

На правах рукописи



Любавская Ирина Владимировна

**НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ  
РАМНОЙ КОНСТРУКЦИИ  
ИЗ СТАЛЬНЫХ ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ**

Специальность 05.23.01 - Строительные конструкции, здания и сооружения

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Липецк - 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Липецкий государственный технический университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор

**Зверев Виталий Валентинович**

Официальные оппоненты:

**Туснин Александр Романович,**

доктор технических наук, профессор,

Национальный исследовательский

«Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ)

**Скачков Сергей Владимирович,**

кандидат технических наук, доцент,

Федеральное государственное бюджетное

образовательное учреждение высшего

образования «Донской государственный

технический университет» (ФГБОУ ВО ДГТУ)

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский

государственный архитектурно-строительный

университет» (ФГБОУ ВО СПбГАСУ)

Защита состоится «13» ноября 2018 г. в 15.00 часов на заседании диссертационного совета Д 303.020.02, созданного на базе АО НИЦ «Строительство», по адресу: 109428, г. Москва, 2-я Институтская, д. 6, корпус 5 (конференц-зал НИИЖБ им. А.А. Гвоздева).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке по адресу: 109428, г. Москва, 2-я Институтская, д. 6 и на сайте [www.cstroy.ru](http://www.cstroy.ru).

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Шулятьев Станислав Олегович

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность исследования.** Металлопрокат - это основная продукция стабильно функционирующей экономики любой интенсивно развивающейся страны. Несмотря на появление новых видов строительных материалов, в том числе синтетических и композитных, стальной прокат востребован в строительстве. Объем выпуска и применения стальных гнутых профилей постоянно увеличивается, что обусловлено преимуществами этого вида проката.

Несущие и ограждающие конструкции из тонколистовых холодногнутох профилей широко применяются в строительстве и имеют ряд особенностей. Прежде всего, это специфика, сложность и повышенная материалоемкость узловых соединений, чувствительность тонкостенных профилей к местным нагрузкам, а так же значительное влияние начальных несовершенств.

### **Степень разработанности темы исследования.**

Одной из причин, сдерживающих развитие строительства зданий и сооружений различного назначения из легких стальных тонкостенных конструкций (ЛСТК) в России, является недостаточная нормативная база для расчета и проектирования таких конструкций. В мировой практике строительства разработаны нормы и стандарты для проектирования ЛСТК: это европейский стандарт Еврокод3, американский стандарт AISI, австралийские нормы AS, которые учитывают особенности работы холодногнутох профилей из оцинкованной стали в несущих и ограждающих конструкциях зданий различного назначения, но применение этих стандартов на территории Российской Федерации затруднено, так как они не содержат привязки к опыту проектирования и климатическим условиям территории. В Российской Федерации в 2017 году вышла первая редакция СП «Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутох оцинкованных профилей и гофрированных листов». Однако, для использования данного нормативного документа необходимы дополнительные исследования в целях обоснования отдельных положений, разработка программного обеспечения, обучение инженерных кадров. В связи с этим, уточнение инженерной методики

расчета рамных конструкций из холодногнутых парных профилей является актуальной задачей.

**Цель работы** – уточнение инженерной методики расчета рамных конструкций из стальных холодногнутых профилей на основе теоретических и экспериментальных исследований их напряженно-деформированного состояния.

**Задачи исследований:**

- 1) определить область целесообразного применения рамных конструкций из холодногнутых профилей;
- 2) определить условие обеспечения совместной работы парных профилей в составе ригеля рамной конструкции;
- 3) решить задачу устойчивости сжато-изгибаемого стержня переменной жесткости;
- 4) уточнить расчетную схему несущих элементов в составе рамной конструкции;
- 5) уточнить методику расчета рамных конструкций из холодногнутых профилей;
- 6) провести экспериментальные натурные испытания рамной конструкции с целью проверки обоснованности теоретических предпосылок расчета.

**Объект исследования.** Рамная конструкция из тонкостенных холодногнутых профилей.

**Предмет исследования.** Напряженно-деформированное состояние рамной конструкции из стальных гнутых профилей.

**Научная новизна работы:**

1. Получены результаты экспериментальных исследований действительной работы рамных конструкций из стальных гнутых профилей.
2. Установлено, что в местах изменения жесткости происходят значительные деформации элементов.
3. Предложена и обоснована расчетная схема стрижней, работающих в составе рамной конструкции.
4. Решена задача устойчивости сжато-изгибаемого стержня переменной

жесткости.

5. Установлено, что на устойчивость стержня значительное влияние оказывает изменение жесткости тонкостенного несущего профиля.

6. Получены значения коэффициента  $\mu'$ , позволяющего учесть влияние переменной жесткости сжато-изгибаемого стержня на расчетную длину.

7. Установлена зависимость величины критического напряжения от шага соединительных прокладок.

8. Уточнена инженерная методика расчета рамных конструкций из холодногнутых профилей.

#### **Теоретическая значимость работы:**

- установлено, что в местах изменения жесткости сжато-изгибаемого стержня происходят значительные деформации, что существенно влияет на несущую способность стержня;

- получены значения коэффициента  $\mu'$ , позволяющие учесть влияние изменения жесткости сжато-изгибаемого стержня на его расчетную длину при различных схемах закрепления;

- получены зависимости критических напряжений пластинки, подкрепленной ребром от шага расстановки соединительных прокладок.

**Практическая значимость работы** состоит в уточнении методики расчета рамных конструкций из стальных гнутых профилей, учитывающей:

- влияние изменения жесткости на устойчивость стержня;

- изменение шага соединительных прокладок, обеспечивающих совместную работу ветвей в составе ригеля рамной конструкции.

**Методология и методы исследования.** Методологической и теоретической базой для исследования напряженно-деформированного состояния и действительной работы рамных конструкций из холодногнутых парных профилей явились работы ученых в области теории расчета стальных конструкций, проведения испытаний конструкций, математического и численного моделирования. Диссертационная работа выполнена на основании экспериментально-теоретических исследований.

**Личный вклад** автора диссертации заключается в выполнении анализа научно-исследовательских работ в области легких стальных тонкостенных конструкций; уточнении методики расчета рамных конструкций из холодногнутых профилей; составление заключений, определяющих практическую значимость и научную новизну работы; оценке результатов экспериментальных исследований; выполнении численных исследований и анализа их результатов.

**На защиту выносятся:**

1. Результаты натурных экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния элементов рамных конструкций пролетом 18 м из холодногнутых профилей.

2. Результаты исследований стержневых и конечно-элементной моделей рамной конструкции из холодногнутых профилей.

3. Результаты численных исследований устойчивости сжатого и сжато-изгибаемого стержня с различным закреплением концов и критического напряжения пластинки, подкрепленной ребром.

4. Практические рекомендации по проектированию рамных конструкций из стальных гнутых профилей с учетом изменения жесткости по длине составных стержней и обеспечения их совместной работы.

**Степень достоверности полученных результатов** обеспечивается применением классических закономерностей строительной механики в области теории устойчивости и теории пластин и оболочек; использованием апробированных вычислительных комплексов Scad Office и SolidWorks; хорошей сходимостью результатов численных расчетов и экспериментальных данных.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы и полученные результаты доложены на научно-технических конференциях ЛГТУ (Липецк, 2010-2017), на научном семинаре инженерно-строительного факультета ЛГТУ; на научно-технических конференциях различных уровней (Липецк, 2013г.; Белгород, 2014г.; Минск, 2015 г.; Москва, 2015г.; г. Чебоксары, 2017г.), на научном семинаре секции НТС «Металлические конструкции» ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО НИЦ «Строительство» 06 апреля 2016г.

**Внедрение результатов.** Уточненная инженерная методика расчета рамных конструкций из стальных холодногнутых профилей использовалась при проверочных расчетах и проектировании объектов:

- «Комплекс птичников», расположенных в Тульской области, Ясногорском районе, МО Архангельское ООО «Ласар»;
- здания Крольчатника с габаритными размерами 30,6x50 м., расположенного в Липецкой области, Хлевенский район, с. Конь-Колодезь ООО «Промизделия»;
- при расчете и проектировании рамных конструкций ООО «Эксергия-Л».

Основные положения диссертационного исследования внедрены в учебный процесс при чтении курсов лекций и выполнении научно-исследовательских работ обучающихся по направлению подготовки «Строительство» в ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет».

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 16 работ, в том числе три статьи (общим объемом 1,56 печатных листа, из них 1,06 печатного листа выполнено лично автором) опубликованы в научных журналах из перечня ведущих рецензируемых научных изданий, рекомендуемых ВАК РФ. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложений. Объем работы составляет 152 страницы, в том числе 152 страницы машинописного текста, 66 рисунков, 3 таблицы, списка литературы из 125 наименований и 5 приложений.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, изложены цель и задачи работы, установлены объект и предмет исследования, сформулирована научная новизна, практическая и теоретическая значимость работы.

**В первой главе** приведен обзор конструктивных решений рамных конструкций из стальных гнутых профилей и области применения такого вида конструкций. Глава содержит сведения об экспериментально-теоретических исследованиях стальных гнутых профилей и конструкций на их основе.

Изучением действительной работы стальных гнутых профилей занимались многие зарубежные и отечественные ученые (Айрумян Э.Л., Арменский М.Ю., Беляев В.Ф., Белый Г.И., Блейх Ф., Броуде Б.М., Брудка Я., Ведяков И.И., Винтер Дж., Вольмир А.С., Голенко Г.Г., Граф Э.Ф., Зарифьян А.З., Зверев В.В., Карман Т., Каррен К., Кузнецов А.И., Ржаницын А.Р., Скачков С.В., Стрелецкий Н.С., Тришевский И.С., Трофимов В.Н., Туснин А.Р., Одесский П.Д., Шапиро Л.А., Шенли Ф. и другие).

По результатам проведенного анализа печатных работ обоснована актуальность данной работы, поставлены цели и задачи.

**Во второй главе** рассмотрена и решена задача устойчивости сжатого и сжато-изгибаемого стержня переменной жесткости.

Анализ обрушений зданий и сооружений рамного типа на основе тонколистового холодногнутого проката показал, что во многих случаях потеря устойчивости стержней, входящих в состав рамной конструкции, происходит в местах изменения жесткости стержней (постановки фасонки). В связи с этим представляет интерес исследование вопроса влияния изменения жесткости стержней на расчетную длину стержней в составе рамной конструкции.

На рисунке 1 представлен сжато-изогнутый стержень, состоящий из трех частей. Концевые части имеют длины  $l_1$ ,  $l_3$  и жесткость  $EI_1$ , а средняя - длину  $l_2$  и жесткость  $EI_2$ ,

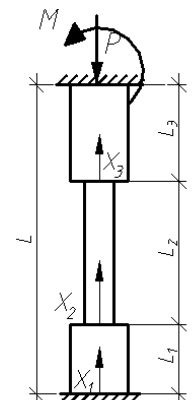


Рисунок 1 - Расчетная схема стержня переменной жесткости, жестко-опертого по концам



причем  $l_2 < l_1$ .

Дифференциальные уравнения изогнутой оси для каждой части с учетом координат  $x_1, x_2, x_3$ , будут иметь вид:

$$\begin{cases} EI_1 \frac{d^2 v_1}{dx_1^2} + P v_1 = -\frac{M}{l_1} x_1, \\ EI_2 \frac{d^2 v_2}{dx_2^2} + P v_2 = -\frac{M}{l_2} x_2, \\ EI_1 \frac{d^2 v_3}{dx_3^2} + P v_3 = -\frac{M}{l_3} x_3. \end{cases} \quad (1)$$

Вводя обозначения  $\frac{P}{EI_1} = k_1^2, \frac{P}{EI_2} = k_2^2, \frac{M}{EI_1} = j_1^2, \frac{M}{EI_2} = j_2^2$ , получим: (2)

$$\begin{cases} v_1 = A \sin k_1 x_1 + B \cos k_1 x_1 - \frac{j_1^2}{k_1^2} \cdot \frac{l - 3x_1}{2 \cdot (l_1 + l_2 + l_3)}, \\ v_2 = C \sin k_2 x_2 + D \cos k_2 x_2 - \frac{j_2^2}{k_2^2} \cdot \left( \frac{l_2 + l_3 - 2l_1}{2 \cdot (l_1 + l_2 + l_3)} + \frac{4l_1 + l_2 - 2l_3}{2 \cdot (l_1 + l_2 + l_3) \cdot l_2} \right), \\ v_3 = F \sin k_1 x_3 + G \cos k_1 x_3 - \frac{j_1^2}{k_1^2} \cdot \frac{(2 \cdot (l_1 + l_2 + l_3) - 3l_3 + 3x_3)}{2 \cdot (l_1 + l_2 + l_3)}. \end{cases} \quad (3)$$

Граничные условия по концам стержня и в точках сопряжения участков:

$$v_1 = 0, \frac{dv_1}{dx_1} = 0 \text{ при } x_1 = 0; \quad \frac{dv_1}{dx_1} = \frac{dv_2}{dx_2} \text{ при } x_1 = l_1 \text{ и } x_2 = 0;$$

$$\frac{dv_2}{dx_2} = \frac{dv_3}{dx_3} \text{ при } x_2 = l_2; \quad v_3 = 0, \frac{dv_3}{dx_3} = 0 \text{ при } x_3 = l_3.$$

В результате учета граничных условий получаем систему линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} B = \frac{j_1^2}{2 \cdot k_1^2}, \\ Ak_1 + \frac{j_1^2}{k_1^2} \cdot \frac{3}{2 \cdot (l_1 + l_2 + l_3)} = 0, \\ A \sin k_1 l_1 + B \cos k_1 l_1 + \frac{l_2 + l_3 - 2l_1}{l_1 + l_2 + l_3} \cdot \left( \frac{j_2^2}{k_2^2} - \frac{j_1^2}{k_1^2} \right) = D, \\ Ak_1 \cos k_1 l_1 - Bk_1 \sin k_1 l_1 + \frac{j_1^2}{k_1^2} \cdot \frac{3}{2 \cdot (l_1 + l_2 + l_3)} = Ck_2 - \frac{j_2^2}{k_2^2} \cdot \frac{4l_1 + l_2 - 2l_3}{2 \cdot (l_1 + l_2 + l_3) \cdot l_3}, \\ Ck_2 \cos k_2 l_2 - Dk_2 \sin k_2 l_2 - \frac{j_2^2}{k_2^2} \cdot \frac{4l_1 + l_2 - 2l_3}{2 \cdot (l_1 + l_2 + l_3) \cdot l_2} = Fk_1 - \frac{j_1^2}{k_1^2} \cdot \frac{3}{2 \cdot (l_1 + l_2 + l_3)}, \\ Fk_1 \sin k_1 l_3 - Gk_1 \cos k_1 l_3 - \frac{j_1^2}{k_1^2} \cdot \frac{3}{2 \cdot (l_1 + l_2 + l_3)} = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Решая систему (4) методом Крамера, перейдем к системе трансцендентных уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned} &k_1 k_2 \sin(k_2 l_2) \cos^2(k_1 l_3) + k_1 k_2 \sin(k_2 l_2) \sin^2(k_1 l_3) = 0, \\ &-(j_1^2 k_2^2 l_1 l_2 \cos(k_1 l_3) - j_1^2 k_2^2 l_1 l_2 \cos^2(k_1 l_3) + j_2^2 k_1^2 l_1 l_3 \cos^2(k_1 l_3) - \\ &- j_1^2 k_2^2 l_1 l_2 \sin^2(k_1 l_3) + j_2^2 k_1^2 l_1 l_3 \sin^2(k_1 l_3) - j_2^2 k_1^2 l_1 l_3 \cos^2(k_1 l_3) \cos(k_2 l_2) + \\ &+ j_1^2 k_2^2 l_2 l_3 \cos^2(k_1 l_3) \cos(k_2 l_2) - j_2^2 k_1^2 l_1 l_3 \cos(k_2 l_2) \sin^2(k_1 l_3) + \\ &+ j_1^2 k_2^2 l_2 l_3 \cos(k_2 l_2) \sin^2(k_1 l_3) - j_1^2 k_2^2 l_2 l_3 \cos(k_1 l_1) \cos(k_2 l_2) \sin^2(k_1 l_3) + \\ &+ j_1^2 k_1 k_2 l_1 l_2 l_3 \sin(k_1 l_3) - j_1^2 k_2^2 l_2 l_3 \cos(k_1 l_1) \cos^2(k_1 l_3) \cos(k_2 l_2)) / (k_1 k_2 l_1 l_2 l_3) = 0, \\ &(j_1^2 k_2 \sin(k_2 l_2) (\cos(k_1 l_3) + k_1 l_3 \sin(k_1 l_3)) / (k_1^2 l_3) = 0, \\ &-(j_1^2 k_2 \sin(k_2 l_2) (\sin(k_1 l_3) + k_1 l_3 \cos(k_1 l_3)) / (k_1^2 l_3) = 0. \end{aligned} \right. \quad (5)$$

Наименьший корень системы трансцендентных уравнений (5) устанавливает критическую нагрузку, т.е. нагрузку, при которой произойдет потеря устойчивости.

Критическая нагрузка:  $P_{кр} = K \frac{EI_2}{l^2}$ , где коэффициент  $K$  связан с коэффициентом расчетной длины  $\mu'$  соотношением:  $K = \frac{\pi^2}{\mu'^2}$ .

Численное решение системы (5) производилось в программной среде Matlab.

Были рассмотрены и решены задачи устойчивости сжато-изогнутого стержня переменного сечения с шарнирным закреплением одного края и жестким другого, с шарнирным закреплением обоих концов, а так же сжатого стержня с упругим опиранием одного края и жестким опиранием другого (рисунки 2-4).

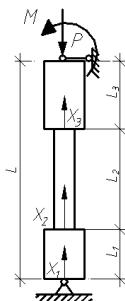


Рисунок 2 - Расчетная схема сжато-изогнутого стержня переменной жесткости, шарнирно опертого по концам

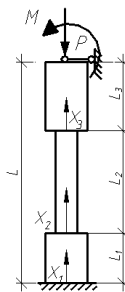


Рисунок 3 - Расчетная схема сжато-изогнутого стержня переменной жесткости, шарнирно опертого с одной стороны и жестко заделанного с другой

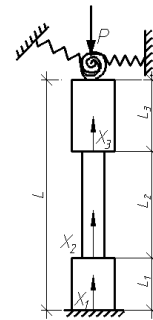


Рисунок 4 - Расчетная схема сжатого жестко опертого с одной стороны и упруго опертого с другой стороны стержня

Сравнение полученных значений с данными эксперимента, приведены в главе 4.

Изоостабы для сжато-изгибаемого жестко-опертого стержня приведены в приложении 1.

**Третья глава** посвящена теоретическим исследованиям работы рамных конструкций из тонкостенных холодногнутых профилей.

Конечно-элементное моделирование рамной конструкции из холодногнутых профилей выполнялось с использованием системы автоматизированного проектирования SolidWorks, который реализует расчет конструкций и их элементов, основываясь на методе конечных элементов (МКЭ). Величины нагрузок, прикладываемых к рамной конструкции, были приняты в соответствии с экспериментом.

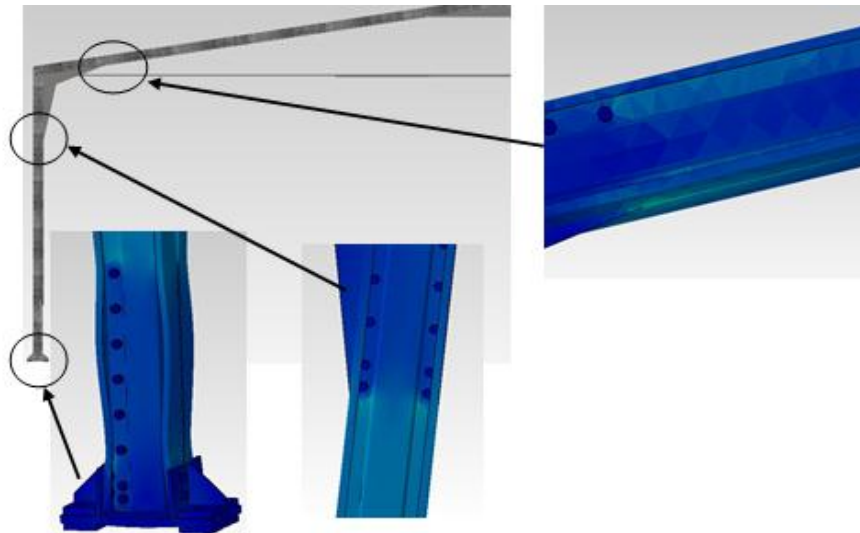


Рисунок 5 – Конечно-элементная модель (изополя напряжений)

Конечно-элементное моделирование (рисунок 5) всей рамной конструкции показало, что максимальные напряжения возникают в полках ригеля рамы.

Целью моделирования работы ригеля рамы является исследование обеспечения совместной работы профилей в составе ригеля рамной конструкции и установление влияния шага соединительных прокладок на форму потери устойчивости ригеля рамы.

Схема исследуемого участка конструкции представлена на рисунке 6.

Исследуемый участок ригеля был нагружен продольной силой  $N$  и изгибающим моментом  $M$ , действующими на рассматриваемую часть ригеля.

Имитационное моделирование работы ригеля рамы показало значительные деформации профилей.

Длина волны и амплитуда искривления полок профиля по длине ригеля рамы непостоянны. Наибольшая амплитуда искривления полок наблюдается на участке от карнизной фасонки до первой соединительной прокладки.

Изменение шага постановки соединительных прокладок позволяет снизить опасность потери местной устойчивости полок, обеспечить совместность работы профилей в составе стержня и повысить несущую способность конструкции в целом.

Для обеспечения совместной работы профилей и учета местной устойчивости полок парного  $\Sigma$ -образного профиля в составе рамной конструкции, рассмотрена расчетная модель пластинки со следующими геометрическими характеристиками: толщиной  $t$ , шириной  $b$  и длиной  $a$ , представленной на рисунке 7. На рассматриваемую пластинку действует равномерно распределенная нагрузка.

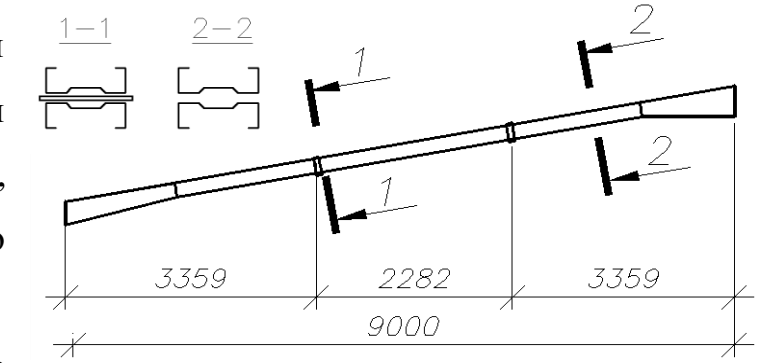
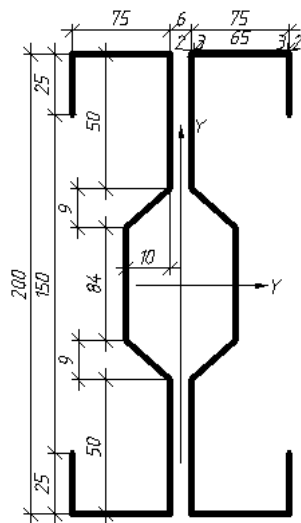


Рисунок 6 – Исследуемый фрагмент ригеля рамной конструкции

Рисунок 7 – Расчетная модель сжатой полки профиля ригеля рамы

Дифференциальное уравнение равновесия пластинки:

$$\frac{EI}{1-\nu^2} \left( \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \omega}{\partial y^4} \right) + \sigma_x t \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} = 0, \quad (6)$$

Прогиб рассматриваемой выпученной пластинки:

$$\omega_1 = \sin \frac{n \cdot \pi \cdot x}{a} (C_1 \cdot \operatorname{ch} k_1 \cdot y + C_2 \cdot \operatorname{sh} k_1 \cdot y + C_3 \cdot \cos k_2 \cdot y + C_4 \cdot \sin k_2 \cdot y), \quad (7)$$

$$\text{где } k_1 = \frac{n \cdot \pi}{2 \cdot \alpha} \cdot \sqrt[4]{\tau} \cdot \sqrt{\mu+1}; \quad k_2 = \frac{n \cdot \pi}{\alpha} \cdot \sqrt[4]{\tau} \cdot \sqrt{\mu-1}.$$

При  $\tau=1$  (рассматривается случай упругой работы материала), условие устойчивости пластины примет вид:

$$\sqrt{\mu-1} \cdot (\mu+1-\nu)^2 \cdot \operatorname{ctg} k_2 - \sqrt{\mu-1} \cdot (\mu-1+\nu)^2 \cdot \operatorname{cth} k_1 + 2 \frac{n \cdot \pi}{\alpha} \cdot \mu \cdot \Phi = 0, \quad (8)$$

$$\text{где } \Phi = \frac{E \cdot I}{b \cdot D} - \frac{A}{b \cdot t} \cdot \mu^2; \quad \alpha = \frac{a}{b}; \quad D = \frac{t^3 \cdot E}{12 \cdot (1-\nu^2)}; \quad n - \text{количество полуволн, по}$$

которым искривляется рассматриваемая пластина;  $t$  – толщина пластины;  $D$  – цилиндрическая жесткость;  $\Phi$  – величина, выражающая жесткость ребра;  $E$  – модуль упругости.

Коэффициент устойчивости пластинки:

$$k = \left( \frac{n}{\alpha} \right)^2 \cdot \mu^2, \quad (9)$$

где при заданных значениях  $\alpha$  и  $\Phi$ ,  $\mu$  – наименьший корень уравнения(8)

Подставив(9) получим выражение для критического напряжения пластинки:

$$\sigma_{кр} = \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1-\nu^2)} \cdot \left( \frac{t}{b} \right)^2 \cdot k \cdot \sqrt{\tau}, \quad (10)$$

Зависимости критических напряжений  $\sigma_{кр}$  от длины пластинки, т.е. шага установки соединительных прокладок для обеспечения совместной работы ветвей в составном сечении рамной конструкции с учетом разных толщин профиля приведены на рисунке 8.

Из графика следует, что значительное влияние на величину критического

напряжения оказывает толщина рассматриваемой пластики. При увеличении толщины профиля критическое напряжение увеличивается, при одном и том же шаге соединительных прокладок.

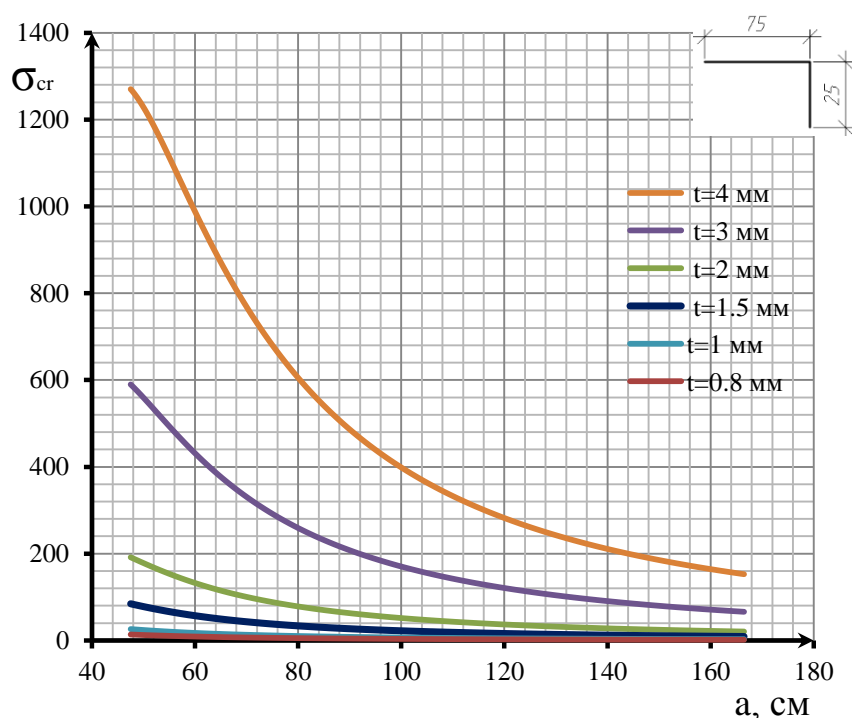


Рисунок 8 – Значения критических напряжений

Исчерпание несущей способности стержня в составе рамной конструкции из холодногнутых стальных профилей нередко наступает из-за необеспечения совместной работы профилей в составе сечения и, как следствие, потери местной устойчивости полки (стенки) профиля.

На основании данных имитационного моделирования, за длину пластины, подкрепленной ребром, принимается расстояние от карнизной фасонки до первой соединительной прокладки.

Шаг соединительных прокладок необходимо подобрать таким образом, что бы выполнялось условие:

$$\frac{N}{A} + \frac{Mx}{W_x} \leq \sigma_{кр}, \quad (11)$$

где  $M_x, N$  – изгибающий момент и продольное усилие в сечении ригеля рамы;  
 $W_x, A$  – момент сопротивления и площадь рассматриваемого сечения с учетом

редуцирования;  $\sigma_{кр}$  - критическое напряжение.

Критическое напряжение  $\sigma_{кр}$  определяется по формуле (10), за длину пластины, деформирующейся с подкрепляющим ее ребром, берется расстояние между соединительными прокладками.

По графику (рисунок 8) необходимо подобрать такое значение шага соединительных прокладок и соответствующую ему величину критического напряжения, чтобы условие (11) выполнялось.

Изменение изгибающего момента по длине ригеля и выполнение условия (11) делают шаг соединительных прокладок непостоянным по длине ригеля рамы. Проверка условия (11) необходима для тех сечений, где наблюдаются экстремумы (места изменения знака или обнуления) эпюры изгибающих моментов.

**В четвертой главе** приведены результаты экспериментальных исследований действительной работы рамной конструкции из стальных гнутых профилей.

Учитывая, что исследуемая конструкция широко используется при строительстве зданий различного назначения, целью экспериментальных исследований являлось: изучение действительной работы рамной конструкции из холодногнутой профилей, оценка правильности расчетных предпосылок и проверка предложенной методики расчета.

Испытываемая конструкция (рисунок 9) работала в составе блока из четырех рам. В торце каркаса расположен связевой блок с вертикальными связями по колоннам и горизонтальными связями по покрытию. Элементы рам представляли собой парные профили  $\Sigma$ -образного сечения, объединенные соединительными прокладками.

Профили изготовлены ЗАО «Эксергия» по ТУ 1122-181-02494680-99 из оцинкованной рулонированной стали в качестве исходного материала.

Профили испытываемой рамы по оси 3 (рисунок 9) изготовлены из стали С345. Профили рам по осям 1, 2, 4, прогоны и элементы связей – из стали С235. Фасонки и соединительные прокладки - из стали С235. Конструкция покрытия – прогонная, использован профлист Н75-1000-0,7. Шаг прогонов 2,25м. Крепление прогонов к

ригелю рамы осуществлялось болтами нормальной точности М10 в одном уровне с ригелем. Сечение прогонов выполнено из двух профилей ПГС 150С. Толщина профиля 1,5мм. Ригель и стойки выполнены из парных профилей ПГС 200С толщиной 2мм, объединенные соединительными



Рисунок 9 - Общий вид испытываемой конструкции со страховочными подмостями

прокладками. Узловые соединения рамной конструкции выполнены на болтах нормальной точности М10 при помощи фасонки толщиной 6 мм.

Связи выполнены из профилей ПГС 150С толщиной 1,5мм. Общий вид испытываемых конструкций приведен на рисунке 9.

Прогибы ригеля в плоскости рамы измерялись с помощью прогибомеров ПАО-6. Деформации наиболее нагруженных элементов определялись с помощью проволочно-петлевых тензодатчиков и тензометров Гугенбергера. Тензодатчики и тензометры Гугенбергера расположены по сечениям элементов в соответствии со схемой на рисунке 10.

При 31% от предполагаемой разрушающей нагрузки была обнаружена вмятина в нижней полке профиля ригеля рамы (рисунок 11).

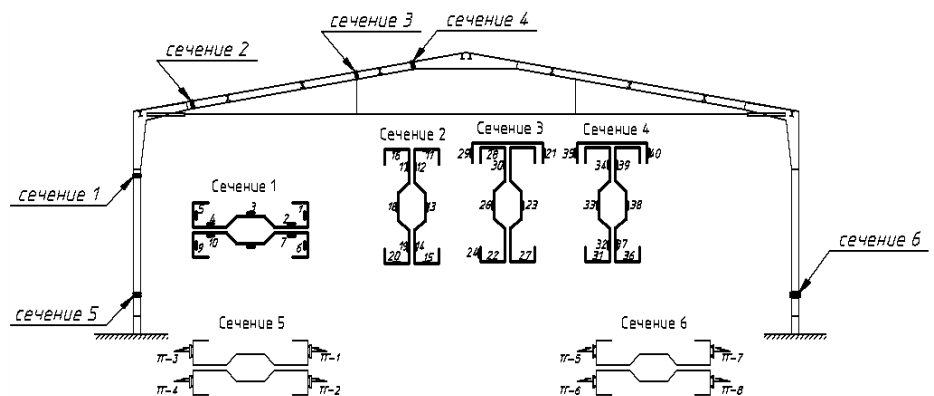


Рисунок 10 - Расположение тензодатчиков по сечениям элементов

После четвертой ступени нагружения (50% от предполагаемой разрушающей нагрузки, рисунок 12) размеры вмятины увеличились. Испытание было остановлено. Нагрузка полностью снята.

Полная разгрузка позволила определить остаточный прогиб конструкции.

Его величина составила 1,5 см, что составляет 25% полного прогиба.



Фактический прогиб превышал теоретический на 27%.



Рисунок 11 - Вмятина, образовавшаяся в нижней сжатой полке профиля ригеля рамы



Рисунок 12 - Потеря местной устойчивости нижней полки профиля ригеля в месте сопряжения с карнизной фасонкой

До приложения нагрузки  $153 \text{ кг/м}^2$  ( $181 \text{ кг/м}^2$  с учетом собственного веса) фактическое напряженно-деформированное состояние конструкции соответствовало теоретическому. При увеличении нагрузки до  $187 \text{ кг/м}^2$  наблюдается резкое увеличение фактических деформаций в полках профилей по сравнению с теоретическими и прогибов конструкции в целом.

После приложения испытательной нагрузки  $187 \text{ кг/м}^2$  ( $215 \text{ кг/м}^2$  с учетом собственного веса конструкций) произошла местная потеря устойчивости полок профилей стойки в месте сопряжения ригеля, прогиб превысил предельную величину. Полная предельная нагрузка на покрытие испытываемой конструкции с учетом собственного веса составила  $215 \text{ кг/м}^2$ .

При численном решении задачи устойчивости сжатого стержня с упругим опиранием с одной стороны и жестко опертого с другой, получаем  $\mu'=1.76$ . Сравнение теоретических и экспериментальных (рисунок 13) данных говорит о хорошей сходимости (в пределах 8-11 %) данного случая закрепления с реальной работой конструкции.

Однако учет фактической жесткости пружины сопряжен со значительными трудностями, так как на ее характеристики влияет множество факторов: длина здания, места установки связевых блоков и др. Приведенное численное значение

отражает испытываемую конструкцию, работающую в составе блока из четырех рам.

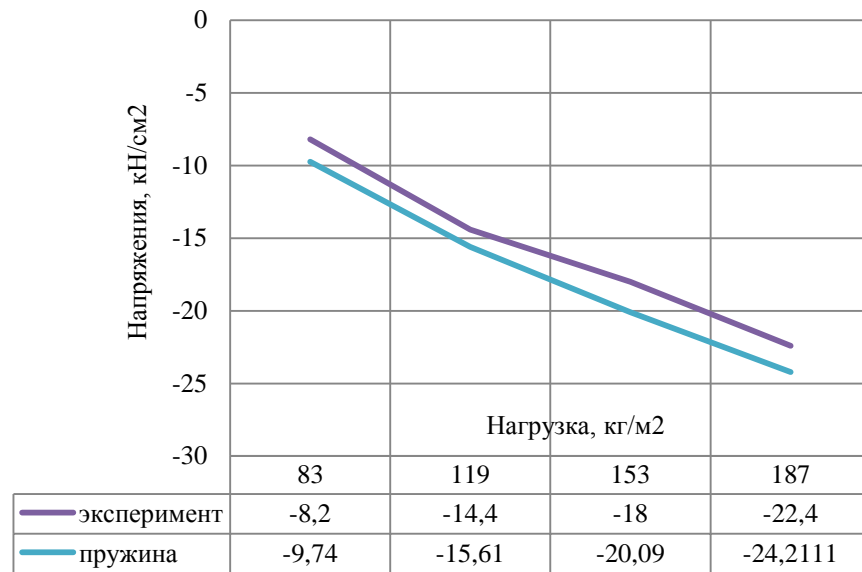


Рисунок 13 - Сравнение теоретических и экспериментальных данных (по способам закрепления) для стойки

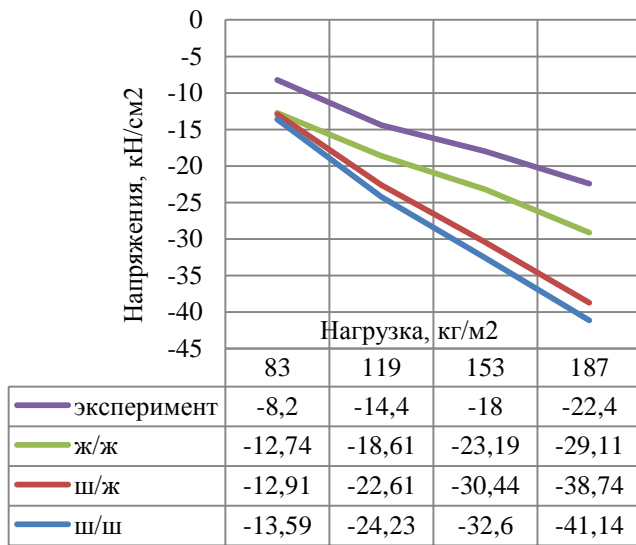
Для выявления действительного закрепления ригеля и стойки в составе рамной конструкции из холодногнутых профилей было проведено сравнение экспериментальных данных и данных, полученных в ходе теоретических расчетов для других случаев закрепления сжато-изогнутого стержня.

Сравнение теоретических и экспериментальных данных представлено на рисунке 14. Из графиков (рисунок 14) видно, что ригель и стойка в составе рамной конструкции из холодногнутых профилей работают как жестко-опертые сжато-изгибаемые стержни. Расхождение теоретических и экспериментальных результатов составило по ступеням нагружения 15...28% (рисунок 14).

Хорошая сходимость экспериментальных и теоретических результатов говорит о том, что учет изменения жесткости в таких конструкциях по предложенной методике необходим и удовлетворительно описывает характер напряженно-деформированного состояния конструкции.

Характер деформации рамной конструкции, полученный в ходе имитационного моделирования, и в ходе эксперимента совпадают (рисунок 15).

а)



б)

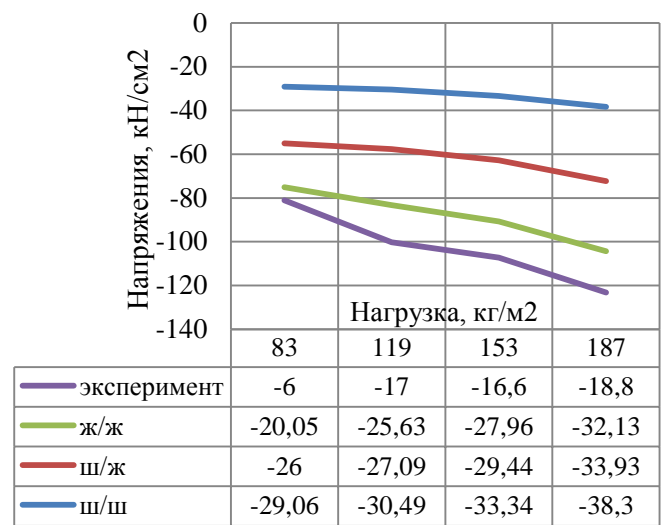
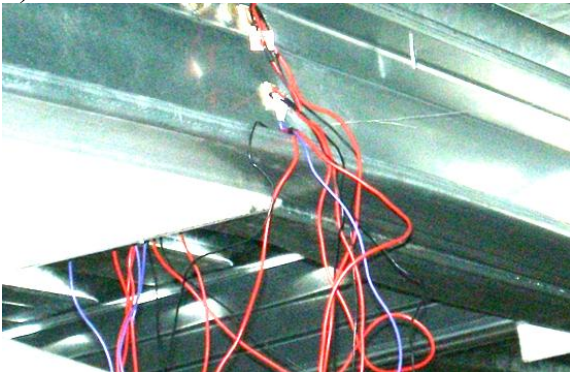


Рисунок 14 - Сравнение теоретических и экспериментальных данных (по способам закрепления): а) для стойки; б) для ригеля

а)



б)

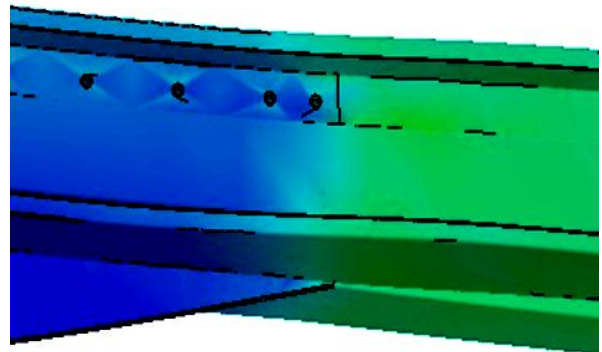


Рисунок 15 – Характер деформации рамной конструкции (место сопряжения ригеля и карнизной фасонки):

а) данные эксперимента; б) данные, полученные в ходе моделирования

Опасными местами с точки зрения потери несущей способности для исследуемой конструкции являются места перемены жесткости: узлы соединения ригеля и стойки с фасонками. Результаты численных имитационных вычислений представлены на рисунке 16. Кривая SolidWorks\_1 - результаты расчета с приложением равномерно-распределенной нагрузки, и кривая SolidWorks\_2 – результаты расчета с приложением сосредоточенной нагрузки в ригеле рамы как на 3 этапе испытаний, что повлекло за собой потерю местной устойчивости

ригеля рамы. Расхождения с результатами эксперимента в пределах 18...20%.

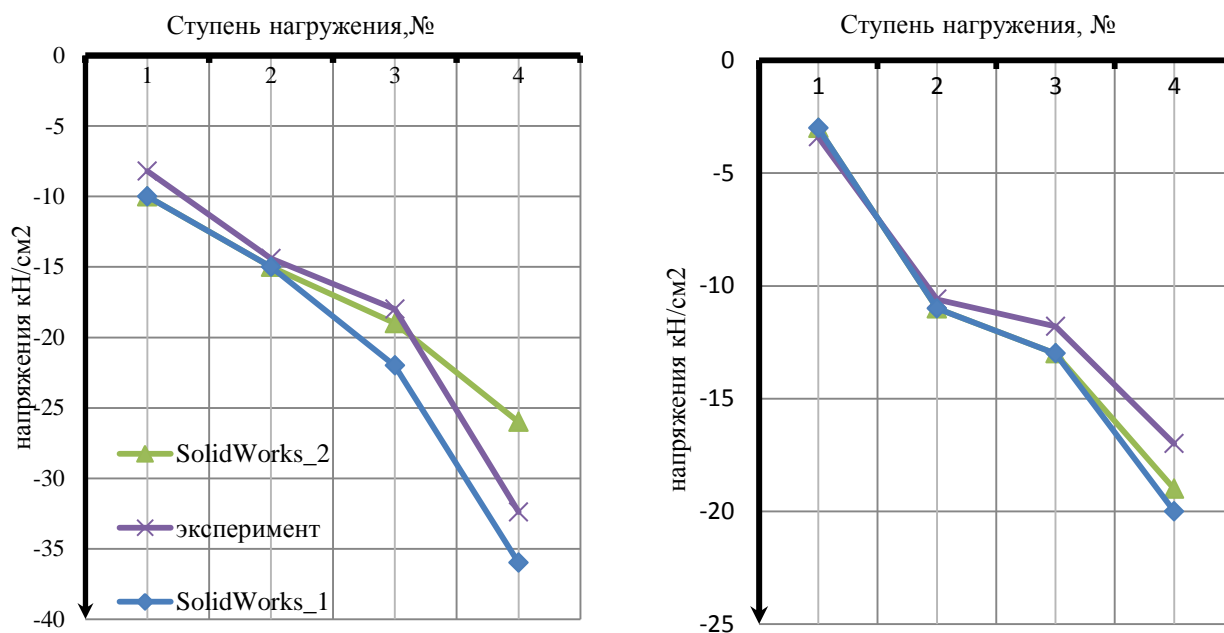


Рисунок 16 - Результаты расчета (сечение 1, сечение 2)  
(по ступеням загрузки конструкции)

Хорошее совпадение экспериментальных данных и значений, полученных в результате численного моделирования, говорит о достаточно точном прогнозировании работы рамной конструкции под нагрузкой и корректности введенной расчетной схемы.

**В приложении 1** приводятся изостабы для жестко-опертого стержня переменной жесткости.

**В приложении 2** приводятся критические напряжения пластины, подкрепленной ребром.

**В приложении 3** приводятся основные положения расчета рамных конструкций из холодногнуток профилей.

**В приложении 4** приводится свидетельство государственной регистрации программы для ЭВМ.

**В приложении 5** приводятся справки о внедрении результатов диссертационной работы в практику проектирования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Рамные конструкции из стальных гнутых парных профилей широко востребованы при возведении зданий различного назначения. Областью применения рамных конструкций из холодногнутой профилей являются здания промышленного и сельскохозяйственного назначения, пролетом от 9 до 24 м, высотой в коньке до 7 м, возводимые в I-IV снеговых районах.

2. Проведены экспериментальные исследования рамной конструкции из стальных холодногнутой профилей пролетом 18м, в результате которых получены данные о напряжённо-деформированном состоянии конструкций. Определено, что в местах изменения жесткости происходят значительные деформации элементов, что подтверждено моделированием в программном комплексе Solid Works.

3. Разработаны работоспособные расчетные модели рамной конструкции (стержневая и конечно-элементная), хорошо описывающие их действительную работу под нагрузкой.

4. Установлен подход для определения устойчивости сжатого и сжато-изгибаемого стержня переменной жесткости. Выявлена хорошая сходимость экспериментальных и теоретических данных, составившая до 15%

5. Уточнена расчетная схема стержней, работающих в составе рамной конструкции. Исследования показали, что жесткое сопряжение наиболее точно соответствует реальной работе конструкции.

6. Решена задача устойчивости сжато-изгибаемого стержня переменной жесткости с различным закреплением концов.

7. Получен коэффициент  $\mu'$ , определяющий расчетную длину сжато-изгибаемого стержня переменной жесткости.

8. Доказано и экспериментально подтверждено существенное влияние шага соединительных прокладок на совместную работу профилей в составе сечения.

9. Уточнена методика расчета рамных конструкций из холодногнутой профилей с использованием редуцированных характеристик сечения и уточнённым значением расчетной длины стержня.

**Рекомендациями и перспективами дальнейшей разработки темы являются:**

- разработка эффективных узлов соединения элементов рамных конструкций из холодногнутых профилей;
- разработка обоснованного подхода к расчету редуцированных характеристик холодногнутых профилей;
- разработка и исследование новых конструктивных решений рамных конструкций из холодногнутых профилей.

**Список работ, опубликованных автором по теме диссертации:**

**Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:**

1. **Сотникова, И.В.** Экспериментальные исследования рамных конструкций из холодногнутых профилей повышенной жесткости/В.В. Зверев, К.Е. Жидков, А.С. Семенов, И.В. Сотникова// Научный вестник ВГАСУ – 2011 - № 4 (24). - С. 20-25.
2. **Сотникова, И.В.** Решение задачи устойчивости сжато-изгибаемых жестко опертых стержней переменной жесткости/ С.Л. Блюмин, В.В. Зверев, А.С. Сысоев, И.В. Сотникова // Вестник МГСУ - 2015. - №5.- С. 18-27.
3. **Сотникова, И.В.** Задача устойчивости сжато-изгибаемых стержней со ступенчатым изменением жесткости/ А.В. Галкин, А.С. Сысоев, И.В. Сотникова // Вестник МГСУ - 2015 - №3 - С 38-45.

**Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:**

4. Программа для поддержки принятия решений для инженера-проектировщика при расчете рамных конструкций из ЛСТК : свидетельство об офиц. регистрации программы для ЭВМ № 2017614355 Рос. Федерация / **И.В. Сотникова**, А.С. Сысоев; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО ЛГТУ № 201666343; заявл. 07.12.2016; зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 13.04.2017. - [1] с.

**Публикации в других изданиях:**

5. **Сотникова, И.В.** Направления исследований легких металлических конструкций / В.В. Зверев, И.В. Сотникова // Сборник тезисов докладов научной конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета – Липецк - 2011. – С. 114-115.

6. **Сотникова, И.В.** Изучение действительной работы рамных конструкций с затяжкой пролетом 18м / В.В. Зверев, И.В. Сотникова // Сборник тезисов докладов научной конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета – Липецк - 2012 – С. 114-115.

7. **Сотникова, И.В.** Экспериментальные исследования действительной работы рамных конструкций на основе холодноформованных профилей / Е.В. Мещерякова, И.В. Сотникова // Материалы областной научно-практической конференции по проблемам технических наук «Молодежь-наука-производство» - Липецк - 2013 - С. 63-69.

8. **Сотникова, И.В.** К вопросу влияния предварительного напряжения на напряженно-деформированное состояние рамных конструкций на основе ЛСТК / Е.В. Мещерякова, И.В. Сотникова // Материалы областного профильного семинара «Школа молодых ученых» по проблемам технических наук – Липецк–2013 – С. 109-114.

9. **Сотникова, И.В.** Обзор экспериментальных исследований действительной работы рамных конструкций на основе холодноформованных профилей / Материалы VII Межрегионального съезда молодых ученых «Молодежь в науке: проблемы и перспективы» - Липецк - 2013 – С.98-102.

10. **Сотникова, И.В.** Компьютерное моделирование из тонкостенных профилей пролетом 18 м с затяжкой / Е.В. Мещерякова, И.В. Сотникова // Материалы научной конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета – Липецк – 2013 – С.121-122.

11. **Сотникова, И.В.** Каркасы зданий из легких металлических конструкций / В.В. Зверев, К.Е. Жидков, И.В. Сотникова // Наукоемкие технологии и инновации : материалов Юбилейная Международная научно-практическая конференция,

посвященная 60-летию БГТУ им. В.Г. Шухова, XXI научные чтения (28-30 ноября 2014г) – Белгород – 2014 – С.20-24.

12. **Сотникова, И.В.** Устойчивость сжато-изгибаемых шарнирно опертых стержней с переменной жесткостью/ И.В. Сотникова // Научные стремления : материалы VI Международной научно-практической конференции (25-27 марта 2015г.) - Минск – 2015 – С.180-184.

13. **Сотникова, И.В.** Устойчивость стержня со ступенчатым изменением жесткости с различным закреплением концов / И.В. Сотникова, Е.В. Мещерякова// Актуальные проблемы современной науки и пути их решения материалы XXII Международной конференции (29-30 декабря 2015 г.) - Москва, 2015. – С. 99-101.

14. **Сотникова, И.В.** Область применения холодноформованных профилей / И.В. Сотникова, М.В. Сотникова // Сборник тезисов докладов научной конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета – Липецк - 2016 – С. 390-392.

15. **Любавская, И.В.** Технологичность изготовления ЛСТК/ М.В. Сотникова, И.В. Любавская // Материалы научной конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета – Липецк– 2017. – С. 414-416.

16. **Любавская, И.В.** Моделирование рамной конструкции из ЛСТК в программном комплексе SolidWorks / М.В. Сотникова, И.В. Любавская, Е.В. Мещерякова // Приоритетные направления развития образования и науки : материалы IV Междунар. науч.–практ. конф. (Чебоксары, 24 дек. 2017 г.) – Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс», 2017. – С. 204-206.