

## Напряженно-деформированное состояние трехгранной фермы с неразрезными поясами пятигранного составного профиля

Евгений Анатольевич Мелёхин

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет  
(НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Рассматриваются конструкции трехгранных ферм, которые могут применяться для покрытий и перекрытий производственных и общественных зданий, различных комбинированных систем, а также в качестве конструкций эстакад линейных объектов в различных районах строительства. Представлена конструкция пространственной фермы в рамках патентной разработки покрытия из трехгранных ферм с неразрезными поясами замкнутого сечения. Цель численных исследований — оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) пролетной трехгранной фермы при приложении статической узловой нагрузки и различном примыкании элементов раскосной решетки, а также создание базы верификационных данных для проведения последующих численных исследований бесфасоночных узлов сопряжения.

**Материалы и методы.** Методикой численных исследований учитывается приложение узловых статических нагрузок, моделирующее размещение ограждающей конструкции покрытия с применением прогонов. Использование метода единичных нагрузок направлено на определение реакции несущей системы в рамках проведения сравнительной оценки и сопоставления с полученными данными других исследовательских задач.

**Результаты.** В ходе численных исследований получены данные, характеризующие НДС модели трехгранной фермы по распределению усилий в стержнях и вертикальных перемещений узлов.

**Выводы.** Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что принятая расчетная модель трехгранной фермы адекватно отражает ее НДС. Практическое применение методики численных исследований на основе приложения единичных узловых нагрузок состоит в возможности использования результатов расчета в виде структурированного массива данных, необходимых при расчетах по методу предельных состояний. Полученные результаты могут использоваться в качестве основы для верификации данных последующих численных исследований конструкций бесфасоночных узлов в рамках пластинчатой математической модели. Представленные численные исследования входят в комплекс научных исследований изучения действительной работы пролетных трехгранных ферм.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** трехгранная ферма, численные исследования, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние, бесфасоночный узел

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Мелёхин Е.А. Напряженно-деформированное состояние трехгранной фермы с неразрезными поясами пятигранного составного профиля // Строительство: наука и образование. 2023. Т. 13. Вып. 1. Ст. 4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.1.4

Автор, ответственный за переписку: Евгений Анатольевич Мелёхин, [melean@mail.ru](mailto:melean@mail.ru).

## Stress-strain state of a triangular truss with uncut chords of a five-sided composite profile

Evgeniy A. Melyokhin

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);  
Moscow, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** The author considers designs of triangular trusses that can be used to design roofs of industrial and public buildings, various combined systems, and also as overpass structures of linear facilities. The design of a spatial truss as part of a patent pending development of a triangular truss cover with non-cutting closed-section chords is presented. The purpose of numerical studies is to estimate the stress-strain state (SSS) of a spanning triangular truss subjected to static nodal load and different arrangement of strut elements as well as to create a verification database for further numerical studies of non-faceted interface nodes.

**Materials and methods.** The numerical research methodology takes into account the application of nodal static loads, modelling the placement of the enclosing structure of the pavement using purlins. The use of the unit load method is aimed at determining the response of the load-bearing system as part of a comparative evaluation and comparison with the data obtained from other research tasks.

**Results.** In the course of numerical studies, data were obtained, characterising the deflected mode of the triangular truss model in terms of force distribution in the rods and vertical displacements of the nodes.

**Conclusions.** Analysis of the obtained results shows that the accepted design model of a triangular truss adequately reflects its deflected mode. Practical application of the numerical research technique on the basis of application of unit nodal loads consists in the possibility of using calculation results in the form of a structured data set required in calculations by the limit states method. The results obtained can be used as a basis for verification of data obtained in further numerical studies of non-faceted node constructions within the framework of the lamellar mathematical model. The presented numerical studies are part of the complex of scientific research into the actual performance of spanning triangular trusses.

**KEYWORDS:** triangular truss, numerical studies, finite element method, stress-strain state, non-faceted node

**FOR CITATION:** Melyokhin E.A. Stress-strain state of a triangular truss with uncut chords of a five-sided composite profile. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2023; 13(1):4. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.1.4

Corresponding author: Evgeniy A. Melyokhin, [melean@mail.ru](mailto:melean@mail.ru).

## ВВЕДЕНИЕ

Пространственные трехгранные фермы являются индустриальными несущими конструкциями с высокими эксплуатационными характеристиками. Применение в основе компоновки стержневой системы прокатных профилей значительно расширяет возможности использования конструкций [1–3]. Трехгранные фермы рассматриваются в качестве несущих конструкций покрытий и перекрытий производственных и общественных зданий, элементов комбинированных систем с возможностью подвески технологических устройств, грузоподъемных механизмов, а также как модульные конструкции эстакад линейных объектов в различных районах строительства. Низкая удельная материалоемкость и трудоемкость изготовления трехгранных ферм обусловлены рациональным распределением материала конструктивной формы в пространстве и возможностью компоновки стержневой системы бесфасоночными узлами. Следует отметить, что конструктивная форма трехгранной фермы имеет хороший потенциал применения, связанный с типизацией и унификацией в совокупности с высоким уровнем заводской готовности, безопасностью транспортирования и скоростью монтажа [4].

Образование конструктивной формы плоского покрытия реализуется путем регулярной установки пролетных трехгранных ферм с переменным или одинаковым шагом в продольном направлении (рис. 1).

Пролетная трехгранная ферма состоит из двух наклонных плоских ферм с общим нижним поясом. Учитывая особенности ее статической работы, целесообразно в горизонтальной плоскости верхних поясов использовать распорки или несущие элементы ограждающей конструкции кровли. Особенности конструктивного исполнения пролетной трехгранной фермы обусловлены оценкой напряженно-деформированного состояния (НДС) трехгранных ферм с различными параметрами и габаритами при относительно незначительном влиянии воздействий в горизонтальном направлении из плоскости изгиба.

В свою очередь, возможность использования несущих элементов ограждающей конструкции кровли позволила исключить часть распорных элементов из состава отправочной марки пространственной фермы и использовать пространство между наклонными фермами для компактной укладки «в елочку» и транспортирования [4].

Патентная разработка конструкции трехгранной фермы с неразрезными поясами пятигранного (пентагонального) составного сечения из прокатных профилей швеллера и уголка предназначена для плоских покрытий зданий [5]. Изобретение состоит в том, что покрытие формируется из трехгранных ферм, объединенных профнастилом, который является несущей конструкцией ограждающего покрытия (рис. 2).

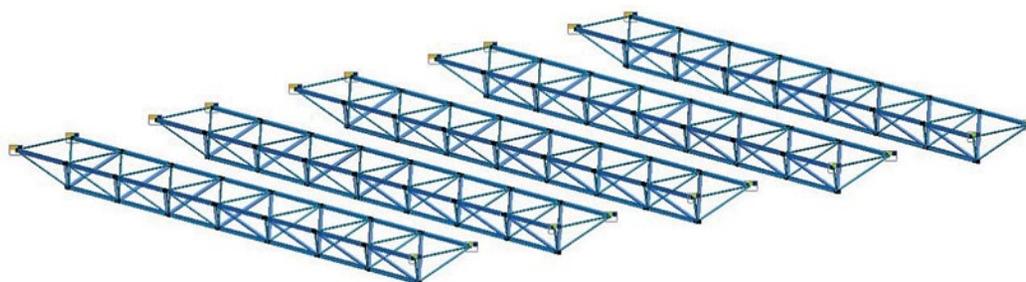


Рис. 1. Конструктивная форма плоского покрытия из трехгранных ферм

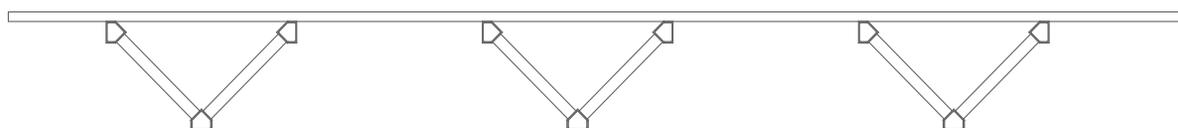


Рис. 2. Трехгранные фермы плоского покрытия (продольный разрез)

Каждая ферма включает верхние неразрезные пояса пятигранного коробчатого сечения из жестко соединенных между собой швеллеров и уголков, а также нижний пояс пятигранного составного сечения. Раскосная решетка прикреплена к полкам поясных уголков встык.

Для данного покрытия из трехгранных ферм может использоваться прогонная конструкция ограждающей конструкции (рис. 3).

Стенки швеллеров верхних поясов в пространстве проектного положения сориентированы вертикально, а стенка нижнего швеллера — горизонтально.

Для транспортирования имеется возможность компоновки отправочных марок трехгранных ферм укладкой «в елочку» (рис. 4).

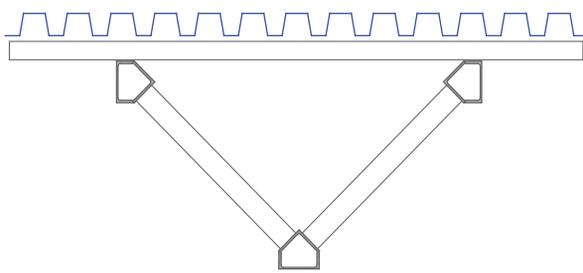


Рис. 3. Конструкция трехгранной фермы (поперечный разрез)

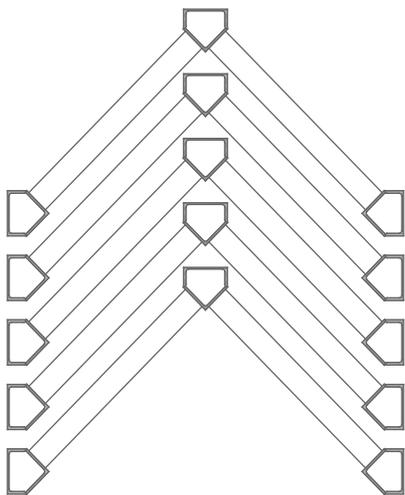


Рис. 4. Компоновка отправочных марок трехгранных ферм для транспортировки

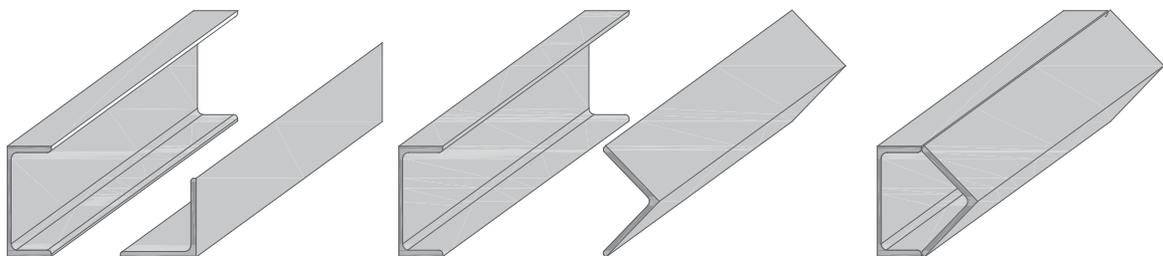


Рис. 5. Схема компоновки пятигранного составного сечения из прокатных профилей

Пятигранный профиль поясных неразрезных стержней трехгранных ферм формируется в коробчатое замкнутое сечение из равнополочного уголка и швеллера [6]. Данная компоновка составного сечения используется в конструкциях других патентных разработок с различной ориентацией замкнутого профиля в пространстве проектного положения [7–10].

Сопряжение по всей длине их прокатов обеспечивается полнотельными или прерывистыми сварными швами по перьям полок, что соответственно позволяет рассматривать составное сечение в виде монолитной формы (рис. 5).

Раскосная решетка наклонных плоских ферм трехгранной фермы образуется из одиночных прокатных уголков.

Подрезка полок раскосных уголков осуществляется для формирования штампа и плотного примыкания к полкам поясных уголков пятигранного составного стержня с образованием стыковых бесфасоночных узлов, имеющих особенности компоновки [11, 12].

Цель численных исследований — оценка НДС пролетной трехгранной фермы при приложении статических нагрузок, систематизация данных для практического проектирования и компоновки элементного состава, а также создание базы верификационных данных для проведения последующих численных исследований бесфасоночных узлов сопряжения в рамках расчетной пластинчатой математической модели [13, 14].

В качестве задач численных исследований рассматривалось создание расчетной математической модели пролетной трехгранной фермы средствами стандартного расчетного комплекса на основе централизованной геометрической схемы. Компоновочная особенность централизованной геометрической схемы состоит в том, что ее формирование производится стержнями, сходящимися в узлах, являющихся центрами данной схемы.

Возведение в различных районах строительства несущих покрытий из трехгранных ферм предполагает необходимость учитывать изменчивость влияющих параметров, в том числе значений и форм приложения нагрузок [15]. Структурированный массив данных, обусловленных изменчивостью внешних факторов, имеет практическое значение для проектирования.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для оценки НДС использовалась расчетная математическая модель трехгранной фермы, сгенерированная средствами программного комплекса, реализующего расчетные задачи по методу конечных элементов [16]. Вариативная расчетная модель моделирует пространственно-стержневую трехгранную ферму пролетом 24 м, шириной 3 м и высотой 1,5 м (рис. 6). Модульные размеры панелей нижнего и верхних поясов составляют 3 м.

Методикой численных исследований учитывается приложение узловых статических нагрузок, моделирующее размещение ограждающей конструкции покрытия с применением прогонов [17]. Приложение сосредоточенных сил в узлах верхних поясов стержневой модели трехгранной фермы по методу единичных нагрузок направлено на определение реакции несущей системы в виде распределения усилий в элементах и перемещений узлов.

Применение метода узловых нагрузок обусловлено необходимостью проведения сравнительной оценки, сопоставления с полученными данными других исследовательских задач, а также возможностью практического использования при расчетах по методу предельных состояний.

Расчетная модель пространственной трехгранной фермы описывалась стержневыми элементами произвольного вида со связями по линейным и угловым направлениям [18]. В качестве нижнего и верхних поясов использовались неразрезные стержни пятигранного составного сечения монолитной формы компоновки с ориентацией положения, принятой в конструктивном решении патентного изобретения. Раскосы из одиночных прокатных уголков являются элементами малой изгибной жесткости. Поэтому для оценки их влияния на деформативные свойства

модели трехгранной фермы рассматривались варианты с жестким или шарнирным примыканием элементов раскосной решетки к неразрезным поясам. Примыкание раскосов к неразрезным поясам описывалось шарнирным примыканием.

Граничные условия расчетной схемы пролетной фермы учитывали ограничения по опорным узлам верхних поясов, а именно, установлены закрепления по линейным смещениям, кроме освобождения смежной опорной пары узлов в продольном направлении модели.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе проведения численных исследований получены данные, характеризующие НДС модели трехгранной фермы. Определены расчетные усилия от действия узловых единичных нагрузок и значения перемещений узлов вариативной стержневой модели трехгранной фермы с шарнирным и жестким примыканием раскосов к неразрезным поясам.

Элементы раскосной решетки имеют практически полную симметрию в распределении усилий в пределах панелей верхних поясов по середине пролета (рис. 7, 8). В качестве уточнения следует отметить, что стержень или часть стержня неразрезного пояса фермы, ограниченного узлами примыкания раскосов, обозначается как панель.

Наибольшие продольные усилия в верхних поясах срединных панелей отличаются от продольных усилий в верхних поясах приопорных панелей практически в 4,43 раза. При этом увеличение значений усилий в стержнях смежных панелей, рассматривая от приопорных панелей, происходит непропорционально, а также с разной кратностью увеличения для нижнего и верхних поясов. Кратность увеличения значений продольных усилий



Рис. 6. Расчетная модель пролетной трехгранной фермы

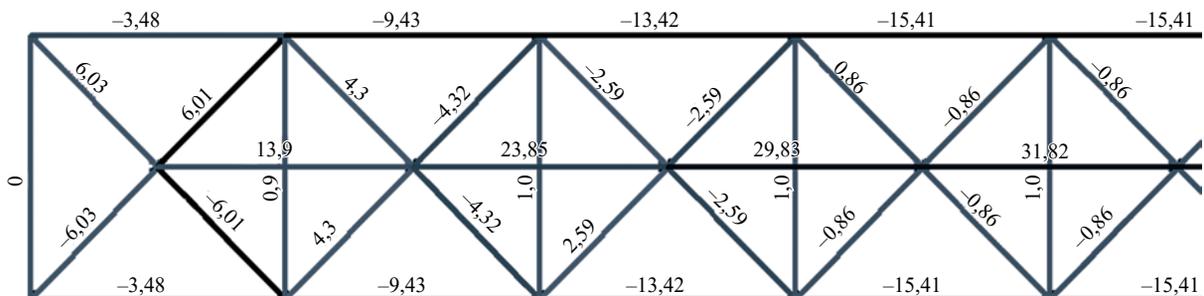


Рис. 7. Расчетные продольные усилия модели (полуфермы) с шарнирным примыканием раскосов

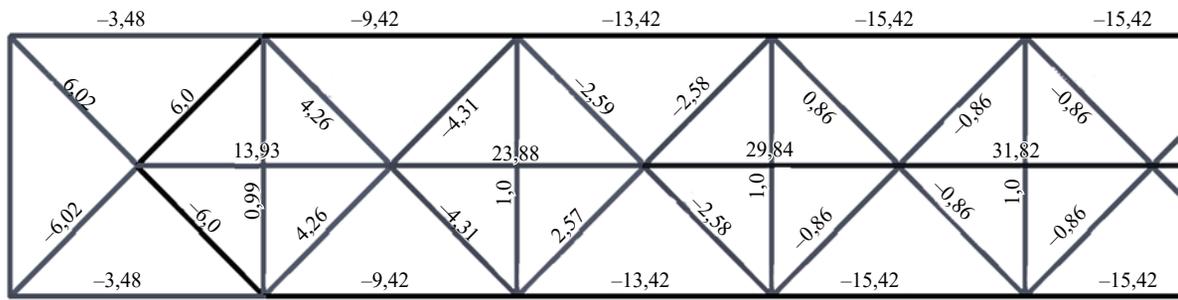


Рис. 8. Расчетные продольные усилия модели (полуфермы) с жестким примыканием раскосов

в стержнях снижается от приопорных панелей к середине пролета.

Наибольшие продольные усилия в раскосах приопорных панелей отличаются от значений усилий в раскосах срединных панелей в 7 раз. Смежные сжатые и растянутые раскосы в пределах панелей верхних поясов имеют одинаковые значения. Снижение значений усилий в стержнях раскосов смежных панелей, рассматривая от приопорных панелей, происходит непропорционально. Кратность увеличения значений в стержнях раскосов повышается от приопорных панелей к середине пролета.

Образование изгибающих моментов в стержнях несущей системы обусловлено включением в работу неразрезных поясов (рис. 9).

Оценка деформативности модели пролетной трехгранной фермы основывается на полученных значениях вертикальных перемещений узлов.

Наибольшие значения вертикальных перемещений относятся к узлам нижнего и верхних неразрезных поясов в срединной части пролета трехгранной фермы (рис. 10, 11). Необходимо указать на наличие полной симметрии относительно середины пролета в распределении значений вертикальных перемещений узлов.

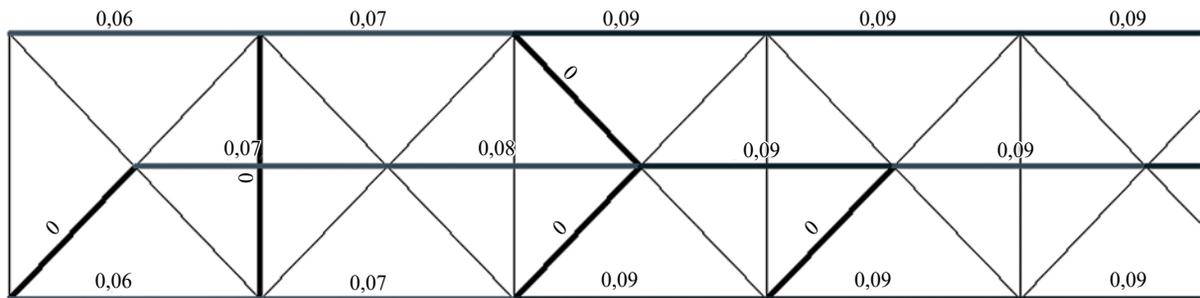


Рис. 9. Расчетные изгибающие моменты модели (полуфермы) шарнирного примыкания раскосов

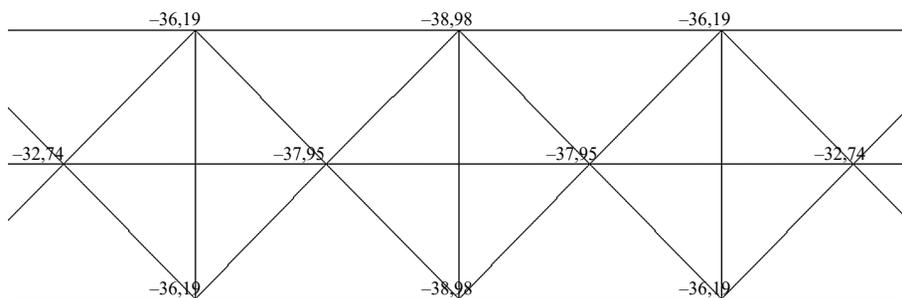


Рис. 10. Максимальные вертикальные перемещения узлов модели шарнирного примыкания раскосов

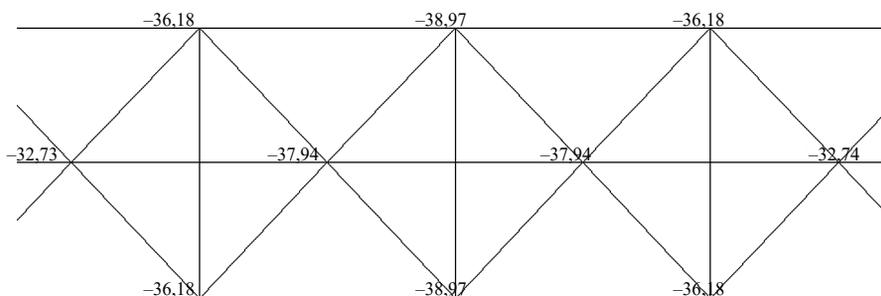


Рис. 11. Максимальные вертикальные перемещения узлов модели жесткого примыкания раскосов

Распределение вертикальных перемещений узлов трехгранной фермы описывается пологой параболой с вершиной в центральных узлах смежных верхних поясах модели.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Напряженно-деформированное состояние расчетной модели пролетной трехгранной фермы характеризуется распределением основных усилий для плоских ферм при узловых нагрузках и при этом имеет свои особенности.

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что принятая расчетная модель трехгранной фермы адекватно отражает НДС пространственно-стержневой конструкции с неразрезными поясами. Предусмотренное методикой численных исследований использование метода единичных нагрузок позволяет произвести оценку реакции несущей системы в виде распределения усилий в стержнях и перемещений узлов. Практическое применение методики численных исследований на основе приложения единичных узловых нагрузок состоит в возможности использования результатов расчета в виде структурированного массива данных, необходимых при расчетах по методу предельных состояний.

Полученные результаты могут использоваться в качестве основы для верификации данных последующих численных исследований конструкций

бесфасоночных узлов в рамках пластинчатой математической модели.

Полученные результаты вариативных моделей трехгранной фермы показывают отсутствие практического влияния на их деформативные свойства условий примыканий раскосов из одиночных прокатных уголков к неразрезным поясам.

Малая изгибная жесткость одиночных прокатных уголков не имеет значительного влияния в распределении возникающих усилий на конструкцию бесфасоночных узлов трехгранной фермы, основанной на центрированной геометрической схеме.

Возникновение усилий в распорках трехгранной фермы свидетельствует о включении их в работу и предполагает необходимость применения расчетных соединений прикрепления к неразрезным поясам трехгранной фермы.

Образование изгибающих моментов в элементах неразрезных поясов несущей системы обусловлено включением в статическую работу в виде балок на податливых опорах в составе фермы. Изменения изгибающих моментов в узлах, несмотря на их малые относительные значения, вследствие использования метода единичной нагрузки в некоторых случаях потребуют учета.

Представленные численные исследования входят в научный комплекс исследований по изучению действительной работы пролетных трехгранных ферм, в том числе конструкций трехгранных ферм с нижним поясом из одиночного уголка [19, 20].

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бирюлев В.В., Чернов И.Н. Стальные фермы с коробчатыми сечениями стержней, сваренных из уголков // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1974. № 4. С. 8–14.
2. Клячин А.З. Металлические решетчатые пространственные конструкции регулярной структуры (разработка, исследование, опыт применения). Екатеринбург : Диамант, 1994. 276 с.
3. Трущев А.Г. Пространственные металлические конструкции. М. : Стройиздат, 1983. 215 с.
4. Мелёхин Е.А. Модульные трехгранные фермы плоских покрытий // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. Т. 23. № 2. С. 65–78. DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-65-78
5. Патент RU № 2188287 С2 МПК E04C 3/04. Покрытие из трехгранных ферм / М.М. Копытов, К.А. Ерохин, А.В. Матвеев, Е.А. Мелёхин; заявл. № 2000117116/03 от 27.06.2000; опубл. 27.08.2002. Бюлл. № 24. 6 с.
6. Патент RU № 36119 U1 МПК<sup>7</sup> E04C 3/32. Тонкостенная несущая конструкция замкнутого пятигранного сечения (ее варианты) / М.М. Копы-

тов, А.В. Матвеев, А.П. Малиновский, Е.А. Мелёхин; заявл. № 2003118832/20 от 24.06.2003; опубл. 27.02.2004. Бюлл. № 6. 6 с.

7. Копытов М.М., Ерохин К.А., Матвеев А.В., Мелёхин Е.А. Бесфасоночные пространственно-стержневые покрытия с поясами пентагонального профиля сечения // Монтажные и специальные работы в строительстве. 2003. № 11. С. 2–6.

8. Патент RU № 19068 U1 МПК<sup>7</sup> E04C 3/04. Структурное покрытие / М.М. Копытов, К.А. Ерохин, А.В. Матвеев, Е.А. Мелёхин; заявл. № 2001100914/20 от 09.01.2001; опубл. 10.08.2001. Бюлл. № 22. 8 с.

9. Патент RU № 2627794 С1 МПК E04C 3/08. Покрытие из трехгранных ферм / Е.А. Мелёхин; заявл. № 2016124898 от 21.06.2016; опубл. 11.08.2017. Бюлл. № 23. 8 с.

10. Патент № 2661945 С1 МПК E04C 3/08. Покрытие из трехгранных ферм / Е.А. Мелёхин, С.В. Фирцева; опубл. 2017134238 от 02.10.2017; опубл. 23.07.2018. Бюлл. № 21.

11. Мелёхин Е.А. Работа узлов бесфасоночного складчатого покрытия с поясами пятигранного со-

ставного профиля : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Томск : ТГАСУ, 2003. 23 с.

12. *Ерохин К.А., Мелёхин Е.А.* К исследованию узлов бесфасоночной пространственной фермы с пятигранным сечением верхнего пояса // Научно-техническая конференция КрасГАСА. 2000. С. 25–27.

13. *Мелёхин Е.А.* Пластинчатая расчетная модель узла бесфасоночной пространственной фермы // Архитектура и строительство : 2-я Междунар. науч.-техн. конф. 2002. С. 62–64.

14. *Мелёхин Е.А.* Исследование влияния расцентровки и податливости на напряженно-деформированное состояние узлов сопряжения пространственно-стержневых конструкций покрытий с поясами пятигранного составного профиля из металлопроката // Металлические конструкции: взгляд в прошлое и будущее : VIII Украинская науч.-техн. конф. 2004. С. 592–595.

15. *Гордеев В.Н., Лантух-Лященко А.И., Пашинский В.А., Перельмутер А.В., Пичугин С.Ф.* На-

грузки и воздействия на здания и сооружения / под общ. ред. А.В. Перельмутера. М. : Изд-во АСВ, 2007. 482 с.

16. *Рикардс Р.Б.* Метод конечных элементов в теории оболочек и пластин. Рига : Зинатне, 1988. 284 с.

17. *Перельмутер А.В., Сливкер В.И.* Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. Киев : Сталь, 2002. 600 с.

18. *Поляков Л.П., Файнбург В.М.* Моделирование строительных конструкций. Киев : Будівельник, 1975. 159 с.

19. *Мелёхин Е.А., Иванов П.С., Малыгин А.Б.* Численные исследования модульных систем трехгранных ферм плоских покрытий зданий // Инженерный вестник Дона. 2022. № 6.

20. *Мелёхин Е.А., Гончаров Н.В., Малыгин А.Б.* Трехгранные фермы с предварительным напряжением для плоских покрытий // Инженерный вестник Дона. 2022. № 6.

Поступила в редакцию 2 февраля 2023 г.

Принята в доработанном виде 13 февраля 2023 г.

Одобрена для публикации 13 февраля 2023 г.

ОБ АВТОРЕ: **Евгений Анатольевич Мелёхин** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры архитектурно-строительного проектирования и физики среды; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 381648, ResearcherID: AFK-2034-2022, ORCID: 0000-0002-9606-7191; melean@mail.ru.

## INTRODUCTION

Spatial triangular trusses are industrial load-bearing structures with high performance characteristics. The use of rolled sections in the basis of the rod system layout considerably extends the possibilities of using the structures [1–3]. Triangular trusses are considered as supporting structures of roofs and overlaps of industrial and public buildings, elements of combined systems with the possibility of suspension of technological devices, lifting mechanisms, as well as modular structures of overpasses of linear objects in various areas of construction. Low specific material and labour input of a tricity truss is stipulated by rational distribution of a material of the constructive form in space and an opportunity of alignment of a core system by trussless knots. It should be noted that the structural

form of a triangular truss has a good application potential associated with typing and unification in conjunction with a high level of factory readiness, transportation safety and speed of installation [4].

The formation of the structural shape of a flat pavement is realised by the regular installation of spanning triangular trusses with variable or equal spacing in longitudinal direction (Fig. 1).

A spanning triangular truss consists of two inclined plane trusses with a common bottom chord. Considering the peculiarities of its static operation, it is advisable to use struts or load-bearing elements of the roof enclosing structure in the horizontal plane of the upper chords. The peculiarities of structural design of a span triangular truss are conditioned by estimation of the stress-strain state of triangular trusses with different parameters and

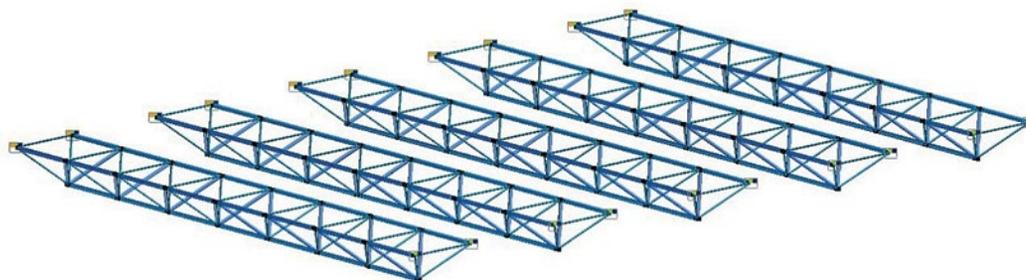


Fig. 1. Structural shape of a flat roof made of triangular trusses

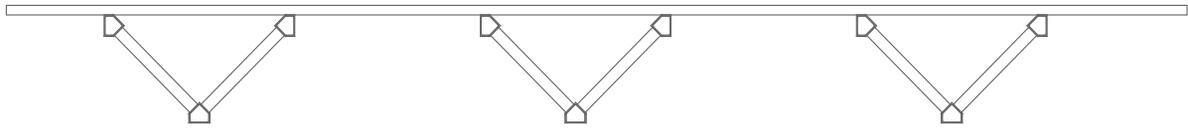


Fig. 2. Flat roof triangular trusses (longitudinal section)

dimensions with relatively small influence of influences in horizontal direction from the bending plane.

In turn, the possibility of using the load-bearing members of the roof cladding structure made it possible to exclude some of the struts from the spatial truss gauge and to use the space between the sloping trusses for compact herringbone stacking and transportation [4].

The patent design of a triangular truss construction with uncut chords of five-sided (pentagonal) composite section made of rolled profiles of channel and angle is intended for flat building envelopes [5]. The invention

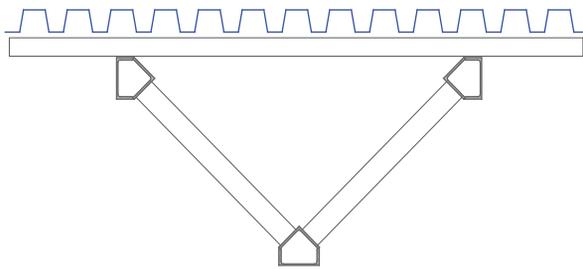


Fig. 3. Construction of a triangular truss (cross-section)

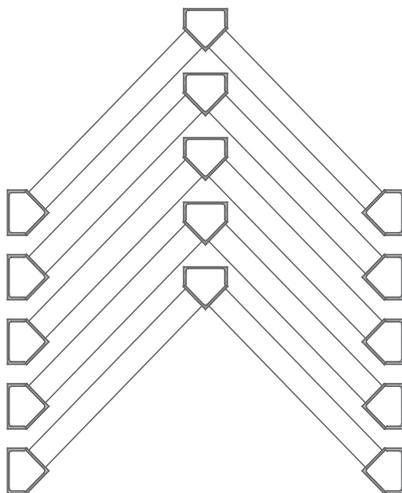


Fig. 4. Layout of triangular truss dispatch marks for transport

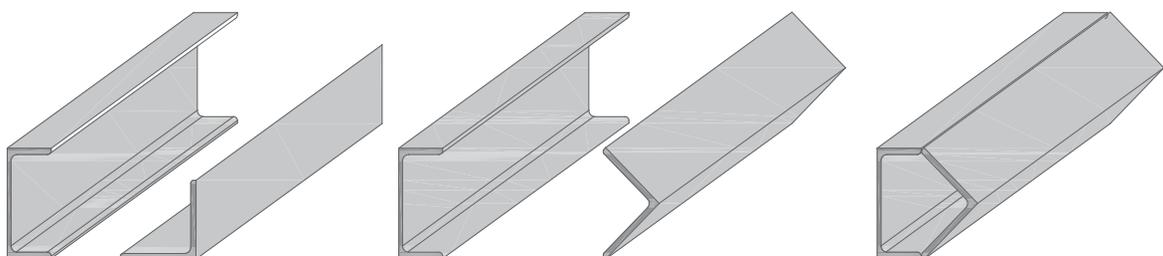


Fig. 5. Layout of a pentagonal composite section made of rolled sections

consists in the fact that the covering is formed of triangular trusses combined by corrugated sheeting, which is a load-bearing structure of the envelope covering (Fig. 2).

Each truss consists of the upper continuous chords of a box-section pentagonal bracket and angles rigidly connected to each other, and the lower chord of a composite pentagonal bracket. The stringer is butt-attached to the flanges of the angles.

For this triangular truss cover, a purlin enclosure structure can be used (Fig. 3).

The walls of the upper chord channels are oriented vertically in the space of the design position and the bottom channel wall is horizontal.

The triangular trusses can be stacked herringbone for transport (Fig. 4).

The pentagonal profile of the continuous belt bars of triangular trusses is formed into a box-shaped closed cross-section of equal angles and channels [6]. This arrangement of the composite section is used in the structures of other patent developments with different orientation of the closed section in the space of the design position [7–10].

Joints along the entire length of their bars are provided by full-body or discontinuous welds along the flange feathers, which respectively allows the composite section to be considered as a monolithic form (Fig. 5).

The sloping lattice of the inclined plane trusses of the triangular truss is formed from single rolled angles.

The flanges of the strut angles are trimmed to form a die and a tight connection to the flanges of the belt angles of the pentagonal composite member to form butt joints with no faceted joints, which have specific layout features [11, 12].

The purpose of the numerical studies is to estimate the deflection of a spanning triangular truss under the application of static loads, to systematise the data for practical design and layout of the element composition, and to create a verification database for subsequent numerical studies of the non-faceted interface nodes in

the framework of the calculated lamellar mathematical model [13, 14].

As a task of numerical research, we considered creating a computational mathematical model of a spanning triangular truss by means of a standard computational complex based on a centred geometrical scheme. The layout feature of the centred geometric scheme is that it is formed by rods converging at the nodes which are the centres of this scheme.

The erection of triangular truss load-bearing roofs in different construction areas implies the need to consider the variability of the influencing parameters, including the values and forms of load application [15]. A structured data set due to the variability of external factors is of practical importance for design.

**MATERIALS AND METHODS**

In order to estimate stress-strain state, the design model of the triangular truss, the computational mathematical model generated by means of the software package implementing computational problems using the finite element method was used [16]. Variative calculation model simulates spatial-rod triangular truss with 24 m span, 3 m width and 1.5 m height (Fig. 6). The modular dimensions of the lower and upper chord panels are 3 m.

The numerical research methodology takes into account the application of nodal static loads simulating the placement of the enclosing structure of the roof using purlins [17]. The application of concentrated forces in the nodes of the upper chords of the rod model of a triangular truss by the unit load method is aimed at determining the response of the supporting system in the form of force distribution in the elements and displacements of the nodes.

The application of the nodal load method is driven by the need for comparative assessment, comparison

with the data obtained from other research tasks, and the possibility of practical use in calculations according to the limit state method.

The computational model of the spatial triangular truss was described by the rod elements of arbitrary form with connections along linear and angular directions [18]. As the lower and upper chords, continuous bars of pentagonal composite monolithic cross-section with orientation of position adopted in the design solution of the patent invention were used. The struts made of single rolled angles are elements of low bending stiffness. Therefore, to assess their influence on the deformation properties of the triangular truss model, variants with rigid or hinged adjacency of strut elements to the continuous chords were considered. The connection of the struts to the fixed chords is described by the articulated connection.

The boundary conditions of the design scheme of the spanning truss took into account the constraints of the upper chord support nodes, namely, set anchorages for linear displacements, except for the release of an adjacent support pair of nodes in the longitudinal direction of the model.

**RESEARCH RESULTS**

In the course of numerical studies, data characterizing the deflected mode of a triangular truss model are obtained. Computational forces from the action of nodal unit loads and values of displacements of nodes of a variant rod model of a triangular truss with articulated and rigid adjacency of struts to continuous chords are determined.

The strut elements have almost complete symmetry in the distribution of forces within the upper chord panels in the middle of the span (Fig. 7, 8). As a clarification, it should be noted that the rod or part of the rod of the continuous chord of the truss bounded by the abutment nodes of the struts is referred to as a panel.

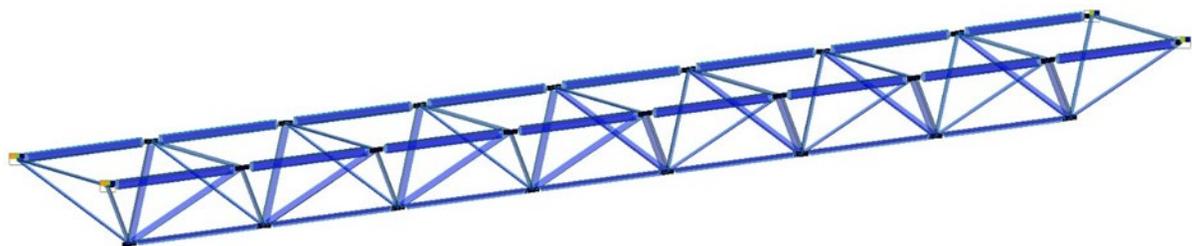


Fig. 6. Calculation model of a triangular spanning truss

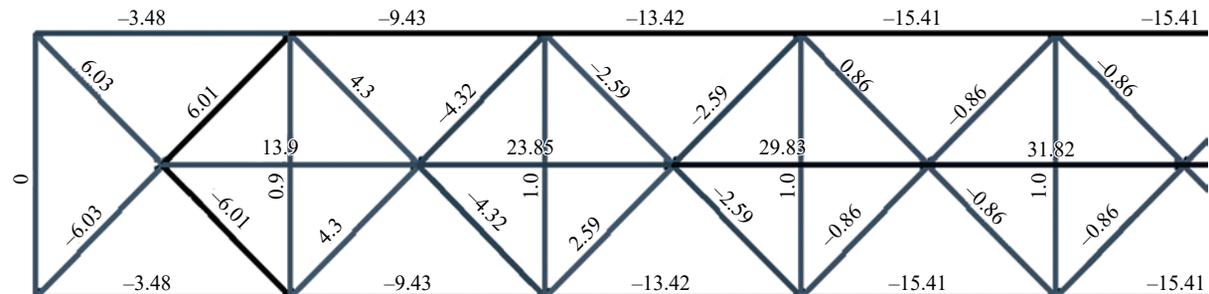


Fig. 7. Calculated longitudinal forces of the model (half-beam) with articulated strut connection

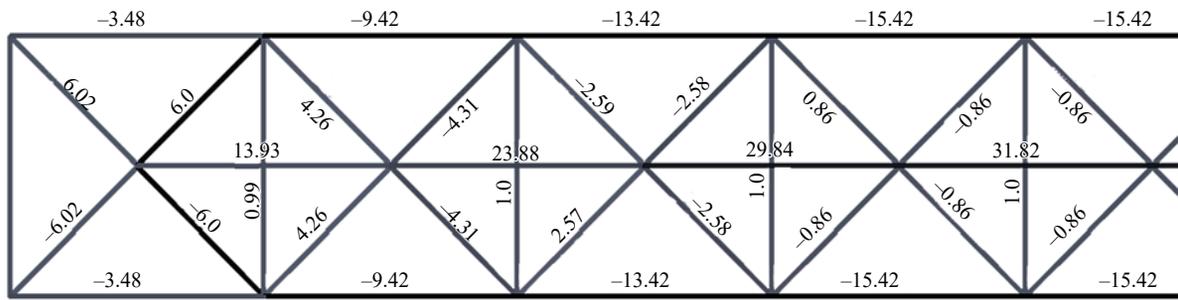


Fig. 8. Calculated longitudinal forces of the model (half-beam) with rigid butted struts

The greatest longitudinal forces in the upper chords of the midmost panels differ from the longitudinal forces in the upper chords of the adjacent panels by a factor of 4.43. The increase in the values of the forces in the adjacent panel rods, considered from the suspension panels, is disproportionate and also has different multiplicity of increase for the lower and upper chords. The multiplicity of increase in the values of longitudinal forces in the rods decreases from the supporting panels towards the middle of the span.

The greatest longitudinal forces in the struts of the supporting panels differ by a factor of 7 from the forces in the struts of the midmost panels. The adjacent compressed and stretched struts within the top

chord panels have the same values. The reduction in force values in the struts of the adjacent panels, viewed from the supporting panels, occurs disproportionately. The multiplicity of the increase in the values in the strut rods increases from the suspension panels towards the middle of the span.

The bending moments in the bars of the load-bearing system are due to the incorporation of the continuous chords (Fig. 9).

The assessment of the deformability of the triangular spanning truss model is based on the values obtained for the vertical displacements of the nodes.

The highest values of vertical displacements relate to the nodes of lower and upper continuous chords

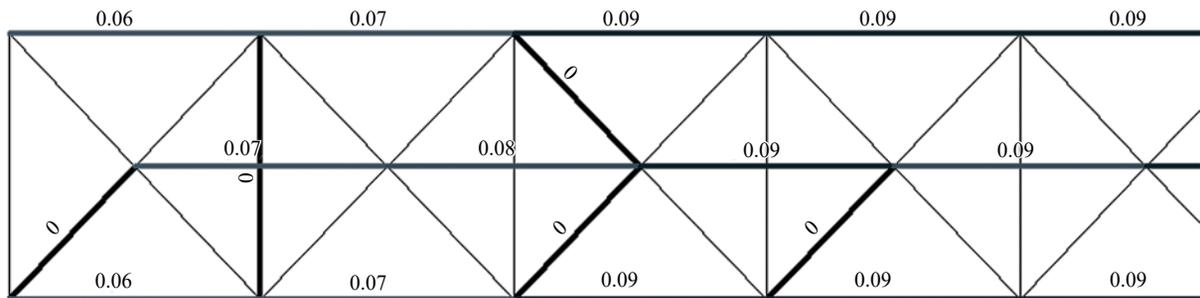


Fig. 9. Calculated bending moments of the model (half-frame) of the hinged strut connection

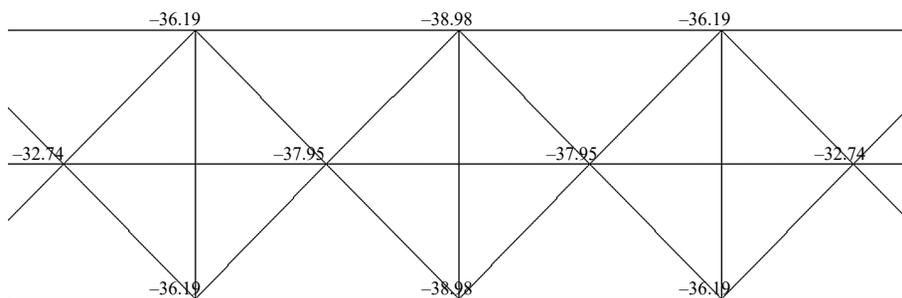


Fig. 10. Maximum vertical displacements of the frame hinge model nodes

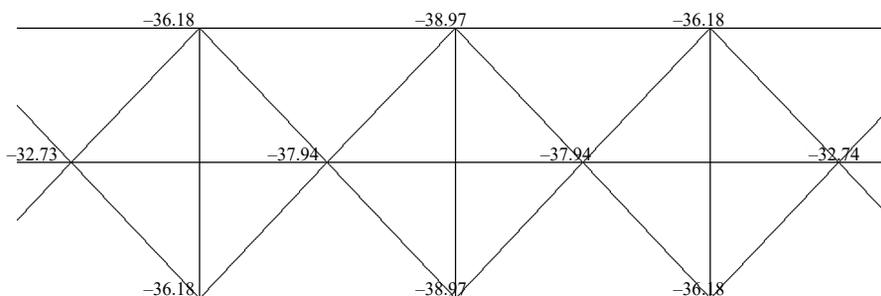


Fig. 11. Maximum vertical displacements of the rigid strut model nodes

in the median part of the span of triangular truss (Fig. 10, 11). It is necessary to point out the presence of complete symmetry relative to the centre of the span in distribution of values of vertical displacements of nodes.

The distribution of the vertical displacements of the triangular truss nodes is described by a hollow parabola with its vertex at the central nodes of the adjacent upper chords of the model.

## CONCLUSION

The stress-strain state of the design model of a spanning triangular truss is characterised by the distribution of the main forces for flat trusses under nodal loads and has its own characteristics.

The analysis of the results obtained testifies to the fact that the accepted design model of a triangular truss adequately reflects the deflected mode of a spatial-trunk structure with continuous chords. The use of the method of numerical studies foreseen by the method of unit loadings makes it possible to estimate the reaction of a load-carrying system in the form of force distribution in the rods and displacement of knots. The practical application of the numerical research method based on the application of unit node loads consists in the possibility of using the results of calculation in the form of a structured data set required for calculations by the limit states method.

The results obtained can be used as a basis for verification of data from subsequent numerical studies of lamellar-less unit designs within the framework of the lamellar mathematical model.

The results obtained from the variative triangular truss models show that there is no practical effect on their deformation properties of the conditions of joining the struts made of single rolled angles to the unbroken chords.

The low bending stiffness of single rolled angles has no significant influence on the distribution of the occurring forces in the design of the faceless triangular truss components based on a centred geometric scheme.

The occurrence of forces in the struts of the triangular truss indicates their incorporation into the work and suggests the need for design connections to the continuous chords of the triangular truss.

The formation of bending moments in the elements of the uncut chords of the load carrying system is due to the inclusion of beams on compliant supports as part of the truss in the static work. Changes in bending moments at the nodes, despite their small relative values, due to the use of the unit load method, will in some cases need to be taken into account.

The presented numerical studies are part of a scientific complex of studies on the actual performance of spanning trihedral trusses, including structures of triangular trusses with a single angle bottom chord [19, 20].

## REFERENCES

1. Biryulev V.V., Chernov I.N. Steel girders with box sections of rods welded from angles. *Izvestiya vuzov. Construction and architecture*. 1974; 4:8-14. (rus.).
2. Klyachin A.Z. *Metal lattice spatial structures of a regular structure (development, research, application experience)*. Ekaterinburg, Diamant Publ., 1994; 276. (rus.).
3. Trushchev A.G. *Spatial metal structures*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1983; 215. (rus.).
4. Melekhin E.A. Modular trihedral trusses of flat roofs. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Journal of Construction and Architecture*. 2021; 23(2):65-78. DOI: 10.31675/1607-1859-2021-23-2-65-78 (rus.).
5. Patent RU No. 2188287 C2 IPC E04C 3/04. *Covering from trihedral trusses* / M.M. Kopytov, K.A. Erokhin, A.V. Matveev, E.A. Melekhin; dec. No. 2000117116/03 dated June 27, 2000; publ. August 27, 2002. Bull. No. 24; 6.
6. Patent RU No. 36119 U1 MPK<sup>7</sup> E04C 3/32. *Thin-walled load-bearing structure of a closed five-sided section (its variants)* / M.M. Kopytov, A.V. Matveev, A.P. Malinovsky, E.A. Melekhin ; dec. No. 2003118832/20 dated June 24, 2003; publ. February 27, 2004. Bull. No. 6; 6.
7. Kopytov M.M., Erokhin K.A., Matveev A.V., Melekhin E.A. Shapeless space-rod coatings with belts of pentagonal section profile. *Mounting and Special Works in Construction*. 2003; 11:2-6. (rus.).
8. Patent RU No. 19068 U1 MPK<sup>7</sup> E04C 3/04. *Structural coating* / M.M. Kopytov, K.A. Erokhin, A.V. Matveev, E.A. Melekhin; Dec. No. 2001100914/20 dated January 9, 2001; publ. August 10, 2001. Bull. No. 22; 8.
9. Patent RU No. 2627794 C1 IPC E04C 3/08. *Trihedral truss coating* / E.A. Melekhin; dec. No. 2016124898 dated June 21, 2016; publ. August 11, 2017. Bull. No. 23. 8 p.
10. Patent No. 2661945 C1 IPC E04C 3/08. *Trihedral truss coating* / E.A. Melekhin, S.V. Firtsev; publ. 2017134238 from October 2, 2017; publ. July 23, 2018. Bull. No. 21.
11. Melekhin E.A. *The work of knots of a formless folded coating with belts of a pentahedral composite profile: abstract of the thesis : dis. ... cand. tech. Sciences*. Tomsk, TGASU, 2003; 23. (rus.).

12. Erokhin K.A., Melekhin E.A. To the study of nodes of a formless spatial truss with a pentahedral section of the upper chord. *Scientific and technical conference of KrasGASA*. 2000; 25-27. (rus.).
13. Melekhin E.A. Lamellar calculation model of a node of a non-shaped spatial truss. *Architecture and construction : 2nd International scientific and technical conference*. 2002; 62-64. (rus.).
14. Melekhin E.A. Investigation of the influence of misalignment and compliance on the stress-strain state of the interface nodes of spatial-rod structures of coatings with belts of a five-sided composite profile made of rolled metal. *Metal constructions: a look into the past and the future : VIII Ukrainian scientific and technical conference*. 2004; 592-595. (rus.).
15. Gordeev V.N., Lantukh-Lyashchenko A.I., Pashinsky V.A., Perelmuter A.V., Pichugin S.F. *Loads and impacts on buildings and structures / under the general ed. of A.V. Perelmuter*. Moscow, ASV Publishing House, 2007; 482. (rus.).
16. Rickards R.B. *Finite element method in the theory of shells and plates*. Riga, Zinatne, 1988; 284. (rus.).
17. Perelmuter A.V., Slivker V.I. *Calculation models of structures and the possibility of their analysis*. Kyiv, Steel Publ., 2002; 600. (rus.).
18. Polyakov L.P., Fainburd V.M. *Modeling of building structures*. Kyiv, Budivel'nik Publ., 1975; 159. (rus.).
19. Melekhin E.A., Ivanov P.S., Malygin A.B. Numerical studies of modular systems of trihedral trusses of flat roofs of buildings. *Engineering Journal of Don*. 2022; 6. (rus.).
20. Melekhin E.A., Goncharov N.V., Malygin A.B. Trihedral girders with prestressing for flat coatings. *Engineering Journal of Don*. 2022; 6. (rus.).

Received February 2, 2023.

Adopted in revised form on February 13, 2023.

Approved for publication on February 13, 2023.

**BIONOTES:** **Eygeniy A. Melyokhin** — Candidate of Technical Sciences, Associated Professor, Associated Professor of the Department of Architectural and building design and environmental physics; **Moscow State University**