

## Методика численных исследований трёхгранных ферм с неразрезными поясами для плоскостных покрытий зданий

*Е.А. Мелёхин<sup>1</sup>, С.В. Фирцева<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Московский государственный строительный университет*

<sup>2</sup>*Тюменский индустриальный университет*

**Аннотация:** Рассматривается формирование конструктивной формы покрытия из трёхгранных ферм, каждая из которых состоит из двух наклонных плоских ферм с общим нижним поясом. Конструкция пространственной фермы выполнена с неразрезными поясами замкнутого составного сечения и треугольной раскосной решёткой из одиночных уголков. Цель численных исследований пролётной трёхгранной фермы состоит в оценке её напряженно-деформированного состояния при изменчивости влияющих параметров. Методика численных исследований основывается на расчётной математической модели трёхгранной фермы с приложением единичных нагрузок в узлах и позволяет получать массив данных напряженно-деформированного состояния, учитывающий изменчивость нагрузки, которая обусловлена характеристиками района строительства и особенностями ограждающей конструкции покрытия. В основе структуры пространственно-стержневой модели используется центрированная геометрическая схема. Апробация представленной методики производилась с использованием стержневой расчётной модели трёхгранной фермы. В результате численных исследований предлагаемой методики получены данные, характеризующие напряженно-деформированное состояние модели трёхгранной фермы от единичной узловой нагрузки. Анализ полученных результатов свидетельствует, что представленная исследовательская методика позволяет получать структурированные данные с учетом изменчивости значений нагрузок и может иметь практическое применение результатов расчёта при проектировании.

**Ключевые слова:** трёхгранная ферма; пятигранный составной профиль; бесфасоночный узел; центрированная геометрическая схема; стержневая расчётная модель.

**Введение.** Пространственные трёхгранные фермы – это современные индустриальные несущие конструкции с высокими производственными и эксплуатационными характеристиками, которые могут использоваться для формирования плоскостных покрытий производственных и общественных зданий в различных районах строительства.

**Формообразование покрытия из трёхгранных ферм.** Плоскостная конструктивная форма формирует структуру с последовательной установкой трёхгранных ферм. Конструктивная форма с использованием трёхгранных ферм обладает возможностями по структурной трансформации.

Конструкция пролётной трёхгранной фермы образуется сопряжением по нижнему поясу пары смежных наклонных плоских ферм. В горизонтальной плоскости по узлам верхних поясов могут размещаться распорки, а также устраиваться прогоны ограждающей конструкции.

Покрытие из трёхгранных ферм предусматривает применение профнастила, уложенного по верхним поясам [1]. Каждая пространственная трёхгранная ферма имеет нижний и верхние неразрезные пояса пятигранного трубчатого сечения. Треугольная нисходящая раскосная решётка прикреплена встык к полкам поясных уголков посредством сварных соединений с образованием стыковых бесфасоночных узлов (рис. 1).

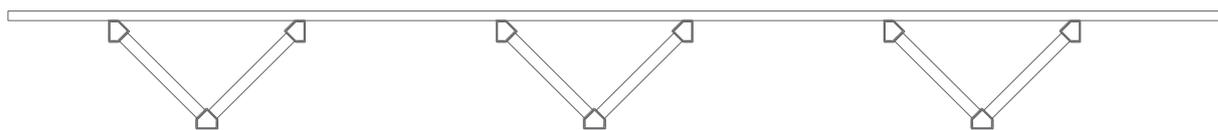


Рис. 1. Трёхгранные фермы плоского покрытия с продольным профлистом

Бесфасоночные узлы формируются размещением штампов раскосной решётки из одиночных прокатных уголков на полках поясных уголков пятигранных составных стержней с последующей приваркой.

Увеличение шага установки трёхгранных ферм может ограничиваться несущей способностью профнастила, при этом целесообразно рассмотреть размещение прогонной несущей ограждающей конструкции (рис. 2).

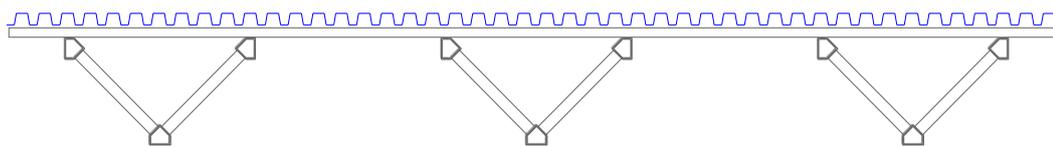


Рис. 2. Трёхгранные фермы плоского покрытия с прогонами

Пятигранный составной профиль поясных стержней трёхгранных ферм образуется из равнополочного уголка и швеллера (рис. 3).

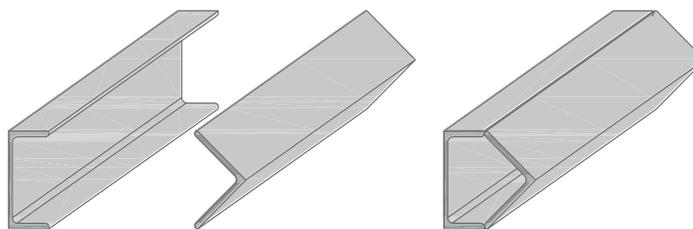


Рис. 3. Компоновка пятигранного составного сечения из прокатных профилей

Основная цель численных исследований пролётной трёхгранной фермы состоит в оценке её напряженно-деформированного состояния при различных условиях статической работы. Для покрытия из трёхгранных ферм изменчивостью влияющих параметров обладают значения и формы приложения нагрузок [2- 4]. Получение структурированного массива данных, обусловленных изменчивостью нагрузок, является основой для последующего анализа статической работы стержневой конструкции покрытия и верификационной базы дальнейших исследований.

#### **Методика численных исследований**

Получение структурированных данных напряжённо-деформированного состояния конструкции трёхгранной фермы учитывается предлагаемой методикой численных исследований на основе пространственно-стержневой расчётной математической модели конечных элементов в упругой стадии их статической работы с приложением единичных нагрузок в узлах.

Центрированная геометрическая схема формируется стержнями, сходящимися в единых узлах сопряжения, являющихся центрами данной схемы. Компоновка конструкции трёхгранной фермы с бесфасоночными узлами сопряжения раскосов к неразрезным поясам пятигранного составного сечения на основе использования центрированной геометрической схемы относится к сложной инженерной задаче.

Средствами расчётного программного комплекса, основанного на использовании метода конечных элементов, каждый стержень системы

описывается свойствами конечного элемента, включая условия его сопряжения с другими элементами в узлах [5].

Единичные узловые нагрузки используются для определения реакции системы и являются структурным модулем изменчивости их значений. Приложение сосредоточенных нагрузок в узлах верхних поясов трёхгранной фермы моделирует размещение прогонов ограждающей конструкции.

**Апробация методики.** В рамках апробации представленной методики использовалась расчётная математическая модель трёхгранной фермы, сгенерированная средствами программного комплекса на основе метода конечных элементов. Вариативная расчётная модель моделирует пространственно-стержневую трёхгранную ферму пролётом 24м, шириной 3м и высотой 1.5м (рис. 4).

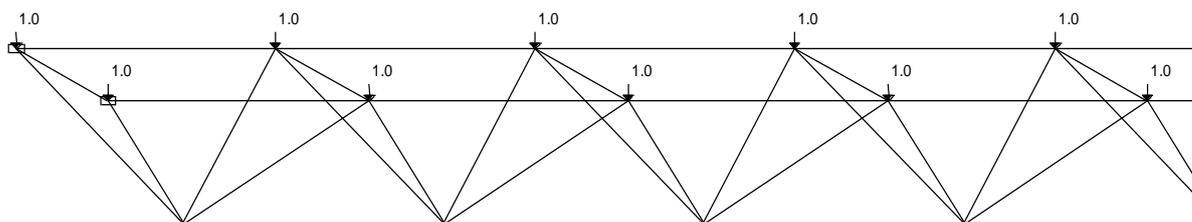


Рис. 4. Расчётная модель пролётной трёхгранной фермы (полуфермы)

Неразрезные стержни пятигранного составного сечения приняты с монолитной компоновкой и ориентацией положения, принятой в конструктивном решении патентной разработки. Граничные условия расчётной схемы фермы учитывали закрепления по линейным смещениям узлов опирания. Распорки по узлам верхних поясов включены в работу модели трёхгранной фермы как несущие элементы конструкции кровельного покрытия с шарнирным сопряжением в узлах примыкания.

**Результаты численных исследований.** В ходе проведения численных исследований получены данные о напряженно-деформированном состоянии модели трёхгранной фермы. Определены расчётные усилия и значения

перемещений узлов стержневой модели трёхгранной фермы от приложения единичной узловой нагрузки.

Элементы раскосной решетки имеют практически полную симметрию в распределении усилий в пределах панелей верхних поясов относительно середины пролёта (рис. 5).

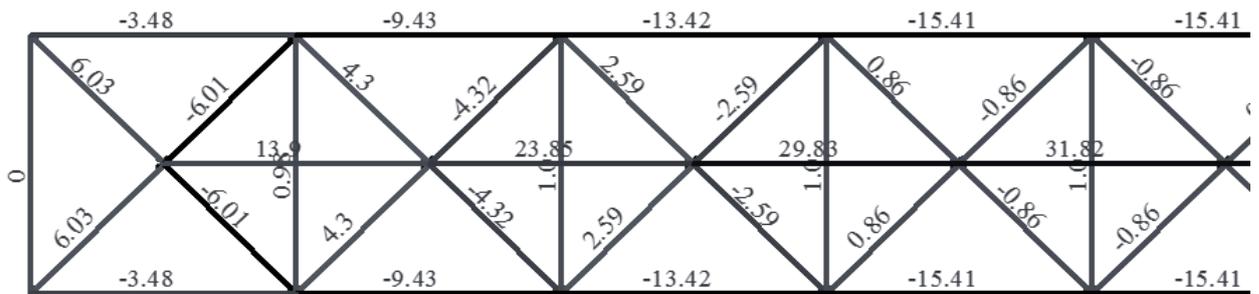


Рис. 5. Расчётные усилия модели фермы (полуфермы)

Наибольшие продольные усилия – в верхних поясах срединных панелей. Увеличение усилий в стержнях смежных панелей происходит непропорционально. Кратность увеличения значений продольных усилий в стержнях снижается от приопорных панелей к середине пролёта. Наибольшие продольные усилия – в раскосах приопорных панелей. Смежные раскосы панелей верхних поясов имеют одинаковые значения по модулю.

Оценка деформативности модели пролётной трёхгранной фермы может производиться по значениям вертикальных перемещений узлов, имеющих симметрию нелинейного характера распределения относительно середины пролёта (рис. 6).

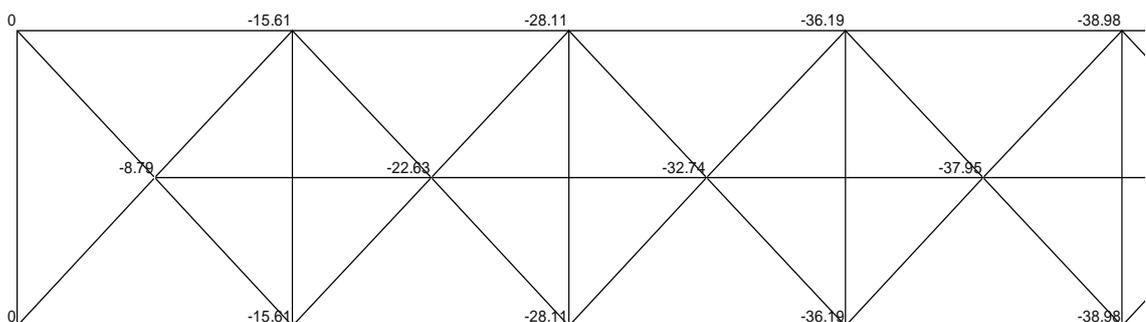


Рис. 6. Вертикальные перемещения узлов модели фермы (полуфермы)

Одиночные прокатные уголки треугольной раскосной решётки относятся к элементам малой изгибной жёсткости, которая не позволяет значительно влиять на перераспределение усилий в стержневой модели.

Распределение вертикальных перемещений узлов трёхгранной фермы описывается полой параболой по аналогии с другими системами [6].

### **Основные выводы**

Напряженно-деформированное состояние расчётной модели пролётной трёхгранной фермы характеризуется распределением основных усилий для плоских ферм при узловых нагрузках и при этом имеет свои особенности.

Анализ полученных результатов свидетельствует, что представленная методика численных исследований модели трёхгранной фермы с приложением единичных нагрузок позволяет получать структурированные данные, характеризующие напряженно-деформированное состояние с учётом изменчивости значений действующих нагрузок [7, 8].

Представлены зависимости, которые позволяют определять реакцию системы на каждое и суммарное воздействие нагрузки при решении практических инженерных задач проектирования. Изложенная методология позволяет осуществлять сравнительный анализ по сопоставлению с данными последующих и других численных исследований [9, 10].

### **Литература**

1. Копытов М.М., Ерохин К.А., Матвеев А.В., Мелёхин Е.А. Покрытие из трехгранных ферм // Патент №2188287 РФ, RU МПК7 Е 04 С 3/04, 27.08.2002, бюл. №24, с. 6.
2. Бирюлев В.В., Чернов И.Н. Стальные фермы с коробчатыми сечениями стержней, сваренных из уголков // Известия вузов. Строительство и архитектура. Новосибирск, 1974 №4, с. 8 – 14.

3. Муханов К.К., Демидов Н.Н. Исследование легких структурных конструкций. Материалы по лёгким металлическим конструкциям. – М.: Стройиздат, 1975, С. 160-162.
4. Клячин А.З. Металлические решетчатые пространственные конструкции регулярной структуры (разработка, исследование, опыт применения). – Екатеринбург: Диамант, 1994. – 276 с.
5. Поляков Л.П., Файнбург В.М. Моделирование строительных конструкций. Киев, «Будівельник», 1975, 160 с.
6. Трущев А.Г. Пространственные металлические конструкции. – М.: Стройиздат, 1983, 215 с.
7. Kreiner K. Organizational Behavior in Construction // Construction Management and Economics. 2013. Vol. 31, № 11. P. 1165-1169.
8. Korol, E., Shushunova N. Benefits of a Modular Green Roof Technology, Procedia Engineering, Volume 161, 2016, pp. 1820-1826.
9. Мелёхин Е.А., Иванов П.С., Малыгин А.Б. Численные исследования модульных систем трёхгранных ферм плоских покрытий зданий // Инженерный вестник Дона, №6, 2022. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7687](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7687).
10. Мелёхин Е.А., Гончаров Н.В., Малыгин А.Б. Трёхгранные фермы с предварительным напряжением для плоских покрытий // Инженерный вестник Дона, №6, 2022. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7704](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7704).

### References

1. Копытов М.М., Ерохин К.А., Матвеев А.В., Мельохин Е.А. Покрытие из трехгранных ферм [Coating of triangular trusses]. Patent No. 2188287 RF, RU MPK7 E 04 From 3/04, 27.08.2002, byul. No. 24, 6 p.
2. Biryulev V.V., Chernov I.N. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura. Novosibirsk, 1974 №4, pp. 8 – 14.

3. Muxanov K.K., Demidov N.N. Issledovanie legkix strukturny`x konstrukcij. Materialy` po lyogkim metallicheskim konstrukciyam. [The study of lightweight structural structures. Materials on light metal structures] M.: Strojizdat, 1975, pp. 160-162.
4. Klyachin A.Z. Metallicheskie reshchaty`e prostranstvenny`e konstrukcii regulyarnoj struktury` (razrabotka, issledovanie, opy`t primeneniya). [Metal lattice spatial structures of regular structure (development, research, application experience)] Ekaterinburg: Diamant, 1994. 276 p.
5. Polyakov L.P., Fajnburg V.M. Modelirovanie stroitel`ny`x konstrukcij. [Modeling of building structures] Kiev, «Budivel`nik», 1975, 160 p.
6. Trushhev A.G. Prostranstvenny`e metallicheskie konstrukcii. [Spatial metal structures.] M.: Strojizdat, 1983, 215 p.
7. Kreiner K. Organizational Behavior in Construction. Construction Management and Economics. 2013. Vol. 31, № 11. pp. 1165-1169.
8. Korol, E., Shushunova N. Benefits of a Modular Green Roof Technology, Procedia Engineering, Volume 161, 2016, pp. 1820-1826.
9. Melyokhin E.A., Ivanov P.S., Maly`gin A.B. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, №6. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/ archive/n6y2022/7687](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7687).
10. Melyokhin E.A., Goncharov N.V., Maly`gin A.B. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, №6. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/ archive/n6y2022/7704](http://ivdon.ru/ru/magazine/ archive/n6y2022/7704).