



УДК 624.014 P36

**Низамеев В.Г.** – кандидат физико-математических наук, доцент

E-mail: [nizameev\\_kisi@mail.ru](mailto:nizameev_kisi@mail.ru)

**Башаров Ф.Ф.** – ведущий инженер

E-mail: [fanzikbashar@mail.ru](mailto:fanzikbashar@mail.ru)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

### **Исследование несущей способности профилированного настила при внецентренном сжатии с учетом закритической его работы**

#### **Аннотация**

С использованием программного пакета Femap&Nastran проведены численные исследования местной устойчивости и НДС в закритической стадии работы профилированного настила. В исследованиях использована конечно-элементная модель, позволяющая учитывать физическую и геометрическую нелинейность. По результатам численных исследований построены предельные кривые в плоскости обобщенных усилий  $N$  и  $M$  и проведен сравнительный анализ полученных графиков с расчетами по Еврокоду 3.

**Ключевые слова:** профилированный настил, закритическая работа, местная устойчивость, изгиб, внецентренное сжатие, физическая и геометрическая нелинейность, предельные кривые.

Стальной профилированный настил, в отличие от традиционных стальных конструкций, имеет следующие особенности [1]:

1) в профилях используется оцинкованная сталь высокого качества толщиной  $0,6 \div 1,5$  мм;

2) поперечное сечение профилей тонкостенное, т.е. отношение высоты стенки или ширины полки к толщине может достигать до  $h_{ef}/t = 200 \dots 300$  (к примеру, в традиционных стальных конструкциях отношение  $h_{ef}/t$  не более  $80 \dots 110$ );

3) тонкостенность с одной стороны обуславливает высокую жесткость сечения, а с другой – элементы профнастила подвержены местной потери устойчивости.

Основная особенность работы стального профилированного настила заключается в том, что в процессе его нагружения может происходить потеря местной устойчивости отдельных участков полки и стенки сечения, которые выключаются из дальнейшей работы. При этом разрушение профнастила в целом не происходит, и он может воспринимать дальнейшее увеличение нагрузки (с меньшей жесткостью) [2].

Стальной профилированный настил в основном применяется как ограждающая конструкция и работает на поперечный изгиб. На российском рынке имеется множество типов конструктивных форм профилированного настила с разной высотой сечения, которые изначально разработаны как тонкостенные изгибаемые элементы. При этом закритическая работа профиля на поперечный изгиб учитывается редуцированием геометрических характеристик сечения. Согласно п.5.1 СТО-0043-2005 при определении моментов сопротивления расчетная ширина сжатых плоских участков принимается равной  $40t$  (где  $t$  – толщина профиля), при определении моментов инерции –  $60t$ .

В практике строительства есть примеры использования профилированного настила в качестве верхнего пояса пространственных панелей [3-8]. В отличие от традиционного назначения в данных конструкциях профилированный настил работает на совместное действие изгибающего момента и продольной сжимающей силы. Анализ исследований [9-11] и нормативной литературы [12] по расчету стальных тонкостенных элементов показал, что в этом случае работа профиля существенно отличается, поэтому геометрические характеристики сечения, приведенные в ГОСТ 24045, не могут быть использованы для расчета профилированного настила в конструкциях типа [3-8]. Таким образом, актуальной задачей является исследование несущей способности профилированного настила на внецентренное сжатие с учетом его закритической стадии работы. Для оценки несущей способности были выполнены численные исследования для

одной гофры профилированного настила марки Н75-750-0.7 и определены предельные значения изгибающего момента и продольной силы.

Решение поставленной задачи состояло из следующих этапов:

- 1) обзор отечественной и зарубежной научной литературы и нормативной документации по расчету тонкостенных холодногнутых профилей;
- 2) создание КЭ модель для численных исследований поведения профилированного настила, учитывающую закритическую работу профиля;
- 3) численные исследования для различных комбинаций нагрузок  $N$ ,  $M$  с учетом физической и геометрической нелинейности;
- 4) по результатам исследований построение предельных кривых в плоскости обобщенных усилий  $N$ ,  $M$ ;
- 5) используя рекомендации Еврокода 3, определение предельных значения  $N$  и  $M$ ; построение соответствующих графиков;
- 6) анализ полученных результатов.

### Конечно-элементная модель для исследований

Программных комплексов для моделирования тонкостенных конструкций с учетом их закритической стадии работы не так много. Анализ научной литературы показывает, что для численного моделирования подобных конструкций в основном используются две программные комплексы – это Ansys и Nastran, в которых реализуется геометрическая и физическая нелинейность. В данных программах решатели позволяют использовать нелинейную зависимость перемещений от нагрузки и производить вычисления, даже когда узловые перемещения во много раз превышают толщину элемента. Появляется возможность вычислить критические силы, соответствующие формам местной потери устойчивости стенок и полок профиля, и также выполнить анализ перераспределения усилий в закритической стадии работы.

Для исследования работы профилированного настила с учетом местной потери устойчивости сжатых полок и стенок, в ПК Femap&Nastran была создана расчетная модель, приведенная на рис. 1. Модель составлена из универсальных четырехузловых пластинчатых конечных элементов. Так как профнастил по ширине имеет повторяющую топологию, расчетную модель составляли для одного гофра, а воздействие соседних участков на исследуемую часть учитывали наложением граничных условий. Нагрузка прикладывалась по торцам через жесткие штампы. Физическая нелинейность материала задавалась упрощенной билинейной диаграммой Прандтля при  $\sigma_T = 2400 \text{ кГ/см}^2$ . Геометрическая нелинейность системы реализовывалась путем организации итерационного процесса.

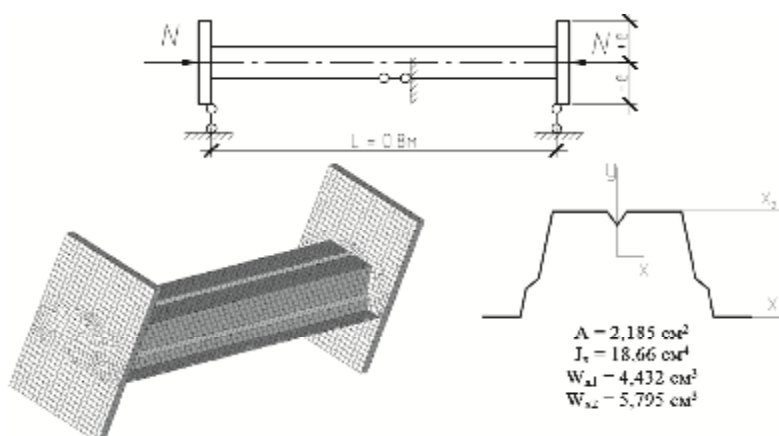


Рис. 1. Расчетная конечно-элементная модель профилированного настила Н75-750-0.7

Исследования были проведены в две стадии. В первой стадии расчеты выполнялись в упруго линейной постановке в режиме «Buckling» при различных комбинациях  $N$  и  $M$  (т.е. центральное сжатие, внецентренное сжатие и чистый изгиб). В результате исследований получены несколько форм потери местной устойчивости профиля (нас интересовала только 1-я), определены коэффициенты запаса устойчивости ( $\beta_1$ ) и

вычислены критические усилия. Во второй стадии исследований задача решалась в физически и геометрически нелинейной постановке в режиме «Nonlinear Static». При этом нагрузка прикладывалась поэтапно на деформированную модель, и расчет производился до условного разрушения конструкции. Ниже на рис. 2 и 3 приведены результаты численных расчетов в программном комплексе (распределение нормальных напряжений и деформированная схема).

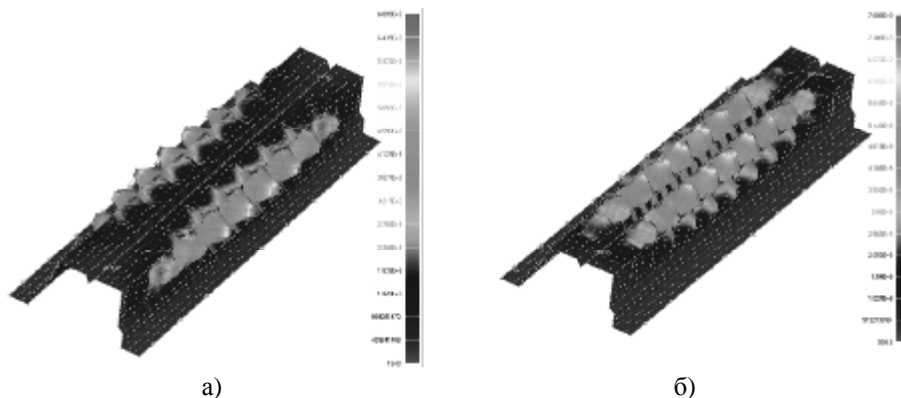


Рис. 2. Результаты расчета в упруго линейной постановке.

- а) Первая форма потери местной устойчивости при центральном сжатии ( $e=0$ );  
 $\beta=0,687$ ;  $N_{кр} = -7809$  кГс;  
 б) Первая форма потери местной устойчивости при внецентренном сжатии ( $e=0,1$ );  
 $\beta=0,225$ ;  $N_{кр} = -1575$  кГс;  $M_{кр} = 157,5$  кГс·м

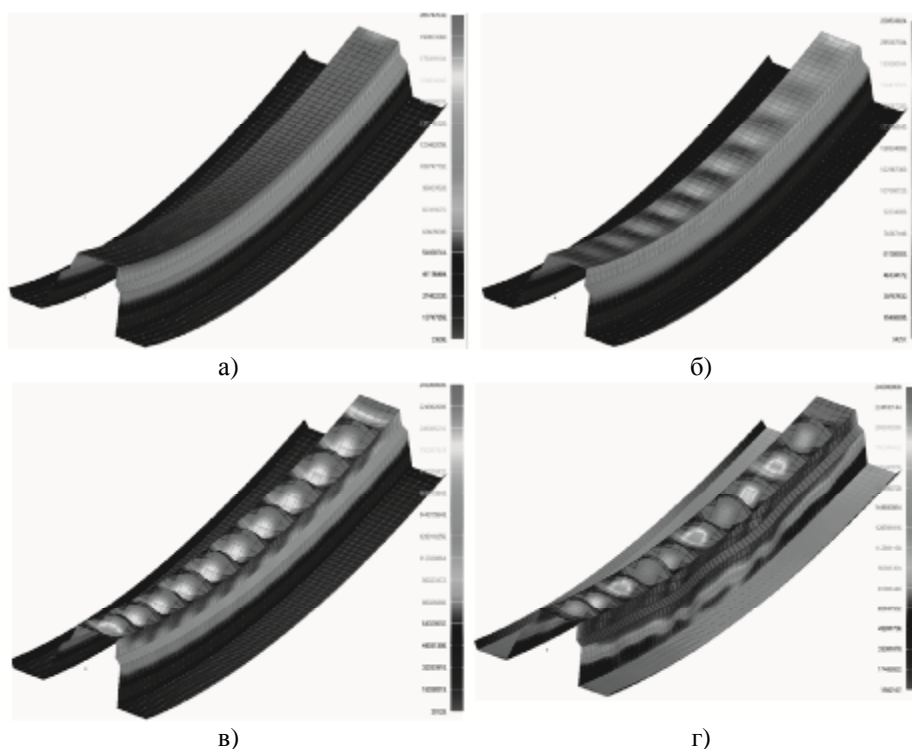


Рис. 3. Результаты нелинейного расчета. НДС профиля при внецентренном сжатии на различных этапах нагружения:

- а) Этап нагружения Time 0,18 ( $N=1260$  кГс,  $M=630$  кГс·м);  
 б) Этап нагружения Time 0,1825 – появление потери местной устойчивости сжатых полок узких полок ( $N_{кр}=1278$  кГс,  $M_{кр}=639$  кГс·м)  
 в) Этап нагружения Time 0,2 – закритическая работа профиля ( $N=1400$  кГс,  $M=700$  кГс·м);  
 г) Этап нагружения Time 0,229 – разрушение профиля ( $N_{пр}=1603$  кГс,  $M_{пр}=802$  кГс·м)

По результатам расчета построены предельные кривые в плоскости обобщенных усилий изгибающего момента  $M$  и продольной сжимающей силы  $N$ . Графики приведены ниже на рис. 4, где синим цветом показаны результаты расчетов для упругой модели в линейной постановке, т.е. границы потери местной устойчивости по первой форме, а красным цветом – предельная кривая для упруго пластической модели в нелинейной постановке.

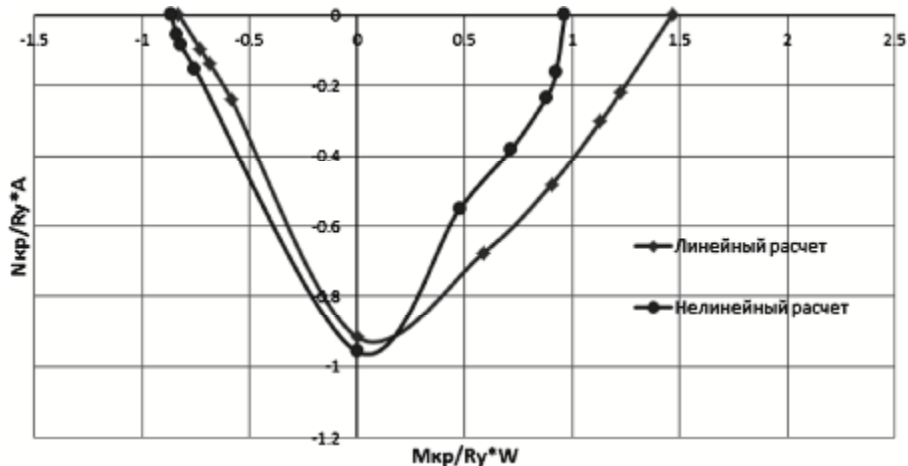


Рис. 4. Предельные кривые в плоскости  $M$  и  $N$ , построенные по результатам численных исследований в ПК Femap&Nastran

Как видно из рисунка, при положительном изгибе (верхние широкие полки с элементом жесткости – сжаты, а нижние полки – растянуты) результаты линейного расчета превышают значения нелинейных расчетов. Данный факт обусловлен отсутствием в упругой модели ограничения для критических напряжений, т.е. потеря местной устойчивости происходит при напряжениях, превышающих пределом текучести. Для отрицательного изгиба (нижние полки сжаты, а верхние – растянуты) в линейных расчетах напряженное состояние при потере местной устойчивости находится в области допустимых напряжений (интенсивность напряжений  $\sigma_i \leq \sigma_r$ ) и расчет в упруго пластической и геометрически нелинейной постановке (красная кривая) выявляет некоторый запас несущей способности.

Любопытным является также тот факт, что предельная кривая (красная кривая) имеет вогнутые участки, что противоречит классической теории предельного равновесия, диаграмма которой использована в нелинейной модели данной задачи. Этот факт объясняется спецификой модели, а именно тонкостенностью ее элементов, которые подвержены местной потере устойчивости.

#### Построение предельных кривых по методике Еврокода

Согласно рекомендациям Еврокода в тонкостенных конструкциях при определении их несущей способности учитываются влияние местной потери устойчивости и устойчивости формы поперечного сечения. В расчетах допускается потеря местной устойчивости сжатых элементов при условии обеспечения общей несущей способности элемента. Потеря местной устойчивости элемента учитывается путем редуцирования геометрических характеристик поперечного сечения: площади, момента инерции, момента сопротивления.

С помощью прикладного пакета «Математика» были проведены расчеты по методике Еврокода в двух вариантах: для линейно-упругой модели и для упругопластической модели с реализацией диаграммы Прандтля. В результате проведенных расчетов, были определены предельные значения изгибающего момента  $M$  и продольной силы  $N$  по первому предельному состоянию при разных соотношениях  $M/N$  и построены соответствующие предельные кривые, которые приведены ниже на рис. 5.

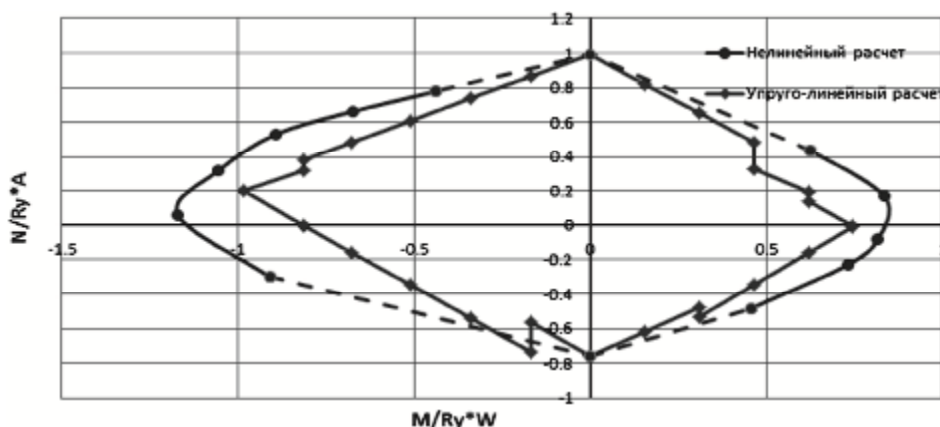


Рис. 5. Предельные кривые  $f(N, M) = 0$ , построенные по методике Еврокода

В линейно-упругой постановке задачи за предел прочности  $R_y$  принят предел текучести  $\sigma_t = 2400 \text{ кг/см}^2$ . Предельная кривая для физически нелинейной модели построена с реализацией диаграммы Прандтля. Как видно, предельная кривая линейно-упругой модели (рис. 5) имеет кусочно-линейную конфигурацию. Вертикальные участки на графике (скачки) обусловлены тем, что при некоторых соотношениях  $M/N$  нижняя или верхняя полка профнастила начинает терять устойчивость (т.е. редуцируется), либо наоборот перестает терять устойчивость.

Для упругопластической модели предельная кривая (рис. 5) в целом имеет криволинейное очертание. Прямолинейные участки графика, начерченные штрих-линиями, имеют условный характер. На этих промежутках реализуется НДС профиля между следующими состояниями: а) одна из полок (верхняя или нижняя) растянута или сжата, а вся остальная часть сечения профиля соответственно сжата или растянута – б) все сечение сжато или растянуто.

По результатам сопоставительного анализа предельных кривых (рис. 6), полученных численными исследованиями в ПК Femar&Nastran и расчетами по Еврокоду сделаны следующие выводы:

1. Работа профилированного настила на внецентренное сжатие существенно отличается от традиционной работы данной конструкции на поперечный изгиб.

2. Упругая модель расчета профилированного настила с использованием ПК Femar&Nastran может давать как заниженные, так и завышенные результаты, и не пригодна для оценки несущей способности профиля.

3. Использование физически и геометрически нелинейной модели в ПК Femar&Nastran для расчета профилированного настила приводит к вполне достоверным результатам.

4. При внецентренном сжатии с положительным эксцентриситетом (когда широкие полки сжаты) предельная кривая численного расчета дает большие значения, чем результаты расчетов по Еврокоду (разница – до 25 %). При чистом сжатии отличие результатов составляет 20 %.

5. При внецентренном сжатии, когда узкие полки сжаты, результаты численных исследований отличаются незначительно – всего на 5 %.

6. В целом несущая способность профиля, определенная численным методом в ПК Femar&Nastran больше чем, несущая способность, вычисленная по Еврокоду. Это связано с тем, что методике расчета по Еврокоду заложен некоторый запас. Данный запас обусловлен тем, что расчетная схема тонкостенных профилей состоит из совокупности отдельных пластин шарнирно опертых по контуру, а на самом деле места сопряжения полок и стенок не являются чистым шарниром, которые учитываются при моделировании в ПК Femar&Nastran.



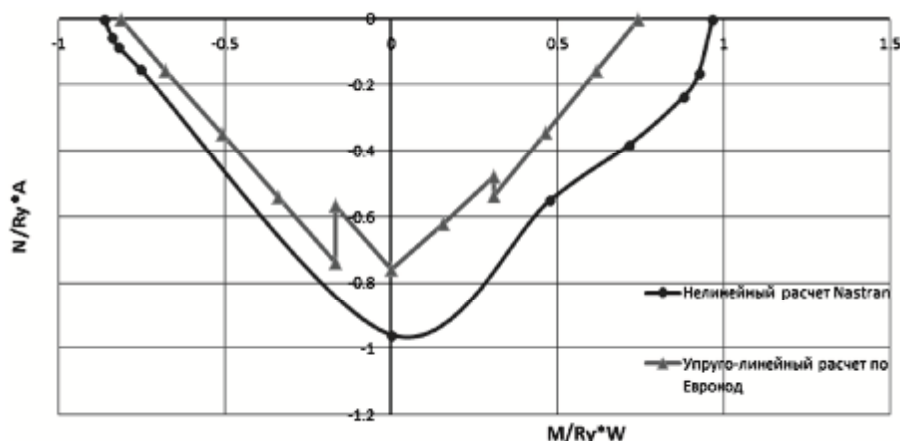


Рис. 6. Графики численных исследований в ПК Femap&Nastran и расчетов по методике Еврокода

### Список библиографических ссылок

1. Нехаев Г.А., Теличко Г.Н. Численное моделирование составных стержней из тонкостенных гнутых профилей // Сб. материалов 11-ой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы строительства и строительной индустрии». – Тула: 2008. – С. 40-41.
2. Видяков И.И., Арменский М.Ю., Соловьев Д.В. Теоретические и экспериментальные исследования новых марок профилированного настила // Научно-технический журнал «Строительная механика и расчет сооружений», 2007, № 2. – С. 72-74.
3. Патент на изобретение «Плита покрытия» RU 2436909 С1 от 15.02.2010. Авторы: Хисамов Р.И., Башаров Ф.Ф.
4. Патент на изобретение «Плита покрытия» RU 2454515 С1 от 26.11.2010. Авторы: Хисамов Р. И., Башаров Ф.Ф.
5. Голубчиков А.В. Работа решетчатой плиты покрытия с применением стального профилированного листа. Автореф. дисс. канд. техн. наук. – Свердловск, 1990.
6. Марышев А.Ю. Двухпоясное преднапряжённое арочное покрытие с поясами из стальных профилированных листов. Дисс. канд. техн. наук. – Красноярск, 2001.
7. Колесникова М.А. Комбинированные пологие блок-своды из профилированных листов, подкрепленные деревянными балками // диссертация кандидата технических наук. – Красноярск, 2004.
8. Драчевский С. В. Пространственные трансформируемые секции зданий — укрытий и фермы покрытий арочного типа из линзообразных блоков // диссертация кандидата технических наук. – Красноярск, 2006.
9. Макеев С.А., Гришаев Н.А. Численное исследование местной потери устойчивости арочных профилей трапециевидного сечения // Омский научный вестник, 2010, № 1 (87). – С. 93-97.
10. Гимранов Л. Р. Пространственная жесткость одноэтажных многопролетных легких зданий с применением профилированного настила с увеличенной высотой гофр. Диссертация кандидата технических наук. – Казань, 2010. – 171 с.
11. Брудка Я. Гранцарек Р., Милачевски К. Стальные складчатые конструкции в строительстве. – Киев: Будивельник, 1989.
12. Eurocodes: 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 standardization, 2004.

**Nizameev V.G.** – candidate of physical and mathematical sciences, associate professor

E-mail: [nizameev\\_kisi@mail.ru](mailto:nizameev_kisi@mail.ru)

**Basharov F.F.** – leading engineer

E-mail: [fanzikbashar@mail.ru](mailto:fanzikbashar@mail.ru)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

### **Research on the bearing capacity of the corrugated steel decking under eccentric compression with supercritical operation**

#### **Resume**

In the present work we study the bearing capacity of corrugated steel decking under eccentric compression based on supercritical operation.

Using the Femap&Nastran software, a numerical research of local stability and stressedly-deformed condition was conducted. To assess the bearing capacity were performed numerical studies for one corrugated profiled sheeting brand № 75-750-0.7 and defined limits of the bending moment and longitudinal force. Finite element system used in the research allowed the physical and geometrical nonlinearity was taken into account. With the application of «Mathematics» package the calculation by Eurocode methods has been carried out in two versions: for linear-elastic model and elastic-plastic model with the implementation of the Prandtl diagram. Using the results of numerical research, limiting curves were plotted in the planes of generalized forces N and M, and a comparative analysis of produced graphs was performed.

**Keywords:** corrugated steel decking, supercritical operation, local stability, curve, eccentric compression, physical and geometrical nonlinearity, limiting curves.

#### **Reference list**

1. Nehaev G.A., Telichko G.N. Numerical modeling of the compound rods from thin profiles. // Coll. materials of the 11th International Scientific Conference «Actual problems of building and construction industry». – Tula. – P. 40-41.
2. Vidyakov I.I., Armensky M.Yu., Soloviev D.V. Theoretical and experimental research of new brands of profiled sheeting // Scientific and Technical Journal «Building mechanics and calculation of structures», 2007, № 2. – P. 72-74.
3. Patent for the invention «Covering plate» RU 2436909 C1 from 15.02.2010. Authors: Hisamov R.I., Basharov F.F.
4. Patent for the invention «Covering plate» RU 2454515 C1 from 26.11.2010. Authors: Hisamov R.I., Basharov F.F.
5. Golubchikov A.V. Work of an ethmoid plate cover with a steel profile plate. Author. diss. cand. tehn. Sciences. – Sverdlovsk, 1990.
6. Maryshev A.Y. Two-zone prestressed arch cover with belts of steel sheeting. Diss. cand. tehn. sciences. – Krasnoyarsk, 2001.
7. Kolesnikova M.A. Combined flat block arches from the profiled sheets supported by wooden beams // Dissertation of the candidate of technical sciences. – Krasnoyarsk, 2004.
8. Drachevskiy S.V. Spatial transformable section of buildings – houses and roof trusses arch type of lens-shaped blocks // Dissertation of the candidate of technical sciences. – Krasnoyarsk, 2006.
9. Makeev S.A., Grishaev N.A. Numerical study of local buckling of arch trapezoidal profiles // Scientific Herald of Omsk, 2010, № 1 (87). – P. 93-97.
10. Gimranov L. R. Three-dimensional rigidity of single-storeyed multispans light buildings with profiled decking with increased height of crimps. Thesis for a Candidate's degree. – Kazan, 2010. – 171 p.
11. Brudka Y. Grantsarek R., Milachevsky K. Steel folded structures in constructions. – Kiev: Budivelnik 1989.
12. Eurocodes: 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 standardization, 2004.