



doi: 10.18720/CUBS.71.1

**Влияние жесткости узлового соединения на механические характеристики стеллажа****Influence of nodal connection stiffness on the mechanical characteristics of the rack**И.В. Атавин<sup>1\*</sup>, Ю.Д. Казакова<sup>2</sup>, Б.Е. Мельников<sup>3</sup>,  
А.С. Семенов<sup>4</sup>, В.А. Шерстнев<sup>5</sup>I.V. Atavin<sup>1\*</sup>, Yu.D. Kazakova<sup>2</sup>, B.E. Melnikov<sup>3</sup>,  
A.S. Semenov<sup>4</sup>, V.A. Sherstnev<sup>5</sup><sup>1-3,5</sup> Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого, Санкт-Петербург,  
Россия<sup>1-3,5</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,  
St. Petersburg, Russia<sup>4</sup> Дрезденский технический университет, Дрезден,  
Германия<sup>4</sup> Dresden University of Technology, Dresden, Germany**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА**Легкая стальная тонкостенная конструкция;  
ЛСТК;  
строительные конструкции;  
строительная механика;  
балка;  
испытание;**KEYWORDS**structural mechanics;  
light-weight steel;  
thin-walled structure;  
cold-formed profile;  
finite-element method;**ИСТОРИЯ**Подана в редакцию: 19.04.2018  
Принята: 21.11.2018**ARTICLE HISTORY**Submitted: 19.04.2018  
Accepted: 21.11.2018**АННОТАЦИЯ**

Статья посвящена оценке влияния крутильной жесткости узлового соединения балка-стойка на несущую способность, устойчивость и долговечность конструкции тонкостенного стеллажа. В качестве примера рассматривается модель из пары балок длиной 1,5 м, которые закреплены с помощью гребенчатых зацепов (соединение балка-стойка). Получены значения жесткостей на кручение для соединения балка-стойка при предельных нагрузках. Данные натурных испытаний сравниваются с результатами численного моделирования, произведенного в специализированном программном комплексе по методу конечных элементов.

**ABSTRACT**

The article is devoted to the evaluation of the torsional stiffness of the beam junction. The influence of the connection on the bearing capacity and stability of the construction of a thin-walled rack is analyzed. As an example, we consider models of beams with a length of 1.5 m. Torsional stiffness values for a beam-stanchion connection under extreme loads are obtained. Results of full-scale tests will be compared with the results of electronic calculations made in a specialized software package.

**Содержание**

1.	Введение	1
2.	Методы	3
3.	Результаты и обсуждение	7
4.	Заключение	8

**1. Введение**

Разработка и внедрение новых технологий, используемых при возведении зданий и сооружений из металлических конструкций, делает их производство эффективным.

Новое, быстро развивающееся направление в строительстве - применение конструкций, выполненных из легких стальных холодногнутых профилей (ЛСТК). Низкая металлоемкость, рациональные параметры сечения, легкость транспортировки и монтажа конструкций являются основными преимуществами ЛСТК.

Оценка прочностных и эксплуатационных характеристик новых видов сечений, узловых соединений производится в несколько этапов. Первый этап - испытание реальных образцов, второй - расчёт конструкции с применением специализированных программных комплексов. Результаты оцениваются с помощью параметров регламентированных нормативными документами. Эксперименты позволяют определить другие важные факторы, влияющие на эксплуатационные характеристики конструкций, которые изготавливаются по ЛСТК технологии. В частности, определяется долговечность узловых соединений, которые значительно влияют на общий срок службы конструкции.

Актуальными нормативными документами, которые используются при расчете тонкостенных конструкций, являются Еврокод-3 и AJSJ.

Основоположником исследования стержневых тонкостенных конструкций при их деформировании является С.П. Тимошенко [1, 2]. Он разработал методику определения экспериментальным путем жесткости на кручение стержня открытого вида, изучал различные аспекты деформирования тонкостенных стержней различных сечений.

В публикациях В.З. Власова [3–5] представлены принципы расчета тонкостенных конструкций, изготовленных из профилей открытого типа, на прочность и потерю устойчивости при воздействии силы вне "круга устойчивости", на кручение и изгиб. А.А. Уманским [6] было предложено иное решение для задачи на изгиб в условиях стесненного кручения.

Вклад в совершенствование теории расчета ЛСТК внесли Бычков Д.В. в соавторстве с А.К. Мрощинским [7–9]. Они разработали алгоритмы для расчета кручения балок, при учёте количества пролетов и условий закрепления концов. Используя метод сил и перемещений, данный метод расчета позволяет учитывать стесненное кручение тонкостенных конструкций, в частности, рам.

Диссертационное исследование А.Р. Туснина [10] посвящено использованию МКЭ при решении задач деформирования тонкостенных конструкций с учетом влияния изгиба и кручения. Расчет позволяет учитывать влияние разных узловых соединений, а также расположение центра тяжести балки, её прогиба и эксцентриситета.

Работы [11, 12] посвящены усовершенствованию методов расчета тонкостенных конструкций, а также рассмотрены вопросы надежности, долговечности и способы их повышения, отмечена недостаточность нормативной базы, используемой в России, и предложены возможные варианты исправления ситуации.

Примеры реального использования легких стальных тонкостенных конструкций, описание технологий и особенностей монтажа, эксплуатации рассмотрены в [13].

В работе [14] представлен метод расчета тонкостенных конструкций, образованных из элементов составного профиля, который позволяет учитывать влияние формы сечения профиля в условиях общей потери устойчивости по ПНС (предельно-напряженное состояние).

Руководства [15, 16] рассматривают технологии усиления железобетонных конструкций с применением композита (композиционный материал). Исследованы вопросы оценки качества работ, технических требований к применяемым материалам, условий монтажа и эксплуатаций, также представлены примеры усиления конструкций.

Статьи [17–19] посвящены методикам расчета тонкостенных конструкций, которые учитывают деформации и накопления повреждений.

Правила проектирования, формулировки, типовые виды и технические характеристики тонкостенных элементов, основные модели, расчетные схемы и вариации расчета представлены в [20–22].

Авторами [23, 24] сравниваются результаты натурных испытаний типовых профилей с результатами, полученными в ходе моделирования в специализированных программных комплексах.

Вопросы влияния температуры (от низких до высоких, возникающих вследствие пожара) на прочностные и эксплуатационные характеристики тонкостенных конструкций разобраны в [25, 26].

Поведение элементов конструкций из полуоткрытых профилей рассмотрено в [27, 28]. Влияние приложения эксцентриситета нагрузки к элементам из тонкостенных профилей и получение зависимости деформации и прогибов в связи с этим, получены в материалах работ [29,30].

Примеры оценки прочностных характеристик конструкций из материалов разного рода с применением испытаний неразрушающего типа, моделирование конструкций с использованием различных КЭ и сравнение результатов приведены в исследованиях [31–34].

В [35–38] выполнен обзор российских и иностранных источников, в которых уделяется внимание устойчивости тонкостенного элемента холодногнутого изготовления при изгибе. Экспериментальные данные сравниваются с теоретическими показателями, полученными в ходе моделирования с помощью стержневых и оболочечных элементов. Проанализированы результаты, сформулированы проблемы, предложены варианты решения.

Работы [39, 40] посвящены изучению и моделированию расчетной схемы подземного перехода, влиянию расчетной схемы на виды тонкостенных профилей холодногнутого изготовления, которые можно использовать в данном сооружении. Полученная модель позволяет осуществить дальнейшее внедрение тонкостенных холодногнутох профилей при проектировании и строительстве подземных переходов.

Авторы [41–43] представили новую программно-вычислительную систему "Сталькон", разработанную сотрудниками кафедры металлических конструкций МГСУ, которая позволяет производить статический расчет и определять несущую способность тонкостенных стержневых конструкций, в том числе и пространственных систем, учитывая требования нормативной документации. В качестве примера произведен расчет стойки с шарнирно-неподвижным нижним и шарнирно-подвижным верхним концами. Также, проанализирована возможность использования для расчетов ПК NASTRAN и ANSYS, с помощью которых можно рассчитывать тонкостенные конструкции с учетом стесненного кручения.

В работах [44–46] представлена разработка метода численного расчета стержневых тонкостенных конструкций и пространственных систем по полусдвиговой и бессдвиговой теориям. Результаты изучения деформирования открытого тонкостенного стрелня, который работал на кручение с появлением деформации сдвига, опубликованы с учетом применения разных КЭ.

Авторами исследований [47–49] выдвинуты методические обоснования редуцирования, основанные на изменении несущей способности профиля. Проанализированные данные были сопоставлены между собой, и выдвинуто заключение о редуцировании поперечного сечения. В ходе исследований для тонкостенного профиля вычислена эффективная площадь поперечного сечения с учетом возможной местной потери устойчивости. Также проанализированы результаты линейного и нелинейного расчета сжатого-изгибаемого стального элемента, выполненного с двойным гофрированием. Полученные результаты сравниваются с результатами натуральных экспериментов. Определены особенности работы тонкостенного металлического элемента с двойным гофрированием. Рассмотрены результаты реальных испытаний фермы из тонкостенных профилей холодногнутого изготовления пролетом 18 м.

В работах [50–53] рассмотрены проблемы усталости ЛСТК, предложены возможные методы решения данных проблем, разобраны нелинейные процессы накопления повреждений тонкостенных конструкций и описаны способы прогнозирования усталостной долговечности. Применение энергетической модели оценки прочности элементов при малоциклового усталости представлено в работах [54–56]. Описан алгоритм кинетического анализа поврежденности и опытным путем доказана адекватность данного метода.

Статьи [57, 58] посвящены оценке влияния механохимического растворения профиля длинных металлических цилиндров на их долговечность под действием собственного или дополнительного веса.

Целью данной работы является оценка жесткости узлового соединения балка-стойка, которое входит в состав тонкостенной пространственной конструкции стеллажа. Для достижения данной цели поставлены следующие задачи:

- Создание установки для проведения натуральных испытаний с тонкостенными конструкциями;
- Построение аналитической конечно-элементной модели конструкций в программном комплексе ANSYS, сравнение полученных результатов с результатами натуральных испытаний;
- Определение жесткостных характеристик соединения, сравнение натуральных и численных результатов.

## 2. Методы

### 2.1. Энергетическая модель оценки прочности

Поврежденность материала конструкции может быть вычислена с помощью энергетической модели накопления повреждений. Энергетический метод определения разрушений заключается в вычислении необратимой работы деформирования  $A_p$ , которая представлена интегралом истинных напряжений по необратимым деформациям, вызванным этими напряжениями.

$$A_p = \int_0^{\epsilon_p} \sigma \cdot d\epsilon = C \quad (1)$$

где  $\varepsilon_p$  – деформация разрушения;

$\varepsilon$  – истинная необратимая деформация, включающая мгновеннопластические и вязкопластические деформации;

$\sigma$  – истинное напряжение;

$C$  – постоянная, зависящая от температуры.

Исходя из предположения, о пропорциональности текущей поврежденности элемента материала по отношению к совершенной на данный момент времени работе, допустимо записать кинетическое уравнение, описывающее меру повреждений  $\Pi$ , в виде кинетического уравнения

$$\Pi = \frac{1}{C} \int_0^\varepsilon \sigma \cdot d\varepsilon. \quad (2)$$

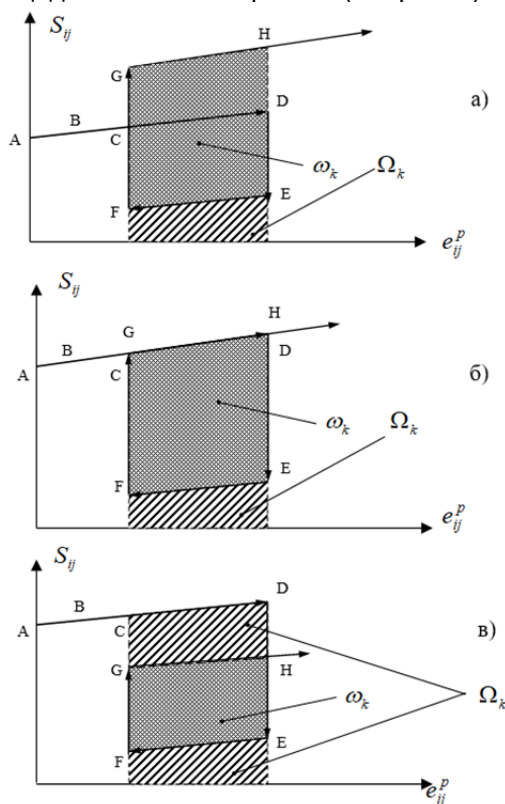
Из условия баланса, внутренней энергии элемента материала тела и представленного кинетического уравнения накопления повреждений, поврежденность можно представить в следующем виде:

$$\Pi = \frac{1}{C} (A + Q), \quad (3)$$

где  $A$  – текущее значение работы;

$Q$  – текущее значение тепла, приобретаемое в процессе теплообмена.

Значение величины  $Q$  является переменным на протяжении различных стадий деформирования, а предельная величина внутренней энергии тела является константой, таким образом получаем, что работа необратимого деформирования также является переменной величиной. Необратимая работа одного цикла нагружения определяется площадью петли гистерезиса (см. рис. 1).



**Рис.1. Три характерных типа петель гистерезиса. Показана работа деформирования**  
**а) линия циклического нагружения идёт выше линии первоначального нагружения;**  
**б) линии первичного и циклических нагружений совпадают;**  
**в) линия циклического нагружения идёт ниже линии первоначального нагружения.**  
 **$\sigma$  и  $\varepsilon^p$  - напряжение и пластическая деформация.**

Полная работа пластической деформации может быть представлена как сумма работ циклической деформации, и одностороннего пластического деформирования.

При нагружении конструкции могут быть реализованы один, два или все три варианта петель гистерезиса.

Для оценки малоциклового усталости используется соотношение, в котором работа одностороннего и циклического деформирования связаны функциональными зависимостями с поврежденностью элемента.

$$P(N) = \frac{\sigma_{max}(N)}{\sigma_p} + \sum_{k=1}^N f\left(\frac{\Omega_k}{\omega_s}\right) + \sum_{k=1}^N \phi\left(\frac{\omega_k}{\omega_p}\right) \quad (4)$$

где  $\sigma_{max}(N)$  – приведенное максимальное напряжение цикла;

$\sigma_p$  – предельное сопротивление материала на разрыв;

$\Omega_k$  – необратимая работа одностороннего пластического деформирования цикла нагружения, представленная площадью под линией EF (рис. 1 а, б) или как разность полной работы и работы циклического деформирования площади петли  $\omega_{kij}$  (рис. 1 в);

$\omega_k$  – необратимая работа циклического деформирования, равная площади петли гистерезиса в  $k$ -ом цикле;

$\omega_p$  – предельная работа статического деформирования в опыте на разрыв образца материала.

В общем случае функции  $f$  и  $\phi$  – являются зависимостям, в которых учитываются максимальные напряжения каждого цикла, предельные напряжения и количество циклов до разрушения материала.

Соотношения (1)-(4) модифицированы к такому виду, что могут быть использованы для оценки накопленной поврежденности. Модель накопления повреждений позволяет учесть их накопление при пассивном нагружении.

## 2.2. Оценка жесткости узлов крепления горизонтальных балок и стяжек к несущим стойкам

При оценке критической нагрузки на балочный стеллаж по критерию устойчивости следует учесть крутильную жесткость соединений балка-стойка и стяжка-стойка. Крутильная жесткость соответствует повороту вокруг оси стержня (рис. 4). Предполагалось расчетно-экспериментальное определение только жесткости соединения балка-стойка. Однако, в процессе работы была установлена необходимость учета соединения стяжка-стойка, так как в отличие от паллетных стеллажей, где имеется система косых связей гарантированно удерживающих стеллаж от потери устойчивости с выходом из фронтальной плоскости, в конструкции рассматриваемых вариантов балочных стеллажей предусмотрены лишь горизонтально расположенные стяжки. Поэтому, в таких вариантах стеллажей, возможно проявление формы потери устойчивости с выходом из фронтальной плоскости. Критическая нагрузка, соответствующая этой форме потери устойчивости, в основном определяется жесткостью на кручение узла стяжка-стойка. В работе используется косвенное определение величины жесткости данного соединения не связанное с прямыми измерениями. Для более точной оценки рекомендуется проведение дополнительных исследований.

С целью определения крутильной жесткости узла балка-стойка проведено расчетно-экспериментальное исследование, включающее натурные испытания на упрощенной модели стеллажа, а также расчеты с применением конечно-элементной модели.



Рис. 2 Соединение гребенчатый зацеп (узел балка-стойка, стяжка-стойка)



Испытана и исследована методом конечных элементов модель, пары стяжек длиной 300 мм и пары балок длиной 1500 мм, закрепленных на расстоянии 135 мм от верхнего края стойки. Подпятники не фиксировались специально от перемещения по вертикали и в горизонтальной плоскости, тем не менее в ходе эксперимента не было отмечено никаких перемещений точек опоры стоек. Расстояние между стойками по фронту 1500 мм, в перпендикулярном направлении 300 мм.

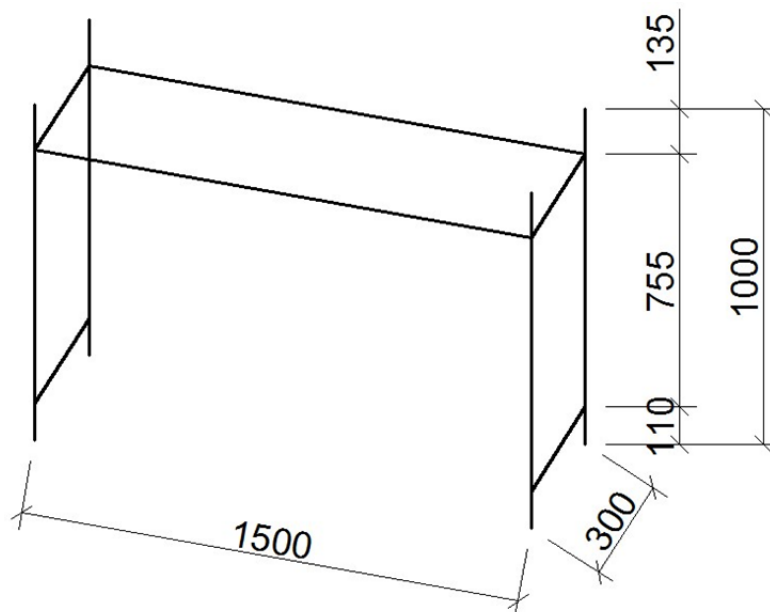


Рис. 3. Геометрические размеры испытываемой модели

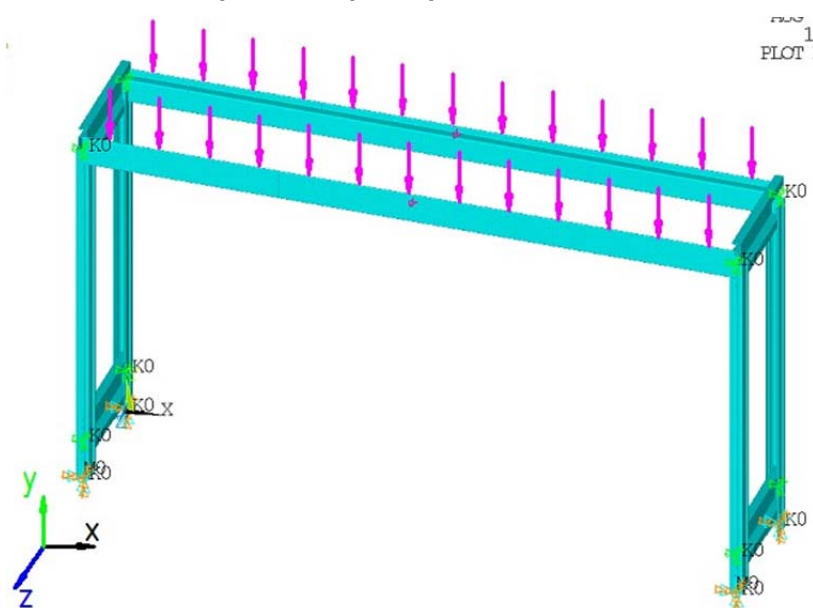


Рис. 4. Расчетная модель для определения жесткости соединения балка-стойка на поворот вокруг оси Z и жесткости соединения стяжка-стойка на поворот вокруг оси X

Балки и стойки конструкции изготовлены из стальной ленты БТ-ПН-1,5, которая соответствует ГОСТ 19904-90. Толщина проката составляет 1,5 мм. Предел текучести применяемой стали равен  $\sigma_T = 230$  МПа. Сечение несущих горизонтальных балок - закрытого, коробчатого типа. Геометрические характеристики профиля 70x30 мм. Несущие вертикальные балки имеют профиль открытого типа. Размеры - 90x30 мм.

Нагрузка на модель производилась с помощью силовой машины "Armsler" через дополнительную конструкцию, позволяющую имитировать равномерно-распределенную нагрузку. Нагрузка регулировалась с помощью динамометра, закрепленного на подвижной части пресса.

Измерение перемещений исследуемой тонкостенной конструкции производились с помощью нескольких часовых индикаторов. Часовые индикаторы имеют рабочий диапазон от 0 до 80 мм, точность измерения составляет 0,01 мм. Индикаторы определяли перемещения одной из стоек по осям X и Z в её верхней части.

Создан конечно-элементный аналог реальной модели в программном комплексе ANSYS. Моделирование конструкции производилось с помощью балочных конечных элементов, которые позволяют наиболее корректно учитывать форму профиля поперечного сечения балок. Общий вид расчетной модели приведен на рис. 4. Данная модель позволяет определить жесткость узла балка-стойка на поворот вокруг оси Z (деформирование стеллажа в плоскости).

Точки опор стоек связаны с жестким основанием: жестко по перемещениям  $U_x$ ,  $U_y$ ,  $U_z$  и по повороту  $R_y$ ; упруго по поворотам  $R_x$ ,  $R_z$  с величинами жесткостей.

Жесткости точки опоры вертикальной стойки (жесткости узла подпятник-стойка) на поворот вокруг осей X и Z были определены ранее расчетно-экспериментальным путем. В ходе эксперимента подпятники не фиксировались от перемещения по вертикали и горизонтальной плоскости. Точки опор стоек были связаны с жестким основанием: жестко по перемещениям  $U_x$ ,  $U_y$ ,  $U_z$  и повороту  $R_y$ ; упруго по поворотам  $R_x$ ,  $R_z$ . Вертикальная стойка крепится к подпятнику 2 винтами-саморезами. Подпятник крепится к полу анкерным болтом. Размер подпятника: высота - 24 мм., ширина - 60 мм., длина - 50 мм.



**Рис. 5. Узловое соединение подпятник-стойка**

На основе данных экспериментов расчетным путем методом итераций были подобраны значения интересующих крутильных жесткостей, так чтобы первая форма потери устойчивости расчетной модели и отвечающая ей критическая нагрузка совпали с экспериментальными.

Крутильная жесткость узла подпятник-стойка вокруг оси X равна **66 Н·м/рад**. Крутильная жесткость узла подпятник-стойка вокруг оси Z равна **134,2 Н·м/рад**.

Моделирование передачи нагрузки от балок к стойкам осуществлялось с помощью упругих элементов, работающих на поворот вокруг оси Z.

В эксперименте, в целях безопасности, балки были связаны проволокой так, чтобы не допустить горизонтальный прогиб балок. В расчетной модели это было учтено путем наложения жесткой связи по перемещениям  $U_z$  на центральные узлы балок.

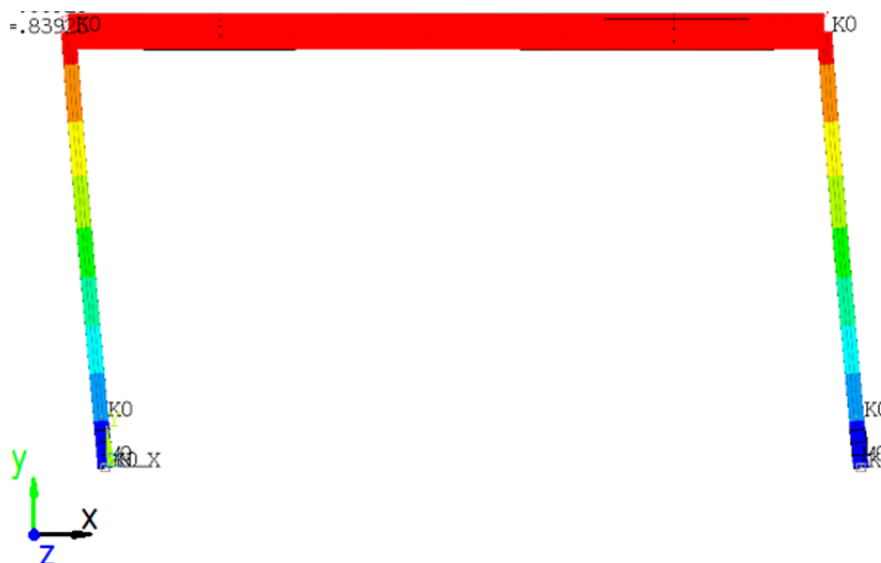
Узлы в модели стоек расположены таким образом, что обеспечивается корректный учет эксцентриситета передачи нагрузки от балок к стойкам через гребенчатые зацепы (балки загружают стойку по жесткой стенке).

### **3. Результаты и обсуждение**

Результаты эксперимента выглядят следующим образом. Модель при нагрузке **11,2 кН** переходит в смежную устойчивую форму равновесия, оставаясь в плоскости без образования заметных пластических деформаций. Это значение нагрузки может быть принято за критическую нагрузку по первой форме потери устойчивости модели.

В соответствии с данными эксперимента расчетным путем методом простых итераций было подобрано значение интересующей крутильной жесткости соединения балка-стойка, так чтобы первая форма потери устойчивости расчетной модели и отвечающая ей критическая нагрузка совпала с экспериментально полученными значениями.

Из результатов расчета следует, что крутильная жесткость соединения балка-стойка для простой модели балочного однопролетного стеллажа вокруг оси  $Z$  равна **2820 Н·м/рад**. Соответствующая форма потери устойчивости показана на рис. 6. Рекомендуется проведение испытаний для определения зависимости количества ярусов на крутильную жесткость соединения балка-стойка и предельной нагрузки на ярус.



**Рис. 6.** Первая форма потери устойчивости (деформирование модели во фронтальной плоскости). Критическая нагрузка равна 11,2 кН (эксперимент). Крутильная жесткость соединения балка-стойка вокруг оси  $Z$  равна 2820 Н·м/рад

#### 4. Заключение

В ходе работы было исследовано соединение гребенчатый зацеп (балка-стойка), который входит в состав тонкостенной конструкции стеллажа. Результаты, полученные в ходе натурных испытаний с упрощенным вариантом конструкции, сравнивались с данными компьютерного моделирования с применением метода конечных элементов. В результате анализа было установлено, что соединение балка-стойка обладает крутильной жесткостью 2820 Н·м/рад на поворот вокруг оси  $Z$ . В ходе расчетно-экспериментальных исследований было определено значение критической нагрузки на ярус, при которой в конструкции наблюдается потеря устойчивости. Величина нагрузки составила 11,2 кН.

С целью уточнения полученных данных следует провести:

- Расчетно-экспериментальное определение жесткости узлового соединения стяжка-стойка.
- Дополнительное исследование жесткости узла балка-стойка при испытании многоуровневой конструкции.
- Определение предельных величин нагрузок на ярус многоуровневых стеллажей балочного и комбинированного типа.
- Оценку влияния высоты первого нагруженного яруса на величины предельных нагрузок по условию устойчивости на балочные и комбинированные стеллажей различных типоразмеров.
- Установление причин неравномерного распределения жесткостей узлов балка-стойка, уровня снижения крутильной жесткости, а также способа учета данного эффекта в расчетах предельных нагрузок на стеллаж балочного типа по условию устойчивости.
- Расчетно-экспериментальное исследование поврежденности и живучести конструкции.

#### 5. Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-08-00845А



## Литература

- [1]. Тимошенко С.П. История науки о сопротивлении материалов: С краткими сведениями из истории теории упругости и теории сооружений: пер. с англ. Под ред. А.Н. Митинского. Изд.
- [2]. Тимошенко С.П. Об устойчивости плоской формы изгиба двутавровой балки. Известия СПб Политехнического института, т. IV—V, 1905—1906
- [3]. 2-е, стереотипное. М.: КомКнига, 2006. 536 с.
- [4]. Власов В.З. Общая теория оболочек и ее приложения в технике. М.: Гостехиздат, 1949. 784 с.
- [5]. Власов В.З. Кручение и устойчивость тонкостенных открытых профилей // Строительная промышленность, 1938. №6. С.49-53; № 7. С.55-60.
- [6]. Власов В.З. Тонкостенные упругие стержни: Прочность, устойчивость, колебания / Москва, Ленинград : Государственное издательство строительной литературы, 1940. 276 с
- [7]. Уманский А.А. Кручение и изгиб тонкостенных авиаконструкций. М.: Оборонгиз, 1939. 112 с.
- [8]. Бычков Д.В. Расчет балочных и рамных стержневых систем из тонкостенных элементов. М. 1948. 208 с.
- [9]. Бычков Д.В. Строительная механика стержневых тонкостенных конструкций. М.: Госстройиздат, 1962. 476 с.
- [10]. Бычков Д.В., Мрошинский А.К. Кручение металлических балок. М.1944. 260 с.
- [11]. Туснин А.Р. Расчет и проектирование конструкций из тонкостенных стержней открытого профиля: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. д.т.н.: Спец. 05.23.01 / А.Р. Туснин. М. 2004. 37 с.
- [12]. Рыбаков, В.А. Современные методы расчета металлоконструкций из тонкостенных профилей, Стройметалл, № 2(2). 2007. С. 36-38.
- [13]. Рыбаков В.А. Надежность металлоконструкций из тонкостенных профилей. // Научно-технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности конструкций и методы их решения: Труды Междунар. Конф. СПб., 2008. С. 292-295.
- [14]. Альхименко А.И., Ватин Н.И., Рыбаков В.А. Технология легких стальных тонкостенных конструкций. СПб: Изд-во СПбГПУ, 2008. 27 с.
- [15]. Белый Г.И. К расчету на устойчивость стержневых элементов конструкций из тонкостенных холодногнутых профилей. СПб: Вестник гражданских инженеров. 2016. № 3(56), С. 46-51.
- [16]. Волкова А.А., Пайков А.В., Столяров О.Н., Семенов С.Г., Мельников Б.Е. Структура и свойства текстильно-армированного бетона. СПб: Инженерно-строительный журнал. 2015. № 7(59). С. 50–56.
- [17]. Шилин А.А., Пшеничный В.А., Картузов Д.В. Внешнее армирование железобетонных конструкций композиционными материалами. М: Изд-во Стройиздат. 2007. 184 с.
- [18]. Бондарь В.С., Даншин В.В., Макаров Д.А. Математическое моделирование процессов деформирования и накопления повреждений при циклических нагрузениях. Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. 2014. Т. 8, № 2. С. 125-144.
- [19]. Бондарь В.С., Даншин В.В., Семенов П.В. Численное моделирование нелинейных процессов накопления повреждений при циклическом нагружении. Вычислительная механика сплошных сред. 2013. Т. 6, № 3. С. 286-291.
- [20]. Шульженко Н. Г., Гонтаровский П. П., Гармаш Н. Г., Мележик И. И.. Оценка развития трещин при многорежимном циклическом нагружении на основе анализа рассеянных повреждений материала. Динамика и прочность машин. 2015. Т. 18, № 4/2. С. 53-58.

## References

- [1]. Timoshenko S.P. Istoriya nauki o soprotivlenii materialov: S kratkimi svedeniyami iz istorii teorii uprugosti i teorii sooruzheniy: per. s angl. Pod red. A.N. Mitinskogo. [The history of the science of strength of materials: with a summary of the history of the theory of elasticity and theory of structures] Izd. (rus)
- [2]. Timoshenko S.P. Ob ustoychivosti ploskoy formy izgiba dvutavrovoy balki. [On the stability of the flat bending shape of an I-beam.] Izvestiya SPb Politekhnicheskogo instituta, Vol. IV—V, 1905—1906.
- [3]. 2-ye, stereotipnoye. M.: KomKniga, 2006. 536 p. (rus)
- [4]. Vlasov V.Z. Obshchaya teoriya obolochek i yeye prilozheniya v tekhnike. [The general theory of shells and its applications in engineering.] M.: Gostekhizdat, 1949. 784 p. (rus)
- [5]. Vlasov V.Z. Kruchenije i ustoychivost tonkostennykh otkrytykh profiley [Torsion and stability of thin-walled open profiles]. Stroitel'naya promyshlennost, 1938. No.6. Pp.49-53; No. 7. Pp.55-60. (rus)
- [6]. Vlasov V.Z. Tonkostennyye uprugije sterzhni: Prochnost, ustoychivost, kolebaniya [Thin-walled elastic rods: strength, stability, vibrations]. Moskva, Leningrad : Gosudarstvennoye izdatelstvo stroitel'noy literatury, 1940. 276 p. (rus)
- [7]. Umanskiy A.A. Kruchenije i izgib tonkostennykh aviakonstruktsiy. [Torsion and bending of thin-walled aircraft construction] M.: Oborongiz, 1939. 112 p. (rus)
- [8]. Bychkov D.V. Raschet balochnykh i ramnykh sterzhnevnykh sistem iz tonkostennykh elementov. [Calculation of beam and frame rod systems of thin-walled elements] M. 1948. 208 p. (rus)
- [9]. Bychkov D.V. Stroitel'naya mekhanika sterzhnevnykh tonkostennykh konstruktsiy. [Structural mechanics of rod thin-walled structures] M.: Gosstroyizdat, 1962. 476 p. (rus)
- [10]. Bychkov D.V., Mroshchinskiy A.K. Kruchenije metallicheskih balok. [Torsion of metal beams.] M.1944. 260 p. (rus)
- [11]. Tushin A.R. Raschet i proyektirovaniye konstruktsiy iz tonkostennykh sterzhney otkrytogo profilya: Avtoref. dis. na soisk. uchen. step. d.t.n.: [Calculation and design of structures of thin-walled rods with open profile] Spets. 05.23.01. 2004. 37 p. (rus)
- [12]. Rybakov, V.A. Sovremennyye metody rascheta metallokonstruktsiy iz tonkostennykh profiley [Modern methods for calculating metal structures from thin-walled profiles], Stroymetall, No. 2(2). 2007. Pp. 36-38. (rus)
- [13]. Rybakov V.A. Nadezhnost metallokonstruktsiy iz tonkostennykh profiley. [Reliability of metal structures from thin-walled profiles]. Nauchno-tekhnicheskiye problemy prognozirovaniya nadezhnosti i dolgovechnosti konstruktsiy i metody ikh resheniya: Trudy Mezhdunar. Konf. SPb., 2008. Pp. 292-295. (rus)
- [14]. Alkhimenko A.I., Vatin N.I., Rybakov V.A. Tekhnologiya legkikh stalnykh tonkostennykh konstruktsiy. [The technology of light steel thin-walled structures] SPb: Izd-vo SPbGPU, 2008. 27 p. (rus)
- [15]. Belyy G.I. K raschetu na ustoychivost sterzhnevnykh elementov konstruktsiy iz tonkostennykh kholodnognutyykh profiley. [The calculation on the stability of the core elements of structures made of thin-walled cold-formed profiles] Spb: Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. 2016. No.3 (56), Pp. 46-51. (rus)
- [16]. Volkova A.A., Paykov A.V., Stolyarov O.N., Semenov S.G., Melnikov B.Ye. Struktura i svoystva tekstilno-armirovannogo betona. [Structure and properties of textile-reinforced concrete.] Magazine of Civil engineering. 2015. No. 7(59). Pp. 50-56 (rus)
- [17]. Shilin A.A., Pshenichnyy V.A., Kartuzov D.V. Vneshneye armirovaniye zhelezobetonnykh konstruktsiy kompozitsionnymi materialami. [External reinforcement of reinforced concrete structures with composite materials] M: Izd-vo Stroyizdat. 2007. 184 Pp. (rus)
- [18]. Bondar V.S., Danshin V.V., Makarov D.A. Matematicheskoye modelirovaniye protsessov deformirovaniya i nakopleniya povrezhdeniy pri tsiklicheskih nagruzheniyakh. [Mathematical modeling of the processes of deformation and accumulation of damage under cyclic loading.] Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. 2014. T. 8, No.2. Pp. 125-144. (rus)
- [19]. Bondar V.S., Danshin V.V., Semenov P.V. Chislennoye modelirovaniye nelineynykh protsessov nakopleniya povrezhdeniy pri tsiklicheskom nagruzhenii. [Numerical simulation of nonlinear

- [21]. Tenek, L., A Beam Finite Element Based on the Explicit Finite Element Method International Review of Civil Engineering (IRECE). 2015. 6 (5). Pp. 124-132.
- [22]. Louise C.N., Md Othuman A.M., Ramli M. Performance of lightweight thin-walled steel sections: theoretical and mathematical considerations // Applied Science Research, 2012, №3 (5). Pp. 2847-2859
- [23]. Eurocode 3: Design of steel structures. EN 1993-1-3: 2004 Part 1-3: General rules. Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. CEN. European Committee for Standardisation. 2004.
- [24]. Keerthan P., Mahendran M. Thermal performance of load bearing cold-formed steel walls under fire conditions using Numerical studies // Journal of Constructional Steel Research, №80. 2013. Pp. 412-428.
- [25]. Sarawit A.T., Kim Y., Bakker M.M., Pekoz T. The finite element method for thin-walled members-applications // Proceedings of the 3rd ICTWS. 2001. Pp. 437-448.
- [26]. O. Soegihardjo, S. Suhardjono, B. Pramujati, A. S. Pramono, Parametric Beam Modeling to Predict the First Natural Bending Frequency of Thin Wall Box-Shaped Structures Verified Using Experimental Modal Analysis // International Review of Mechanical Engineering. 2017. T. 11, №1. Pp. 77-86.
- [27]. G. Sanyal, K. Samal, A geometry-dependent generalized shape function for calculation of stress intensity factor for axially cracked thin-walled tubes // International Journal of Advanced Structural Engineering (IJASE). 2014. T. 6. № 2.
- [28]. A.Teter, Zb. Kolakowski, Coupled dynamic buckling of thin-walled composite columns with open cross-sections // Composite Structures. 2013. T. 95. pp. 28-34.
- [29]. V. Kobelev, Thin-Walled Rods With Semiopened Profiles // Journal of Applied Mechanics, 2013. T. 80. № 1. Pp. 100-111.
- [30]. N. L. Rizzi, V. Varano, St. Gabriele, Initial post buckling behavior of thin-walled frames under mode interaction // Thin-Walled Structures. 2013. T. 68. Pp. 124-134.
- [31]. G. Janevski, P. Kozić, R. Pavlović. Moment Lyapunov exponents and stochastic stability of a thin-walled beam subjected to eccentric axial loads // Journal of Theoretical and Applied Mechanics. 2012. T. 50. № 1. pp. 61-83.
- [32]. Nekliudova U.E., Semenov A.S., Melnikov B.E., Semenov S.G. Experimental research and finite element analysis of elastic and strength properties of fiberglass composite material. // Инженерно-строительный журнал. 2014. № 3(47). С. 25-39.
- [33]. Бенин А.В., Семенов А.С., Семенов С.Г., Мельников Б.Е. Математическое моделирование процесса разрушения сцепления арматуры с бетоном Часть 1. Модели с учетом несплошности соединения // Инженерно-строительный журнал. 2013. № 5(40). С. 86-99.
- [34]. Левандовский А.Н., Мельников Б.Е., Шамкин А.А. Моделирование разрушения пористого материала // Инженерно-строительный журнал. 2017. № 1(69). С. 3-22.
- [35]. Бенин А.В., Семенов А.С., Семенов С.Г., Мельников Б.Е. Математическое моделирование процесса разрушения сцепления арматуры с бетоном. Часть 2. Модели без учета несплошности соединения. // Инженерно-строительный журнал. 2014. № 1(45). С. 23-40.
- [36]. Garifullin M., Vatin N., Jokinen T., Heinisuo M. Numerical solution for rotational stiffness of RHS tubular joints // Advances and Trends in Engineering Sciences and Technologies II - Proceedings of the 2nd International Conference on Engineering Sciences and Technologies. 2016. Pp.81-86.
- [37]. Гарифуллин М.Р., Ватин Н.И. Устойчивость тонкостенного холодногнутого профиля при изгибе – краткий обзор публикаций // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. № 6(21). С. 32-57.
- [38]. Назмеева Т.В. Несущая способность сжатых стальных тонкостенных элементов сплошного и перфорированного сечения из холодногнутого с-профиля // Инженерно- damage accumulation processes under cyclic loading.] Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred. 2013. Vol. 6, No. 3. Pp. 286-291. (rus)
- [20]. Shulzhenko N. G., Gontarovskiy P. P., Garmash N. G., Melezhhik I. I. Otsenka razvitiya treshchin pri mnogorezhimnom tsiklicheskom nagruzhenii na osnove analiza rasseyannykh povrezhdeniy materiala. [Evaluation of the development of cracks under multi-mode cyclic loading based on the analysis of scattered damage to the material.] Dinamika i prochnost mashin. 2015. T. 18, No.4/2. Pp. 53-58. (rus)
- [21]. Tenek, L., A Beam Finite Element Based on the Explicit Finite Element Method International Review of Civil Engineering (IRECE). 2015. 6 (5). Pp. 124-132.
- [22]. Louise C.N., Md Othuman A.M., Ramli M. Performance of lightweight thin-walled steel sections: theoretical and mathematical considerations. Applied Science Research. 2012. No.3 (5). Pp. 2847-2859.
- [23]. Eurocode 3: Design of steel structures. EN 1993-1-3: 2004 Part 1-3: General rules. Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. CEN. European Committee for Standardisation. 2004.
- [24]. Keerthan P., Mahendran M. Thermal performance of load bearing cold-formed steel walls under fire conditions using Numerical studies. Journal of Constructional Steel Research, No. 80. 2013. Pp. 412-428.
- [25]. Sarawit A.T., Kim Y., Bakker M.M., Pekoz T. The finite element method for thin-walled members-applications. Proceedings of the 3rd ICTWS. 2001. Pp. 437-448.
- [26]. O. Soegihardjo, S. Suhardjono, B. Pramujati, A. S. Pramono, Parametric Beam Modeling to Predict the First Natural Bending Frequency of Thin Wall Box-Shaped Structures Verified Using Experimental Modal Analysis, International Review of Mechanical Engineering. 2017. T. 11, No.1. Pp. 77-86.
- [27]. G. Sanyal, K. Samal, A geometry-dependent generalized shape function for calculation of stress intensity factor for axially cracked thin-walled tubes, International Journal of Advanced Structural Engineering (IJASE). 2014. Vol. 6. No.2.
- [28]. A.Teter, Zb. Kolakowski, Coupled dynamic buckling of thin-walled composite columns with open cross-sections, Composite Structures. 2013. Vol. 95. Pp. 28-34.
- [29]. V. Kobelev, Thin-Walled Rods With Semiopened Profiles, Journal of Applied Mechanics, 2013. Vol. 80. No.1. Pp. 100-111.
- [30]. N. L. Rizzi, V. Varano, St. Gabriele, Initial post buckling behavior of thin-walled frames under mode interaction, Thin-Walled Structures. 2013. Vol. 68. Pp. 124-134.
- [31]. G. Janevski, P. Kozić, R. Pavlović. Moment Lyapunov exponents and stochastic stability of a thin-walled beam subjected to eccentric axial loads. Journal of Theoretical and Applied Mechanics. 2012. Vol. 50. No.1. Pp. 61-83.
- [32]. Nekliudova U.E., Semenov A.S., Melnikov B.E., Semenov S.G. Experimental research and finite element analysis of elastic and strength properties of fiberglass composite material. Magazine of Civil engineering. 2014. No.3 (47). Pp. 25-39. (rus)
- [33]. Benin A.V., Semenov A.S., Semenov S.G., Melnikov B.Ye. Matematicheskoye modelirovaniye protsessa razrusheniya stsepleniya armatury s betonom Chast 1. Modeli s uchetom nesploshnosti soyedineniya. [Mathematical modeling of the process of destruction of the coupling between reinforcement and concrete Part 1. Models with regard to the discontinuity of the connection]. Magazine of Civil engineering. 2013. No. 5(40). Pp. 86-99. (rus)
- [34]. Levandovskiy A.N., Melnikov B.Ye., Shamkin A.A. Modelirovaniye razrusheniya poristogo materiala. [Simulation of the destruction of porous material]. Magazine of Civil engineering. 2017. No.1 (69). Pp. 3-22. (rus)
- [35]. Benin A.V., Semenov A.S., Semenov S.G., Melnikov B.Ye. Matematicheskoye modelirovaniye protsessa razrusheniya stsepleniya armatury s betonom. Chast 2. Modeli bez ucheta nesploshnosti soyedineniya. [Mathematical modeling of the process of destruction of reinforcement adhesion to concrete. Part 2. Models without connection discontinuity]. Magazine of Civil engineering. 2014. No.1 (45). Pp. 23-40. (rus)
- [36]. Garifullin M., Vatin N., Jokinen T., Heinisuo M. Numerical solution

- строительный журнал. 2015. № 5. С. 44.
- [39]. Vatin N.I., Nazmeeva T., Guslinsky R. Problems of Cold-Bent Notched C-Shaped Profile Members// Advanced Materials Research. 2014. T. 941-944. С. 1871-1875.
- [40]. Ватин Н.И., Синельников А.С. Большепролетные надземные пешеходные переходы из легкого холодногнутого стального профиля // Строительство уникальных зданий и сооружений 2012. №1. С. 47-53.
- [41]. Ватин Н.И., Синельников А.С. Холодногнутый стальной профиль в малых мостовых конструкциях // Строительство уникальных зданий и сооружений 2012. № 3 С. 39-51.
- [42]. Туснин А.Р. Некоторые вопросы расчета тонкостенных стальных конструкций // Научное обозрение. 2015. № 11. С. 79-82.
- [43]. Туснин А.Р., Туснина О.А. Вычислительная система «Сталькон» для расчета и проектирования стержневых конструкций из тонкостенных стержней открытого профиля // Промышленное и гражданское строительство. 2012. № 8. С. 62-64.
- [44]. Туснин А.Р. Особенности численного расчета конструкций из тонкостенных стержней открытого профиля // Промышленное и гражданское строительство. 2010. № 11. С. 60-62.
- [45]. Лалин В.В., Рыбаков В.А. Конечные элементы для расчета ограждающих конструкций из тонкостенных профилей // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 8. С. 69-80.
- [46]. Лалин В.В., Рыбаков В.А., Морозов С.А. Исследование конечных элементов для расчета тонкостенных стержневых систем // Инженерно-строительный журнал. 2012. Т. 27. № 1. С. 53-73.
- [47]. Дьяков С.Ф., Лалин В.В. Построение и анализ конечных элементов стержня открытого профиля с учетом деформаций сдвига и кручения // Вестник Пермского государственного технического университета. Охрана окружающей среды, транспорт, безопасность жизнедеятельности. 2011. № 2. С. 130-140.
- [48]. Зверев В.В., Семенов А.С. Влияние податливости болтовых соединений на деформативность фермы из тонкостенных профилей // Научный журнал строительства и архитектуры. 2008. № 2. С. 9-17.
- [49]. Подзоров А.В., Зверев В.В., Тезиков Н.Ю., Жидков К.Е., Карманов И.В. Редуцирование площади поперечного сечения стального профиля при центральном сжатии.// Строительная механика и расчет сооружений. 2015. № 6(263). С. 24-28.
- [50]. Подзоров А.В., Зверев В.В., Тезиков Н.Ю., Карманов И.В., Жидков К.Е. Имитационное моделирование напряженно-деформированного состояния тонколистового профилированного элемента с двойным гофрированием // Наука и бизнес: пути развития. 2015. № 5. С. 103-105.
- [51]. Бондарь В.С., Даншин В.В., Семенов П.В., Нелинейные процессы накопления повреждений при циклических нагрузках // Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского. 2013. № 2. С. 96-14.
- [52]. Адегова Л.А., Рудзей Г.Ф. Прогнозирование расчетной усталости долговечности элементов конструкций с применением модифицированных кривых усталости // Известия Транссиба 2014. № 2. С. 86-94.
- [53]. Арутюнян Р.А., Проблемы усталости и вероятностные методы ее решения // Вестник Российского Фонда Фундаментальных Исследований. 2006. № 2. С. 47-60.
- [54]. Адегова Л.А., Применение модифицированных кривых усталости для расчетной оценки долговечности тонкостенных элементов конструкций // Известия высших учебных заведений. 2015. № 2. С. 92-98.
- [55]. Мельников Б.Е., Кузнецов Н.П., Митюков А.Г., Семенов А.С., Семенов С.Г., Применение энергетической модели оценки прочности при нескольких циклах нагружения в случае сложного неоднородного напряженного состояния // Современные проблемы ресурса материалов и конструкций. 2009. С. 140-147.
- for rotational stiffness of RHS tubular joints. Advances and Trends in Engineering Sciences and Technologies II - Proceedings of the 2nd International Conference on Engineering Sciences and Technologies. 2016. Pp.81-86.
- [37]. Garifullin M.R., Vatin N.I. Ustoychivost tonkostennogo kholodnognutogo profilya pri izgibe – kratkiy obzor publikatsiy. [The stability of a thin-walled cold-formed profile during bending - a brief review of publications]. Construction of Unique Buildings and Structures. 2014. No.6 (21). Pp. 32-57. (rus)
- [38]. Nazmeyeva T.V. Nesushchaya sposobnost szhatykh stalnykh tonkostennykh elementov sploshnogo i perforirovannogo secheniya iz kholodnognutogo s-profilya. [Bearing capacity of compressed steel thin-walled elements of solid and perforated section from cold-formed c-profile]. Magazine of Civil engineering. 2015. No.5. Pp. 44. (rus)
- [39]. Vatin N.I., Nazmeeva T., Guslinsky R. Problems of Cold-Bent Notched C-Shaped Profile Members. Advanced Materials Research. 2014. T. 941-944. Pp. 1871-1875.
- [40]. Vatin N.I., Sinelnikov A.S. Bolsheproletnyye nadzemnyye peshekhodnyye perekhody iz legkogo kholodnognutogo stalnogo profilya. [Span elevated crosswalks lightweight cold-formed steel section]. Construction of Unique Buildings and Structures. 2012. No.1. Pp. 47-53. (rus)
- [41]. Vatin N.I., Sinelnikov A.S. Kholodnognutyy stalnoy profil v malykh mostovykh konstruksiyakh. [Cold-formed steel profile in small bridge structures]. Construction of Unique Buildings and Structures. 2012. No.3 Pp. 39-51. (rus)
- [42]. Tusnin A.R. Nekotoryye voprosy rascheta tonkostennykh stalnykh konstruksiy. [Some issues of calculating thin-walled steel structures]. Nauchnoye obozreniye. 2015. No.11. Pp. 79-82. (rus)
- [43]. Tusnin A.R., Tushina O.A. Vychislitel'naya sistema «Stalkon» dlya rascheta i proyektirovaniya sterzhnevyykh konstruksiy iz tonkostennykh sterzhney otkrytogo profilya. [Computing system "Stalkon" for the calculation and design of core structures of thin-walled rods open profile]. Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitelstvo. 2012. No.8. Pp. 62-64. (rus)
- [44]. Tusnin A.R. Osobennosti chislennogo rascheta konstruksiy iz tonkostennykh sterzhney otkrytogo profilya. [Features of the numerical calculation of designs of thin-walled rods open profile]. Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitelstvo. 2010. No.11. Pp. 60-62. (rus)
- [45]. Lalin V.V., Rybakov V.A. Konechnyye elementy dlya rascheta ograzhdayushchikh konstruksiy iz tonkostennykh profilyey. [Finite elements for the calculation of enclosing structures of thin-walled profiles]. Magazine Of Civil Engineering. 2011. No.8. Pp. 69-80. (rus)
- [46]. Lalin V.V., Rybakov V.A., Morozov S.A. Issledovaniye konechnykh elementov dlya rascheta tonkostennykh sterzhnevyykh sistem. [The study of finite elements for the calculation of thin-walled rod systems]. Magazine Of Civil Engineering. 2012. T. 27. No.1. Pp. 53-73. (rus)
- [47]. Dyakov S.F., Lalin V.V. Postroyeniye i analiz konechnykh elementov sterzhnya otkrytogo profilya s uchetom deformatsiy sdviga i krucheniya. [Construction and analysis of finite elements of an open profile bar with allowance for shear and torsion deformations]. Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Okhrana okruzhayushchey sredy, transport, bezopasnost zhiznedeyatelnosti. 2011. No.2. Pp. 130-140. (rus)
- [48]. Zverev V.V., Semenov A.S. Vliyaniye podatlivosti boltovykh soyedineniy na deformativnost fermy iz tonkostennykh profilyey. [Influence of compliance of bolted joints on the deformability of a truss from thin-walled profiles]. Nauchnyy zhurnal stroitelstva i arkhitektury. 2008. No.2. Pp. 9-17. (rus)
- [49]. Podzorov A.V., Zverev V.V., Tezikov N.Yu., Zhidkov K.Ye., Karmanov I.V. Redutsirovaniye ploshchadi poperechnogo secheniya stalnogo profilya pri tsentralnom szhatii. [Reducing the cross-sectional area of the steel profile with a central compression]. Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy. 2015. No.6 (263). Pp. 24-28. (rus)
- [50]. Podzorov A.V., Zverev V.V., Tezikov N.Yu., Karmanov I.V., Zhidkov K.Ye. Imitatsionnoye modelirovaniye napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya tonkolistovogo profilirovannogo elementa s dvoynym gofirovaniyem. [Simulation of the stress-strain state of a thin-profiled sheet with double corrugation]. Nauka