

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ / CONSTRUCTION STRUCTURES,
BUILDINGS AND STRUCTURES

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.106>

РАСЧЕТ И ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТАЛЬНЫХ ФЕРМЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Научная статья

Ращепкина С.А.^{1,*}, Индеева К.А.², Меланич В.М.³

^{1,2,3} Национальный исследовательский ядерный университет «Московский инженерно-физический институт»,
Балаково, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (rashh2008[at]yandex.ru)

Аннотация

Приведен обзор научных работ по исследованию стальных ферменных конструкций; выявлены достоинства, недостатки различных профилей стержней фермы. Представлен расчет усилий в элементах решетки для пяти профилей изогнутой фермы на постоянные, снеговые и ветровые нагрузки и дана сравнительная их характеристика; показано, что наиболее оптимальные профили для криволинейных ферм являются трубчатое и овальное поперечные сечения. При этом, показано значительное влияние величины ветровой нагрузки на усилия и перемещения в стержнях ферменной конструкции. Выявлено, что перемещения элементов фермы от динамической нагрузки существенно больше, чем от статической составляющей ветровой нагрузки. Поэтому при строительстве в районах с большими ветровыми нагрузками следует особо обратить на динамическое (пульсационное) воздействие ветровой нагрузки.

Проведенный расчет и анализ может быть использован при проектировании ферм сложного очертания в гражданских зданиях и специальных сооружениях.

Ключевые слова: обзор, металл, ферма, расчет, оптимизация, усилия, перемещения.

CALCULATION AND OPTIMAL DESIGN OF STEEL TRUSS STRUCTURES

Research article

Rashchepkina S.A.^{1,*}, Indeeva K.A.², Melanich V.M.³

^{1,2,3} National Nuclear Research University "Moscow Institute of Engineering and Physics", Balakovo, Russian Federation

* Corresponding author (rashh2008[at]yandex.ru)

Abstract

The review of scientific works on research of steel truss structures is presented; advantages, disadvantages of different profiles of truss rods are identified. Calculation of forces in lattice elements for five profiles of curved truss for constant, snow and wind loads is presented, and their comparative characterization is given; it is shown that the most optimal profiles for curved trusses are tubular and oval cross-sections. At the same time, a significant influence of the wind load on the forces and displacements in the bars of the truss structure is shown. It is found that the displacements of truss elements from dynamic load are significantly greater than from the static component of wind load. Therefore, when building in areas with high wind loads, special attention should be paid to the dynamic (pulsation) effect of wind load.

The calculation and analysis carried out can be used in the design of trusses of complex outline in civil buildings and special constructions.

Keywords: review, metal, truss, calculation, optimization, forces, movements.

Введение

Стальные фермы широко применяются в покрытиях промышленных и гражданских зданий, ангаров, вокзалов. Фермы могут быть изготовлены из различных профилей [1], [3], [5], [6], [7] в зависимости от их назначения, агрессивной среды, действующих нагрузок, а также конфигурации и длины здания или сооружения.

Актуальность проводимого исследования заключается в том, что с увеличением пролетов зданий и появлением необычных по очертанию зданий и сооружений требуется проектирование облегченных конструкций покрытия. Как известно, с увеличением пролета масса ферм быстро увеличивается и при пролетах более 36 м она уже работает на собственный вес. В практике проектирования изыскиваются различные конструктивные формы и поперечные сечения, снижающие вес покрытия и одновременно придающие красоту, уникальность и необычность ферменного покрытия. Поэтому представленная тема является весьма актуальной, и ее изучение важно для развития большепролетных покрытий и создания оригинальных, красивых зданий и сооружений.

Вопросами конструктивных решений и узловых сопряжений ферменных конструкций при различных профилях стержней решетки, их оптимальным решением занимались многие исследователи. До недавнего времени легкие стальные фермы проектировались в основном из стержней с сечениями, составленными из двух уголков. Такие сечения имеют большой диапазон площадей, удобны для конструирования узлов на фасонках и крепления к фермам конструкций (балок, прогонов).

В фермах из круглых труб применяют чаще всего электросварные трубы. В таких фермах наиболее рациональны безфасоночные узлы с непосредственным примыканием стержней решетки к поясам, а для этого требуется фигурная резка концов стержней, которая выполняется на специальных машинах. Центрацию стержней производят, как правило, по геометрическим осям. Однако, в случаях неполного использования несущей способности поясной трубы допускается эксцентриситет не более 1/4 диаметра поясной трубы. Одним из основных достоинств сечения из круглых

труб является – хорошая обтекаемость, благодаря чему, ветровое давление меньше, что особенно важно для высоких башенных сооружений.

Нашла широкое применение стальная прямоугольная труба. Для непосредственного примыкания раскосов к поясам с образованием бесфасоночных узлов прямоугольную трубу решетки в заданных по проекту местах подрезают по расчетному сечению и прикрепляют сварочным швом.

Кроме того, для решеток ферм можно использовать готовые прямоугольные трубы, что может привести к существенному положительному эффекту. В качестве заводских соединений решеток вполне применимы фермы из квадратных труб раскосы, которых соединены на ребро [3], которые проще размещать на участках поясов. При этом, уменьшается скопление влаги и промышленной пыли на поверхности стержней, обеспечивается легкая очистка и окраска при эксплуатации.

Существуют решения с возможностью применения решетки из зигзагообразных стержней [4]. Стержни раскосов изогнутые под заданным углом прикреплены сплющенной частью к прямоугольным поясам. Можно осуществить в узле соединение нескольких стержней прямоугольного или ромбического поперечного сечения сплюснутыми частями. Для непосредственного примыкания к поясам с образованием бесфасоночных узлов трубу решетки в заданных по проекту местах сплющивают и двойными гибами придают ей зигзагообразное очертание. Сплющивание и двойные загибы профиля обеспечивают компоновку бесфасоночных узловых соединений без конструктивных эксцентриситетов, характерных для трубчатых ферм из прямоугольных (квадратных) гнутосварных профилей, что исключает появление изгибающих моментов и позитивно влияет на расход металла. При этом, имеются повышенные технико-экономические характеристики, так как материал в поперечном сечении элементов расположен весьма эффективным образом.

Аналогичным путем – сплющивание и двойные загибы профиля можно прикрепить раскосы к поясам различных типов поперечных сечений: ромбического, прямоугольного, чечевицеобразного [4], [5].

Интересные решения представлены в работе [6], где образование поперечного сечения осуществляется путем гнутья металлического листа. Авторы утверждают, что наименьшие деформации возникают при треугольном поперечном сечении. За ним идет круглое сечение, а затем пяти- и шестигранные сечения. Делается вывод, что для дальнейших исследований можно ограничить область геометрических форм многогранных сечений. Данные поперечные сечения рекомендуются для поясов ферм покрытий.

В статье [1] были разработаны стандартные конструкции ферм покрытия с уклоном 10% для пролетов 24, 30, 36 метров для разных комбинаций нагрузок. Расчёт усилий и подбор сечений элементов ферм был произведён в программном комплексе SCAD Office. В работе [2] анализируется применение криволинейной фермы общественного здания аэропорта имеющего необычную выразительную форму в плане хорошо вписывающейся в функционально-технологический процесс.

В статье [7] приводится технико-экономическое сравнение результатов расчета для двух марок стали и проанализированы их особенности. Дано сравнение расхода стали и стоимости поясов криволинейных стропильных ферм по результатам которых показано, что использование в исследуемых конструкциях сталей повышенной прочности является менее металлоёмким и более экономичным решением.

Авторами статьи проведен краткий обзор различных типов ферменных конструкций, указаны достоинства, недостатки. Было выявлено, что криволинейная ферма обладает хорошей выразительностью, имеет необычное очертание [2], придающее красоту и уникальность зданию своей формой.

Целью данной работы является установление влияния различных профилей на усилия в стальной криволинейной ферме и выявление наиболее оптимального решения, а также особенностей воздействия статической и динамической ветровой нагрузки на перемещения изогнутой ферменной конструкции. Авторам не известны исследования по поставленной задаче.

Новизна полученных результатов состоит в установлении степени влияния типа профиля на усилия в элементах изогнутой фермы. При этом выявлено, что минимальные усилия возникают при профиле из трубы круглого или овального поперечного сечения при всех возможных нагрузках и воздействиях. Показано, что при динамической составляющей ветровой нагрузке перемещения элементов криволинейной ферменной конструкции больше чем в 1,5, чем при статической нагрузке.

Методы и принципы исследования

В практике проектирования при расчете стальных сооружений для широкого спектра очертаний широко применяются различные программные комплексы. Результаты расчета высотного сооружения в программе Scad приведены в статье [8]. В статье [9] выделены возможности программного комплекса STAR-CD для проведения исследований при воздействии ветрового потока. В работе [10] приведены результаты исследования воздействия ветрового потока на высотное сооружение с помощью метода конечных элементов. Множество программных комплексов имеют свои достоинства и недостатки. В рассматриваемой работе применен известный и апробированный программный комплекс ЛИРА [11].

В данной статье рассмотрен расчет усилий и перемещений в элементах криволинейной фермы и выполнен анализ влияния типа профилей на ее несущую способность при следующих исходных данных: пролет фермы $L=37\text{м}$; высота изогнутой части сооружения на максимальной отметке $H=15\text{м}$; расстояние между поясами по длине фермы переменное. Ветровой район – III, снеговой район – II. Расчет велся в соответствии со Сводами правил: СП 20.13330.2016, СП 16.13330.2017.

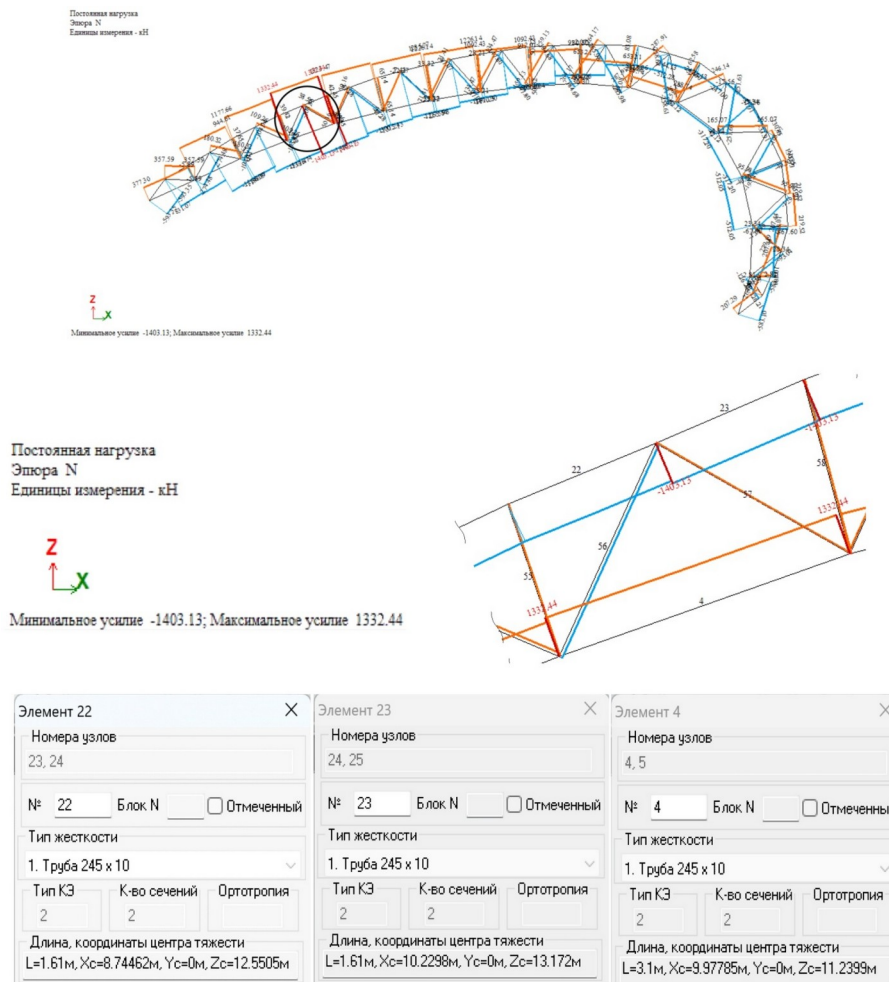


Рисунок 1 - К расчету фермы криволинейного очертания

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.106.1>

Расчет криволинейно фермы велся на постоянную, снеговую и ветровую нагрузки в программном комплексе Лира, где лежит метод конечных элементов, реализованный в форме перемещений. Выбор именно этой формы объясняется простотой ее алгоритмизации и физической интерпретации. Причем, в программном комплексе динамическая (пульсационная) составляющая ветровой нагрузки создается автоматически при введении параметров ветровой нагрузки. На рис. 1 показано: фрагмент усилий в изогнутой ферме и элементы, выбранные для анализа: 22, 23 – верхний пояс, 4 – нижний пояс, 56, 57 – раскосы, 55, 56 – стойки.

Основные результаты

3.1. Влияния типа профилей на усилия в криволинейной ферме

Для оценки влияния типа профилей на несущую способность криволинейной фермы было принято пять вариантов выполнения стержней стальной криволинейной фермы (из различных профилей) с использованием расчета в программном комплексе Лира [11]. Для исследования эффективности применения оптимального профиля был рассмотрен фрагмент фермы. Анализ проводился для 22 элемента верхнего пояса криволинейной фермы (рис. 1).

Результаты расчета усилий в поясе (элемент №22) представлен на рисунке 3, на котором указаны поперечные сечения:

- 1) два спаренных уголка;
- 2) круглая труба;
- 3) прямоугольная труба;
- 4) овальная труба;
- 5) ромбическая.

Анализируя полученные результаты (рис.2) можно сделать вывод, что по усилиям N наиболее оптимальным для поясов ферменной конструкции является трубчатое сечение. При сравнении данных расчета в исследуемом поясе для двух спаренных уголков и трубчатом профиле при постоянной нагрузке процент расхождения составляет: по усилиям N – 0,97%; по моментам M_y – 18,75%; по поперечным силам Q_z – 6,07%.

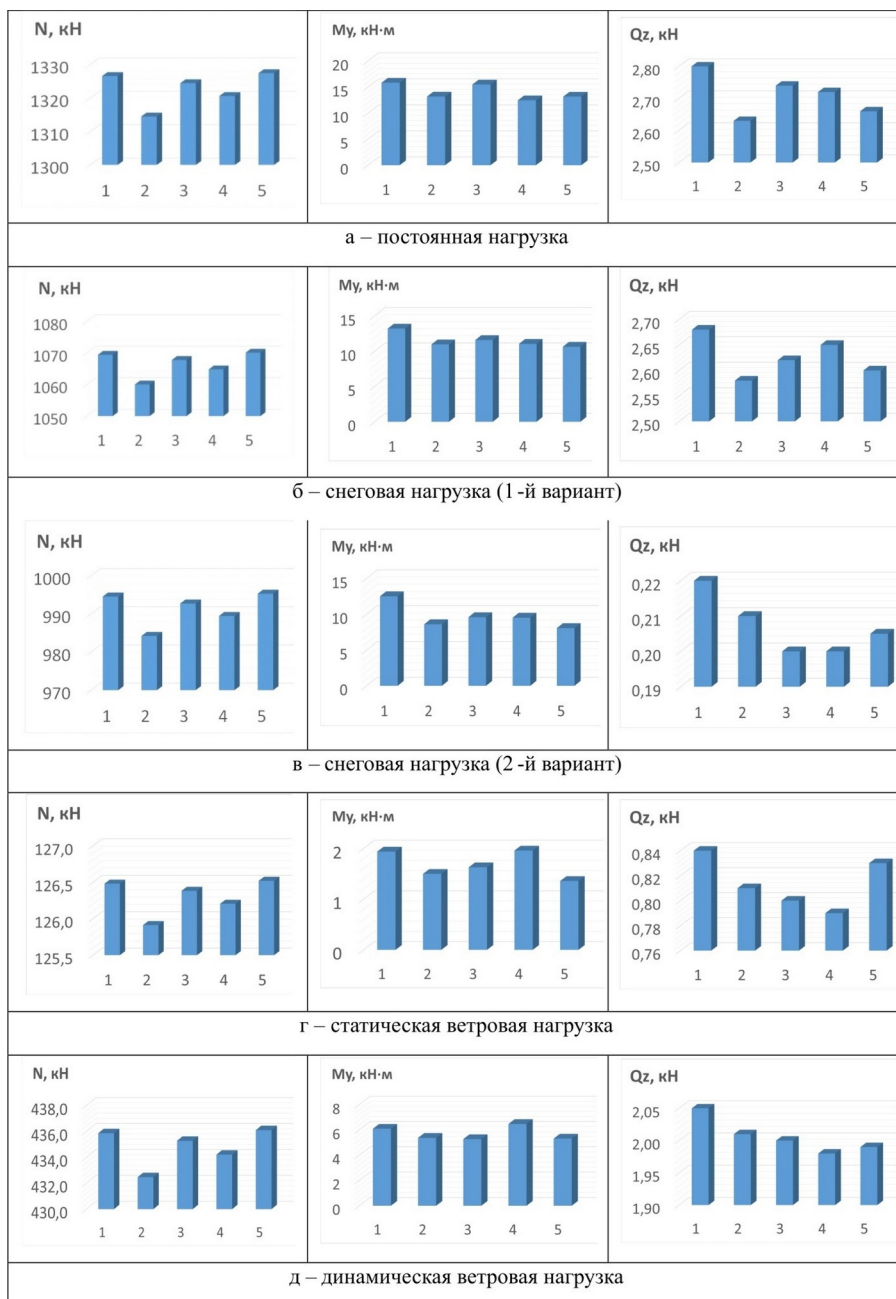


Рисунок 2 - Гистограммы усилий в верхнем поясе:

1 – два спаренных уголка; 2 – круглая труба; 3 – прямоугольная труба; 4 – овальная труба; 5 – ромбическая
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.106.2>

Примечание: элемент №22

Следует отметить, что существенный разброс по всем исследуемым профилям наблюдается по поперечным усилиям Q_z . При действии постоянной нагрузки и снеговой нагрузки по первому варианту лидирует трубчатое сечение – оно является оптимальным. В то же время при снеговой нагрузке по второму варианту и воздействию ветровой нагрузки (по двум вариантам) явно преимущество имеет овальное поперечное сечение.

При сравнении данных расчета в исследуемом верхнем поясе для двух спаренных уголков и овальном профиле при ветровой нагрузке (первый вариант) процент расхождения составляет: по усилиям N – 0,23%; по моментам M_y – 19,58%; по поперечным силам Q_z – 5,95%. Следует заметить, что по усилиям расхождения не большие.

Таким образом, проведенный расчет в программном комплексе Лира и анализ полученных результатов (по различным видам профилей, рисунок 3), показал, что для поясов ферменных конструкций по продольным усилиям N наиболее целесообразным (оптимальным) решением является применение профиля из круглых (вариант 2) и овальных труб.

3.2. Перемещения элементов криволинейной фермы

Для наиболее оптимального варианта профиля – фермы трубчатого поперечного сечения были исследованы перемещения ее элементов.

На рис. 3 показана мозаика перемещений при действии ветровой нагрузки по двум вариантам: статическая и пульсационная (динамическая) нагрузка, а также отмечены максимальные и минимальные значения перемещений элементов криволинейной фермы.

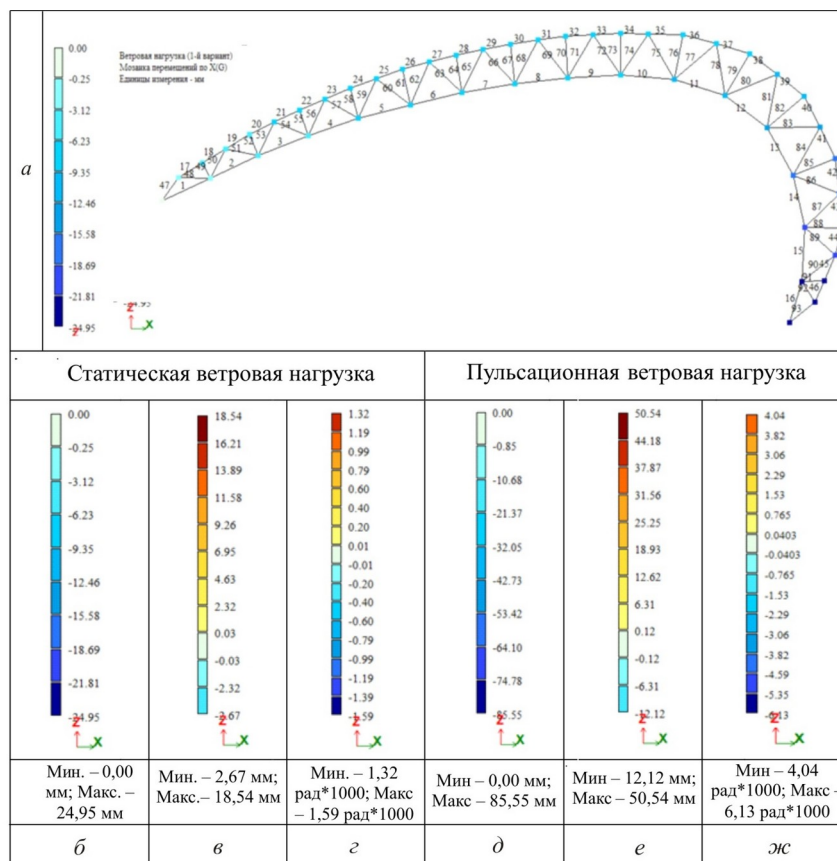


Рисунок 3 - Мозаика перемещений элементов фермы трубчатого поперечного сечения от воздействия ветровой нагрузки:

1 вариант: а, б – по X; в – по Z; г – по UY; 2 вариант: д – по X; е – по Z; ж – по UY

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.106.3>

Анализ мозаик перемещений фермы трубчатого поперечного сечения по разным направлениям (рис.3 и рис.4) показал:

- при статической ветровой нагрузке максимальные перемещения возникают в направлении X и составляют 24,95 мм, а в направлении Z максимальные перемещения составляют 18,54 мм. Разница составляет: 1,34 раз, то есть ведущие усилия по X;
- при динамической нагрузке максимальные перемещения наблюдаются в направлении X и составляют 85,55 мм, в то же время как по Z они больше в полтора раза (1,69 раз);
- замечено, что при второй ветровой нагрузке перемещения заметно увеличились, то есть динамика (пульсация) играет существенную роль. Так, при сравнении максимальных значений перемещений при статике и динамике: по X разница составляет: 3,42 раз; по Z – 2,74 раз; по UY – 3,85 раз.

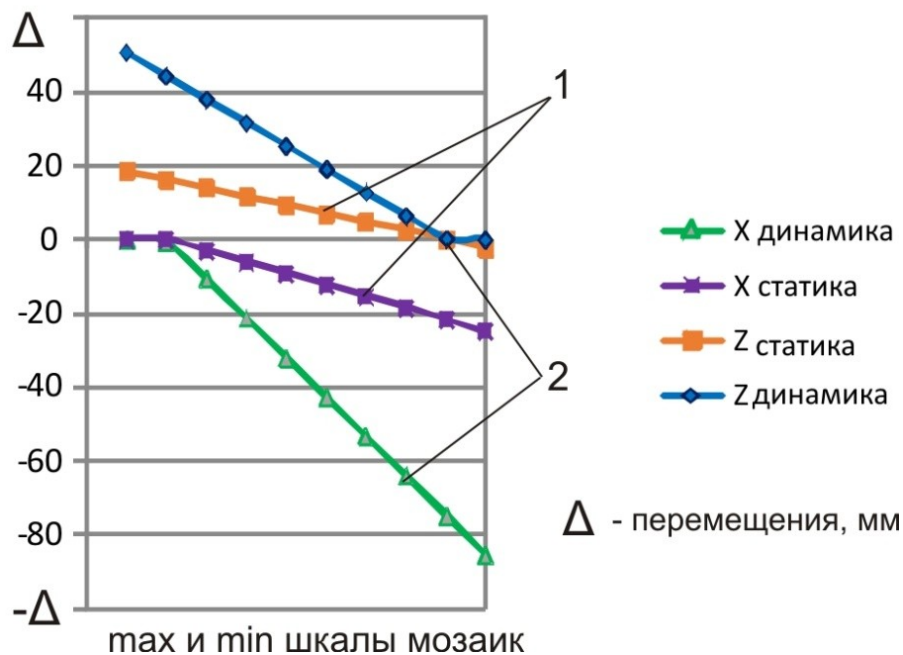


Рисунок 4 - Изменение перемещений трубчатой фермы от ветрового воздействия по X и Z:
 1 – статическая нагрузка; 2 – динамическая нагрузка
 DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.106.4>

Таким образом, перемещения по всем направлениям при пульсации (2-й вариант ветровых воздействий) увеличивается в среднем более, чем три раза.

Анализ разных поперечных сечений элементов ферменных конструкций показал существенное влияние различных профилей на несущую способность элементов фермы, то есть на значение усилий и перемещений. Выявлено, что наиболее оптимальный вариант – это проектирование элементов поясов криволинейной фермы уникальной формы из круглых труб либо овального поперечного сечения; показано, что для всех заданных профилей перемещения элементов фермы не превышают предельно допустимые.

Заключение

Строительство зданий с фермами уникальной формы требует особого внимания при выборе оптимального поперечного сечения и во многом зависит от сферы применения изогнутой ферменной конструкции. При строительстве в районах с большими ветровыми нагрузками следует обратить на воздействие динамической составляющей ветровой нагрузки, при которой перемещения элементов фермы увеличиваются более, чем 1,5 раза в сравнении со статической нагрузкой. При этом необходимо учитывать тот факт, что форма и размеры поперечного сечения могут влиять на процесс изготовления и монтажа конструкции, а также на бюджет и возможности производства.

Проведенный расчет и анализ может быть использован при проектировании ферм сложного очертания в гражданских и промышленных зданиях и специальных сооружениях.

Финансирование

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Funding

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Барановский М.Ю. Стандартизированные ферменные конструкции с уклоном 10% пролетами 24, 30, 36 метров / М.Ю. Барановский, В.А. Тарасов // Строительство уникальных зданий и сооружений. — 2014. — № 7(22). — С. 92-106.
2. Ращепкина С.А. Проектирование аэропортов / С.А. Ращепкина, О.Г. Тажинова. — Саратов: СГТУ. 2015. — 112 с.

3. Кузнецов А.Ф. Фермы из квадратных труб на ребро без фасонки, устойчивые против коррозии / А.Ф. Кузнецов, В.А. Кузнецов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Строительство и архитектура». — 2011 — № 16. — С. 7-10.
4. Марутян А.С. Оптимизация конструкций с решетками из круглых и овальных труб / А.С.Марутян, В.Н. Оробинская // Вестник МГСУ. — 2016. — № 10. — С. 45-57.
5. Марутян А.С. Оптимизация ферменных конструкций с решетками из прямоугольных труб / А.С. Марутян // Строительная механика и расчет сооружений. — 2020. — №5. — С. 69-77.
6. Салахутдинов М.А. Стальные фермы с поясами из труб многогранного сечения / М.А. Салахутдинов, И.Л. Кузнецов, С.Ф. Саянов // Строительные конструкции, здания и сооружения. Известия КГАСУ. — 2016. — № 4 (38). — С. 236-242.
7. Величко В.Ю. Особенности расчёта криволинейных стропильных ферм и сравнение марок стали ВСТЗПС4 И 16Г2АФ / В.Ю. Величко // Инженерный вестник Дона. — 2018. — №2.
8. Мальков Н.М. Постановка задачи численного моделирования процесса обтекания газоотводящих стволов вытяжных башен / Н.М. Мальков, Д.А. Кушова // Вестник инженерной школы ДВФУ. — 2012. — №1 (10). — С.121-124.
9. Атаманчук А.В. Ветровые нагрузки на элементы трехгранных башен и пакеты вытяжных труб / А.В. Атаманчук, И.С. Холопов, Д.Д. Чернышев // Металлические конструкции. — 2007. — Т.13. — №1. — С. 17-24.
10. Ключникова О.Н. Сравнительный анализ поведения стальной решетчатой башни в ветровом потоке / О.Н. Ключникова, Л.Ю. Колегова // Южно-сибирский вестник. — Бийск: Политех, 2013. — №1. — С. 87-89.
11. Городецкий А.С. Программный комплекс ЛИРА-САПР / А.С. Городецкий, М.А. Ромашкина, В.П. Титок. — М., 2018. — 254 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Baranovskij M.Ju. Standartizirovannye fermennye konstrukcii s uklonom 10% proletami 24, 30, 36 metrov [Standardized truss structures with a slope of 10% with spans of 24, 30, 36 meters] / M.Ju. Baranovskij, V.A. Tarasov // Stroitel'stvo unikal'nyh zdaniy i sooruzhenij [Construction of unique buildings and structures]. — 2014. — № 7(22). — P. 92-106. [in Russian]
2. Rashhepkina S.A. Proektirovanie ajeroportov [Airport Design] / S.A. Rashhepkina, O.G. Tazhinova. — Saratov: SGTU. 2015. — 112 p. [in Russian]
3. Kuznecov A.F. Fermy iz kvadratnyh trub na rebro bez fasonok, ustojchivye protiv korrozii [Farms of square pipes on a rib without gussets, resistant to corrosion] / A.F. Kuznecov, V.A. Kuznecov // Vestnik Juzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Serija «Stroitel'stvo i arhitektura» [Bulletin of South Ural State University. "Building and Architecture" series]. — 2011 — № 16. — P. 7-10. [in Russian]
4. Marutjan A.S. Optimizacija konstrukcij s reshetkami iz kruglyh i oval'nyh trub [Optimization of structures with lattices from round and oval pipes] / A.S..Marutjan, V.N. Orobinskaja // Vestnik MGSU [Bulletin of MGSU]. — 2016. — № 10. — P. 45-57. [in Russian]
5. Marutjan A.S. Optimizacija fermennyh konstrukcij s reshetkami iz prjamougol'nyh trub [Optimization of truss structures with lattices made of rectangular pipes] / A.S. Marutjan // Stroitel'naja mehanika i raschet sooruzhenij [Construction mechanics and calculation of structures]. — 2020. — №5. — P. 69-77. [in Russian]
6. Salahutdinov M.A. Stal'nye fermy s pojasami iz trub mnogogrannogo sechenija [Steel trusses with chords made of multifaceted pipes] / M.A. Salahutdinov, I.L. Kuznecov, S.F. Sajanov // Stroitel'nye konstrukcii, zdaniya i sooruzhenija. Izvestija KGASU [Building structures, buildings and structures. News of KGASU]. — 2016. — № 4 (38). — P. 236-242. [in Russian]
7. Velichko V.Ju. Osobennosti raschjota krivolinejnyh stropil'nyh ferm i sravnenie marok stali VST3PS4 I 16G2AF [Features of calculation of curved rafter trusses and comparison of steel grades VST3PS4 I 16G2AF] / V.Ju. Velichko // Inzhenernyj vestnik Dona [Engineering Bulletin of Don]. — 2018. — №2. [in Russian]
8. Mal'kov N.M. Postanovka zadachi chislenogo modelirovanija processa obtekanija gazootvodjashhijh stvolov vytjazhnyh bashen [Setting the problem of numerical modeling of the process of flowing around the gas exhaust shafts of exhaust towers] / N.M. Mal'kov, D.A. Kushova // Vestnik inzhenernoj shkoly DVFU [Bulletin of the FEFU Engineering School]. — 2012. — №1 (10). — P.121-124. [in Russian]
9. Atamanchuk A.V. Vetrovye nagruzki na jelementy trehgrannyh bashen i pakety vytjazhnyh trub [Wind loads on trihedral tower elements and stack packs] / A.V. Atamanchuk, I.S. Holopov, D.D. Chernyshev // Metallicheskie konstrukcii [Metal structures]. — 2007. — Vol.13. — №1. — S. 17-24. [in Russian]
10. Kljuchnikova O.N. Sravnitel'nyj analiz povedenija stal'noj reshetchatoj bashni v vetrovom potoke [Comparative analysis of the behavior of a steel lattice tower in a wind stream] / O.N. Kljuchnikova, L.Ju. Kolegova // Juzhno-sibirskij vestnik [South Siberian Bulletin]. — Bijsk: Politeh, 2013. — №1. — P. 87-89. [in Russian]
11. Gorodeckij A.S. Programmnyj kompleks LIRA-SAPR [Software package LIRA-CAD] / A.S. Gorodeckij, M.A. Romashkina, V.P. Titok. — M., 2018. — 254 p. [in Russian]