## Моделирование узла винтового соединения тонкостенных стальных перфорированных профилей методом конечных элементов

# Modeling node screwing thin perforated steel profiles by finite element method

#### инженер Саламахин Степан Владимирович

ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет +7(963) 341 2625; forstep @mail.ru Санкт-Петербург Российская Федерация

> Engineer Stepan Vladimirovich Salamakhin Saint-Petersburg State Polytechnical University +7(963) 341 2625; forstep @mail.ru Saint-Petersburg Russian Federation

аспирант Синельников Алексей Сергеевич ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет +7 (911) 706 6001; alexey\_sinelnikov@mail.ru Санкт-Петербург Российская Федерация

> Post-graduate student Aleksei Sergeevich Sinelnikov Saint-Petersburg State Polytechnical University +7 (911) 706 6001; alexey\_sinelnikov@mail.ru Saint-Petersburg Russian Federation

> > 53

Ключевые слова: контактная задача в Лире, схема из объемных КЭ в Лире, узлы тонкостенных стальных перфорированных профилей, винтовое соединения ЛСТК, расчет узлов ЛСТК.

В статье рассмотрены основные методы моделирования винтовых соединений, рассмотрен наиболее подходящий способ моделирования в программном комплексе доступном рядовому инженеру.

Представлен способ построения расчетной схемы из объемных конечных элементов, рассмотрен пример моделирования контактной задачи, с применением объемных конечных элементов.

Данный способ моделирования можно применять при моделировании винтового соединения, в процессе проектирования конструктивных элементов из тонкостенных стальных перфорированных профилей.

**Key words:** contact problem in Lira, the scheme of the three-dimensional finite element in Lira, components precision steel perforated profiles, screw connection LSTC, the calculation nodes LSTC.

In this paper, the main methods of modeling bolted connections, is considered the most appropriate way of modeling in the software package available for an average engineer.

A method for the construction of three-dimensional design scheme of finite elements is considered an example of modeling the contact problem with the use of three-dimensional finite element analysis.

This modeling method can be used for modeling a screw connection there, in the design of structural elements of perforated thin-walled steel profiles.

## 1. Введение

Холодногнутые тонкостенные стальные перфорированные профили активно применяются в строительстве зданий и сооружений, металлоемкость которых значительно ниже традиционных конструктивных элементов. При моделировании ЛСТК [1, 2, 3, 4] применяется метод конечных элементов, который реализован в ПК Лира 9.6.

ПК Лира 9.6 -это многофункциональный программный комплекс, предназначенный для проектирования и расчета строительных конструкций различного назначения. Расчеты в программе выполняются как на статические, так и на динамические воздействия. Основой расчётов является метод

конечных элементов (МКЭ). Различные подключаемые модули (процессоры) позволяют делать подбор и проверку сечений стальных и железобетонных конструкций, моделировать узловые элементы как объемными КЭ61, так и стержневыми и пластинчатыми КЭ.



Рис. 1. Расчетная схема винтового соединения

Тонкостенный профиль с продольной перфорацией основной полки (называемый часто термопрофилем) не образует мостики холода и, в сочетании с эффективным утеплителем, позволяет создавать конструкции стен, перекрытий и покрытий с высоким сопротивлением теплопередаче [4]. Моделирование такого просечного профиля и расчет конструкций из него представляет большую сложность, чем из непросечного [1, 3, 5, 15-19], особенно если это профили, имеющие отверстия сложной формы на нескольких полках, используемые в стеллажных системах [8]. Моделирование данной задачи реализовано в SCAD Office [6], однако моделирование работы винтовых соединений ЛСТК мало описано в литературе.

Основной задачей данной работы стала разработка методики построения конечно-элементной расчетной модели узла винтового соединения ЛСТК. Расчетная модель такого сопряжения представлена на рисунке 1.

## 2. Геометрические характеристики профиля ТНс 250-50-2,0



Рис. 2. Профиль ТНс 250-50-2,0

Обозн.	Параметр	Значение	Единицы измерения
А	Площадь поперечного сечения	5.928	СМ <sup>2</sup>
α	Угол наклона главных осей инерции	0	град
ly	Момент инерции относительно центральной оси Y1 параллельной оси Y	578.644	CM <sup>4</sup>
Ι <sub>z</sub>	Момент инерции относительно центральной оси Z1 параллельной оси Z	13.079	CM <sup>4</sup>
W <sub>u+</sub>	Максимальный момент сопротивления относительно оси U	45.659	СМ <sup>3</sup>
W <sub>u-</sub>	Минимальный момент сопротивления относительно оси U	45.659	СМ <sup>3</sup>
W <sub>v+</sub>	Максимальный момент сопротивления относительно оси V	3.102	СМ <sup>3</sup>
W <sub>v-</sub>	Минимальный момент сопротивления относительно оси V	13.297	СМ <sup>3</sup>

Таблица 1

Саламахин С. В., Синельников А. С. Моделирование узла винтового соединения тонкостенных стальных перфорированных профилей методом конечных элементов. /

54

Salamakhin S. V., Sinelnikov A. S. Modeling node screwing thin perforated steel profiles by finite element method. ©

Обозн.	Параметр	Значение	Единицы измерения
۱ <sub>u</sub>	Максимальный момент инерции	578.644	СМ <sup>4</sup>
١ <sub>v</sub>	Минимальный момент инерции	13.079	СМ <sup>4</sup>
i <sub>u</sub>	Максимальный радиус инерции	9.88	СМ
iv	Минимальный радиус инерции	1.485	СМ
У <sub>m</sub>	Координата центра масс по оси Ү	0.969	СМ
Zm	Координата центра масс по оси Z	-0.003	СМ

Результатом моделирования предлагаемым способом станет трехмерная модель винтового сопряжения двух профилей АИ THc 250-50-2,0, состоящая из объемных 6-ти и 8-ми угольных конечных элементов. Процесс создания модели можно разбить на два основных этапа. На первом этапе нужно создать пространственную модель, состоящую из КЭ «оболочек», а именно пластин. Данный метод весьма подробно описан в статье А.О. Гордеевой [9], потому в данной работе эта часть подробно не описана. На втором этапе производится преобразование плоских «оболочек» схемы в объемные 6-ти и 8-ми угольные конечные элементы.

## 3. Первый этап моделирования

В результате моделирования по способу, описанному в статье Гордеевой А. О. [9], мы получаем модель, состоящую из КЭ «оболочек», ее вид представлен на рисунке 4. Производим импорт в формате «dxf» данной модели в ПК Лира 9.6

Производим дальнейшие преобразования модели представленной на рисунке 4. В результате несложных операций копирования, перемещения элементов, получаем модель сопряжения двух профилей, представленную на рисунке 5. При этом необходимо учесть тот факт, что нам нужно намерено «исказить» горизонтальный профиль увеличив высоту его сечения на 4,2 мм (по 2,1 мм с каждой стороны), это необходимо сделать для того, чтобы плоские элементы КЭ сетки профилей не слиплись. Результат преобразования представлен на рисунке 4.1





Рис. 4. Модель профиля АИ THc 250-50-2,0

Рис. 4.1. Результат преобразования размера горизонтального профиля



Рис. 5. Модель узла из профилей АИ ТНс 250-50-2,0 Рис. 6. Геометрическое преобразование сетки КЭ

После создания модели из пластин «оболочек» необходимо наметить расположение винтов и смоделировать их. В местах расположения винтов производим корректировку сетки КЭ элементов таким образом, чтобы получились общие координаты у узлов (по полкам) двух соединяемых профилей (на рисунке 6 выделены по 8 узлов на каждом винте), это необходимо для дальнейшего моделирования винтов, на месте каждой из 4-х удаленных областей появится сделанная отдельно «заготовка» винтового соединения. Создание самой заготовки болта можно выполнить в отдельном файле, а затем выполнить ее постановку в схему (см. рис.6) с помощью функции «сборка схем». Произведем создание болта, для этого создадим новый расчетный файл, предварительно замерив расстояния между узлами отмеченными на рисунке 6.

На рисунке 7 показано какие узлы необходимо добавить в новой схеме, расстояния между узлами 1-8 соответствуют схеме 6 (одному из посадочных мест для винта), точка А- геометрический центр узлов 1-8, расстояние Д А – это радиус винта, расстояние Д Г – это Д А+0,1мм, расстояние Б А- это внешний радиус пресс шайбы,или головки винта, Б В – это расстояние Б А смещенное на 15% вправо, Д` Г` аналогичны Б А.



Далее выбираем функцию "Добавление пластинчатых элементов" и создаем оболочки по узлам А, Б, В, Г, Д, Д`, Г`, результат представлен на рисунке 8.

Далее выбираем функцию «копирование объектов поворотом», выделяем пластинчатые элементы и их узлы, отмечаем узел А, в качестве базового, указываем угол Fi=15, количество N =24 и получаем результат, как на рисунке 9.



## Рис. 9. Копирование поворотом пластинчатых элементов



Рис. 10. Добавление в схеме пластинчатых элементов

57

После создания круговой модели будущего винта, необходимо связать его с узлами 1-8, которые относятся уже с модели профиля. Для соединения используем функцию «добавление пластинчатых элементов» и создаем оболочки соединяющие узлы 1-8 и узлы созданной круговой модели, результат на рисунке 10. Производим сборку двух схем с помощью команды «сборка схем», затем производим копирование вставленной модели винта по оставшимся 3-м посадочным местам, результат представлен на рисунке 11.



## 4. Второй этап моделирования

Произведем преобразование расчетной схемы созданной из оболоченных элементов в объемные КЭ с помощью функции «перемещение образующей». Производим инверсную фрагментацию элементов, добавленных на предыдущем шаге, т.е. инверсно фрагментируем модель винта, в итоге возвращаемся к схеме, отображенной на рисунке 6. Теперь нужно поочередно выделять и обрабатывать элементы профилей (отдельно полки, отдельно стенки) по следующему алгоритму:

- 1. Выделение необходимой части профиля (полки, либо стенки)
- 2. В меню «перемещение образующей» выбор направления выдавливания объемных тел из пластин.
- 3. В меню «перемещение образующей» выбор параметра «создание объемных тел»
- 4. В меню «перемещение образующей» n = 2 кол-во образующих вдоль выдавливания.
- 5. В меню «перемещение образующей» dX либо dУ, dZ это параметр одновременно и величины на катороую нужно выдавить элемент, создав объемны КЭ, и параметр направления, при этом от знака « « или «+» зависти направление выдавливания, вдоль выбранной оси.

В результате данных преобразований, получается схема состоящая из 6-ти и 8-ми угольных объемных КЭ, результат изображен на рисунке 12.



Рис. 12. Результат преобразований. А - исходное состояние, Б- результат

Производим создание объемных конечных элементов из оболоченной части, моделирующей винтовое соединение. Произведем преобразование расчетной схемы созданной из оболоченных элементов в объемные КЭ с помощью функции «перемещение образующей». Производим фрагментацию элементов, добавленных ранее, то есть фрагментируем модель винта, в итоге возвращаемся к схеме, отображенной на рисунке 10.



Рис. 13. Результат преобразований

Выделенную плоскую модель, необходимо обработать по принципу, описанному выше, результат отображен на рисунке 13. Полученную модель винта необходимо скопировать/установить по всем местам установки на схеме.

### 5. Моделирование винтового сопряжения

Перед началом работы по моделированию винтового соединения был проведен обзор литературы с описанием решения схожих задач, а также предпринят ряд проверочных расчетов для определения параметров анализа и выбора способа задания модели винта в соединении.

Обширный обзор методов моделирования болтовых соединений представлен в источниках [10, 11]. Основываясь на представленном опыте, рассмотрим основные подходы, применяемые к моделированию болтовых соединений. Так, в статье Adams и Askenazi [12] представлен обзор типов моделирования болтовых соединений. Перед моделированием болтового соединения необходим учет характера воздействующих на него нагрузок, а именно - работает ли соединение на срез (возникает необходимость учета жесткости самого болта), растяжение или на сжатие (влияние жесткости болта оказывает меньшее значение). В зависимости от этого назначается и уровень детализации модели. Из опыта исследований выделено шесть способов моделирования болтовых соединений: Первым, наиболее простым способом моделирования является способ моделирования соединения без элемента болта. В этом случае преднатяжение, создаваемое болтом, моделируется поверхностно распределенной нагрузкой в области предполагаемой прижимной головки болта рисунке 14а.



Рис. 14. Моделирование работы соединения без учета жесткости болта

Благодаря своей простоте, представленный метод позволяет произвести расчет в короткий срок. Также считается, что если соединение не будет разделяться, то нет необходимости учитывать жесткость болта [13]. Однако, без учета жесткости болта не будет учитываться и передача нагрузки через болт. Судить о напряжениях в болтовом соединении в таком случае можно по величине давления на контактирующих поверхностях, а также по величине зазора между ними.

Второй способ, с моделированием так называемого «связанного» болта рисунке 14.6, предполагает, что линейные элементы моделируют тело болта, а связанные узлы на поверхности соприкасающихся пластин с линейными элементами — шляпку и шайбу. «Связанный» болт передаёт вертикальную нагрузку без использования линейных или твердотельных элементов. Современные программные комплексы позволяют при использовании линейных элементов, моделирующих тело болта, задавать преднатяжение. Для этого существуют специальные элементы, например, «фаркопф» в комплексе Лира. В таком случае оказывается возможным задавать требуемое усилие натяжения в болтовом соединении. Однако, при этом отсутствует возможность учета жесткости болта, соответственно нельзя моделировать сдвиговые или изгибные соединения.

При моделировании болтового соединения третьим способом, с использованием жестко - связанных элементов (рис. 4.2), а линейные элементы используются для моделирования тела болта, а жесткие элементы -для моделирования шляпки и шайбы.



Рис. 15. Моделирование с использованием жестко-связанных элементов а) и из линейных элементов б).

Узлы на поверхности соприкасающихся элементов соединяются жесткими элементами с линейным элементом тела болта для получения единого болтового соединения. Такой способ позволяет передавать все нагрузки, включая сдвиговые, с пластин на болт, без использования линейных или твердотельных элементов. Таким способом создается возможность учитывать преднатяжение, если часть линейных элементов тела болта задать в виде линейных элементов с преднатяжением («фаркопф»).

В четвертом способе моделирования, модель болта из линейных элементов предполагает моделирование линейными элементами шляпки, шайбы и тела болта, рисунке 15 б). Узлы на поверхности соприкасающихся пластин имеют связи с узлами на теле болта простыми линейными связевыми элементами, что позволяет учитывать как растяжение/сжатие болта, так и его изгиб. При этом количество элементов сетки незначительно по сравнению с гибридным или твердотельным болтом.

При моделировании пятым способом тело болта, и его шляпка задаются объемными КЭ типа 34, 36. Для моделирования винтового сопряжения используется

КЭ 236 – « двухузловой КЭ односторонней упругой связи между узлами». На рисунке 16 изображены следующие элементы:

1- объемный КЭ 34 «тело» сопрягаемого профиля,

- 2 объемный КЭ 34 «тело» винта
- 3 КЭ 236 « двухузловой КЭ односторонней упругой связи между узлами» работающий на сжатие.
- 4 КЭ 236 « двухузловой КЭ односторонней упругой связи между узлами» работающий на сжатие.



#### Рис. 16. Моделирование с использованием объемных и специальных конечных элементов

Далее производится стандартное загружение расчетной схемы, в данном случае нагрузка принималась равной разрушающей, полученной по результатам эксперимента [14] 13кН. Данная задача решалась в нелинейной постановке, т.к. в расчетной схеме присутствуют конечные элементы односторонней упругой связи между узлами, благодаря которым реализовано сопряжение болта с пластинами. Нелинейный расчет моделируется с помощью диалогового окна « моделирование нелинейных загружений конструкций», в этом окне принимались следующие параметры: метод расчета - простой пошаговый, число итераций=300, количество шагов = 7 (в данном случае принимается 8 шагов, как в экперименте), Печатать = усилия и перемещения после каждого шага.

### 6. Результат расчета узлового соединения

Результат деформации узлового соединения ЛСТК представлен ан рисунке 17, напряжения на рисунке 18, далее рассмотрим деформации, усилия около винтового соединения. Для анализа напряжений необходимо выполнить расчет главных и эквивалентных напряжений, для этого вызываем расчет «Литера», по теории прочности – «Энергетическая теория (Губер-Хенки-Мизес)», данная теория, в соответствии с требованиями [14] вычисляет и показывает напряжения, которые можно сравнивать с Ry материала.



Рис. 17. Результат деформации соединения ЛСТК



Рис. 18. Деформация соединения в разрезе

Рис.19. Деформация пластины полки профиля

Рис. 20. Деформация соединения

## 7. Выводы

1. В настоящей статье рассмотрены основные методы моделирования винтовых соединений,

2. Рассмотрен наиболее подходящий способ моделирования в программном комплексе доступном рядовому инженеру.

3. Представлен способ построения расчетной схемы из объемных конечных элементов.

4. Данный способ моделирования возможно применять при моделировании винтового соединения, в процессе проектирования конструктивных элементов из ЛСТК.

#### Литература

- 1. Ватин Н. И., Попова Е. Н. Термопрофиль в легких стальных строительных конструкциях. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2006. 63 с.
- 2. Юрченко В. В. Проектирование каркасов зданий из тонкостенных холодногнутых профилей в среде SCAD Office // Инженерно-строительный журнал. 2010. №8(18). С. 38-46.
- 3. Смазнов Д. Н. Устойчивость при сжатии составных колонн, выполненных из профилей из высокопрочной стали // Инженерно-строительный журнал. 2009. №3(5). С. 42-49.
- 4. Кузьменко Д. В., Ватин Н. И. Ограждающая конструкция «нулевой толщины» термопанель // Инженерностроительный журнал. 2008. № 1. С. 13-21.
- 5. Ватин Н. И., Рыбаков В. А. Расчет металлоконструкций: седьмая степень свободы // СтройПРОФИЛЬ. 2007. №2(56). С. 60-53.
- 6. Васылев В. Н., Гаранжа И. М. Особенности построения расчетной конечно элементной модели многогранных гнутых стоек в программно вычислительном комплексе SCAD Office // Металлические конструкции. 2009. Т. 15. №2. С. 133-140.
- 7. Интегрированная система для расчета и проектирования несущих конструкций зданий и сооружений SCAD Office. Новая версия, новые возможности / Перельмутер А. В., Криксунов Э. З., Карпиловский В. С., Маляренко А. А. // Инженерно-строительный журнал. 2009. № 2. С. 10-12.
- 8. Bajoria K. M., Sangle K. K., Talicotti R. S. Stability Analysis Of 3-d Conventional Pallet Rack Structures With Semi-rigid Connections // International Journal of Advanced Structural Engineering. Vol. 1. No. 2. Pp. 153-181.
- 9. Ватин Н. И., Гордеева А. О. Расчетная конечно-элементная модель холодногнутого перфорированного тонкостенного стержня в программно-вычислительном комплексе SCAD Office // Инженерностроительный журнал. 2011. № 3. С. 36-46.
- 10. Bickford J. H. An introduction to the design and behavior of bolted joints, 3r d edition. 78 p.
- 11. Spotts M. F. Design of Machine Elements, Prentice-Hall: New Jersey, 1978. 5th edition. 198 p.
- 12. Adams V., Askenazi A., Building Better Products with Finite Element Analysis, OnWordPress: New Mexico, 1999, 1st printing. 159 p.
- 13. VDI 2230 Systematic Calculation of High Duty Bolted Joints with One Cylindrical Bolt. 2001. 34 p.
- 14. СНиП П-23-81\* Стальные конструкции.
- 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.
- 16. Ватин Н. И., Синельников А. С. Холодногнутый стальной профиль в малых мостовых конструкциях // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2012. №3. С. 39-51.
- 17. Лалин В. В., Константинов И. А., Лалина И. И. Десять лет использования программы SCAD в учебном процессе по дисциплинам строительная механика, теория упругости и динамика сооружений // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2012. №5. С. 21-25.
- 18. Долговечность оцинкованных стальных конструкций в жилых зданиях / International Zinc Association, National Association of Home Builders, Синельников А.С., Цафт М., Коган М. // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2013. № 1. С. 11-17.
- 19. Vatin N. I, Sinelnikov A. S. Strength and durability of thin-walled cross-sections // Design, fabrication and economy of metal structures. 2013. Pp. 165-170.
- 20. 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.

 Куражова В. Г., Назмеева Т. В. Виды узловых соединений в легких стальных тонкостенных конструкциях // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 3. С. 47-52.

#### References

- 1. Vatin N. I., Popova E. N. Termoprofil' v legkikh stal'nykh stroitel'nykh konstruktsiiakh. SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2006. 63 p. (rus)
- Iurchenko V. V. Proektirovanie karkasov zdanii iz tonkostennykh kholodnognutykh profilei v srede SCAD Office // Magazine of civil engineering. 2010. No. 8(18). Pp. 38-46. (rus)
- Smaznov D. N. Ustoichivost' pri szhatii sostavnykh kolonn, vypolnennykh iz profilei iz vysokoprochnoi stali // Magazine of civil engineering. 2009. No. 3(5). Pp. 42-49. (rus)
- Kuz'menko D. V., Vatin N. I. Ograzhdaiushchaia konstruktsiia «nulevoi tolshchiny» termopanel' // Magazine of civil engineering. 2008. No. 1. Pp. 13-21. (rus)
- 5. Vatin N. I., Rybakov V. A. Raschet metallokonstruktsii: sed'maia stepen' svobody // StroiPROFIL'. 2007. No. 2(56). Pp. 60-53. (rus)
- Vasylev V. M., Garanzha I. M. Peculiarities plotting a design finite element model of polyhedral bent bays in the computer system SCAD Office // Metallicheskiye konstrukcii. 2009. Vol. 15. No. 2. Pp. 133-140. (rus)
- Integrirovannaia sistema dlia rascheta i proektirovaniia nesushchikh konstruktsii zdanii i sooruzhenii SCAD Office. Novaia versiia, novye vozmozhnosti / Perel'muter A. V., Kriksunov E. Z., Karpilovskii V. S., Maliarenko A .A. // Magazine of civil engineering. 2009. No. 2. Pp. 10-12. (rus)
- 8. Bajoria K. M., Sangle K. K., Talicotti R. S. Stability Analysis Of 3-d Conventional Pallet Rack Structures With Semi-rigid Connections // International Journal of Advanced Structural Engineering. Vol. 1. No. 2. Pp. 153-181.
- Vatin N.I., Gordeeva A.O. Raschetnaia konechno-elementnaia model' kholodnognutogo perforirovannogo tonkostennogo sterzhnia v programmno-vychislitel'nom komplekse SCAD Office // Magazine of civil engineering. 2011. No. 3. Pp. 36-46. (rus)
- 10. Bickford J. H. An introduction to the design and behavior of bolted joints, 3r d edition. 78 p.
- 11. Spotts M.F. Design of Machine Elements, Prentice-Hall: New Jersey, 1978. 5th edition. 198 p.
- 12. Adams V., Askenazi A., Building Better Products with Finite Element Analysis, OnWordPress: New Mexico, 1999, 1st printing. 159 p.
- 13. VDI 2230 Systematic Calculation of High Duty Bolted Joints with One Cylindrical Bolt. 2001. 34 p.
- 14. SNiP P-23-81\* Steel structures. (rus)
- 15. Vatin N. I., Sinelnikov A. S. Long span footway bridges: coldformed steel cross-section // Construction of unique buildings and structures. 2012. No. 1. Pp. 47-53. (rus)
- Vatin N. I., Sinelnikov A. S. Footway bridges: cold formed steel cross-section // Construction of unique buildings and structures. 2012. No.3. Pp. 39-51. (rus)
- Lalin V. V., Konstantynov I. A., Lalina I. I. The use of SCAD soft in education on structural mechanics, elasticity theory, structural dynamics for ten years // Construction of unique buildings and structures. 2012. No. 5. Pp. 21-25. (rus)
- Durability of galvanized steel framing in residential buildings / International Zinc Association, National Association of Home Builders, Sinelnikov A. S., Tsaft M., Kogan M. // Construction of unique buildings and structures. 2013. No. 1. Pp. 11-17. (rus)
- 19. Vatin N. I., Sinelnikov A. S. Strength and durability of thin-walled cross-sections // Design, fabrication and economy of metal structures. 2013. Pp. 165-170.
- Lalin V. V., Rybakov V. A., Morozov S. A. Issledovaniye konechnyh elementov dlya rescheta sterzhnevyh sistem // Magazine of civil engineering. 2012. Vol. 27. No. 1. Pp. 53-73.
- 21. Kurazhova V. G., Nazmeeva T. V. Vidy uzlovyh soedinenij v legkyh stalnyh tonkostennyh konstruktsiyah // Magazine of civil engineering. 2011. No. 3. Pp. 47-52.