной аппроксимации кривой перемещений наиболее сжатой полки из плоскости стенки.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. Енджиевский, Л. В. Влияние формы и размеров отверстий перфорации на устойчивость внецентренно-сжатых стальных двутавровых элементов [Текст] / Л. В. Енджиевский, **Е. Ю. Фоменко** // Вестник ТГАСУ. – 2010. – №3. – С. 105–116 (из списка ВАК).

2. Енджиевский, Л. В. Исследование устойчивости внецентренно-сжатых перфорированных стальных элементов [Текст] / Л. В. Енджиевский, **Е. Ю. Фоменко** // Известия вузов. Строительство. – 2009. – №11-12. – С. 87–96 (из списка ВАК).

3. Енджиевский, Л. В. Численные исследования напряженно-деформированного состояния стальных перфорированных стоек при потере устойчивости [Текст] / Л. В. Енджиевский, **Е. Ю. Фоменко** // Вестник отделения строительных наук. – Москва – Орел: РААСН, АСИ ОрелГТУ, 2009. – Вып. 13. – Т. 1. – С.110–115.

4. **Фоменко, Е. Ю.** Конечноэлементный анализ деформирования стальной регулярно перфорированной стойки [Текст] / Е. Ю. Фоменко, Л. В. Енджиевский // Проблемы строительства и архитектуры: сб. материалов XXV регион. науч.-техн. конф. – Красноярск, 2007. – С.63–64.

5. **Фоменко, Е. Ю.** Конечноэлементный анализ влияния формы перфорации на устойчивость стальных двутавровых стоек [Текст] / Е. Ю. Фоменко,

Л. В. Енджиевский // Молодежь и наука: начало XXI века: сб. материалов Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых: в 7 ч. Ч.5. – Красноярск, 2008. – С.11–12.

6. **Фоменко, Е. Ю.** Анализ устойчивости центрально и внецентренно сжатой стальной стойки. Сравнение результатов по нормативным документам и по программному комплексу [Текст] / Е. Ю. Фоменко // Интеллект – 2008: сб. материалов Всерос. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых: в 2 ч. Ч. II. Красноярск, 2008. – С. 241–246.

7. **Фоменко, Е. Ю.** Исследование устойчивости внецентренно-сжатых перфорированных стальных элементов при их работе в составе рамных конструкций [Текст] / Е. Ю. Фоменко // М75 Молодежь и наука: сб. материалов VI-й Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых [Электронный ресурс] / отв. ред. О. А. Краев - Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2011. – С. 1–3.

ФОМЕНКО Евгений Юрьевич

**ИЗГИБНО-КРУТИЛЬНАЯ ФОРМА ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ
ВНЕЦЕНТРЕННО-СЖАТЫХ СТАЛЬНЫХ ДВУТАВРОВЫХ СТОЕК
С ПЕРФОРИРОВАННОЙ СТЕНКОЙ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 21.03.2011

Формат 60x84/16. Уч.-изд. л. 1,3

Тираж 120 экз. Заказ №3587

Отпечатано:

Полиграфический центр Библиотечно-издательского комплекса
Сибирского федерального университета
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82 а