

УДК: 69.024.81

DOI: 10.48612/NewsKSUAE/75.26

EDN: RJZHXJ



Проектирование стальных конструкций с учетом стоимостных показателей металлопроката

А.В. Исаев¹, Л.Р. Гимранов¹, Р.Г. Гайнетдинов¹, А.Ф. Салимов, Л.Э. Гафурова¹

¹ Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. *Постановка задачи.* Проектирование стальных конструкций, несмотря на его значимость в современной архитектуре и строительстве, сталкивается с вызовами, связанными с колебаниями цен на металлопрокат и необходимостью обеспечения экономической эффективности. На фоне растущих требований к конкретности строительных решений, а также необходимости соблюдения норм и стандартов, определена *цель* – разработка методов, позволяющих интегрировать стоимостные показатели металлопроката на всех этапах проектирования. Сформулированы следующие *задачи*: установление характерных тенденций в стоимости и ассортименте металлопроката, а также создание методик проектирования и нахождение таких конструктивных решений, которые позволят получить металлический каркас с наилучшими ценовыми характеристиками. Применяя оптимизационные методы и инструментарий, включая библиотеку «Scipy» и язык программирования «Python», предполагается представить площадь поперечного сечения несущих конструкций, как непрерывную зависимость от одного или двух аргументов. На основе анализа большого массива информации, определено, как распределяются цены на ключевые позиции металлопроката.

Результаты. Обработка больших данных позволила разработать методику определения стоимости конструктивного решения. Эта методика выявляет распределение цен на основные виды металлопроката, что позволяет оптимизировать проектирование не только по минимальному расходу стали, но и по критерию минимальной стоимости.

Выводы. Использование данного подхода способствует созданию более экономичных, эффективных и конкурентоспособных проектов стальных конструкций.

Ключевые слова: металлопрокат, стальные конструкции, оптимальное проектирование, изменение цен, методы оптимизации

Для цитирования: Исаев А.В., Гимранов Л.Р., Гайнетдинов Р.Г., Салимов А.Ф., Гафурова Л.Э. Проектирование стальных конструкций с учетом стоимостных показателей металлопроката // Известия КГАСУ, 2026, № 1 (75), с. 323-334, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/75.26, EDN: RJZHXJ

Design of steel structures taking into account the cost parameters of rolled metal products

A.V. Isaev¹, L.R. Gimranov¹, R.G. Gainetdinov¹, A.F. Salimov, L.E. Gafurova¹

¹Kazan State University of Architecture and Engineering,
Kazan, Russian Federation

Abstract. *Problem statement.* The design of steel structures, despite its importance in modern architecture and construction, faces challenges related to fluctuating prices for rolled metal products and the need to ensure cost efficiency. Against the backdrop of growing demands for the specificity of construction solutions, as well as the need to comply with codes and standards, the goal has been set to develop methods for integrating the cost indicators of rolled metal products across all design stages. The following tasks have been formulated: identifying characteristic trends in the cost and range of rolled metal products, as well as developing design methods and

finding design solutions that will produce a metal frame with the best cost characteristics. Using optimization methods and tools, including the Scipy library and the Python programming language, it is proposed to represent the cross-sectional area of load-bearing structures as a continuous function of one or two arguments. Based on the analysis of a large data set, the distribution of prices for key rolled metal products is determined.

Results. Big data processing enabled the development of a methodology for determining the cost of a structural solution. This methodology identifies the price distribution for key types of rolled metal products, enabling design optimization not only for minimal steel consumption but also for minimal cost.

Conclusions. Using this approach contributes to the creation of more cost-effective, efficient, and competitive steel structure designs.

Keywords: rolled metal products, steel structures, optimal design, price changes, optimization methods.

For citation: Isaev A.V., Gimranov L.R., Gainetdinov R.G., Salimov A.F., Gafurova L.E. Design of steel structures taking into account the cost parameters of rolled metal products // News of KSUAE, 2026, № 1 (75), p. 323-334, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/75.26, EDN: RJZHXJ

1. Введение

Основным сырьем для строительных конструкций являются: сталь, железобетон, дерево, алюминий и композитные материалы. Рациональное разделение использования данных материалов в конструкциях есть ключ к снижению стоимости строительства. Критерии выбора материала в строительстве: удельный вес, физико-механические характеристики, трудозатраты на изготовления, транспортировку, монтаж, соответствие требованиям к эксплуатации, а также экономия дефицитных материалов. Требования экономии стали в течение длительного времени являлись определяющими для установления области применения стальных конструкций, при этом часто недостаточно учитывались весовые и стоимостные показатели.

В последние годы волатильность цен на металлопрокат заставляет исследователей пересматривать классические подходы к проектированию. Так, в работе Cucuzza et al. (2024) [1] показано, что учет стоимости отходов раскроя позволяет сократить затраты на 50%, даже при незначительном увеличении массы. Askar et al. (2025) [2] демонстрируют эффективность применения нейронных сетей для предиктивного анализа оптимальных параметров сечений. В отечественной практике Василькин и Зубков (2022) подчеркивают важность интеграции стоимостных критериев в BIM-технологии [3].

На сегодняшний день практика проектирования с применением стальных конструкций во многих проектных организациях включает в себя ряд конструктивных решений для колонн, балок, стропильных конструкций покрытия, прогонов. Конструктивные элементы состоят из горячекатаного стального проката: двутавры, швеллеры, уголки, а также гнутые замкнутые сварные профили (ГСП) [4, 5]. Сплошные колонны и балки выполняют, как правило, из профиля двутаврового сечения [6-8], стропильные фермы из ГСП прямоугольного или квадратного сечения [9-11], а прогоны из швеллеров с индексами У и П [12]. Упомянутые конструктивные решения основаны на базе типовых проектов, приведенные в сериях, которые разработаны более 30 лет назад, к примеру, серия «Молодечно» 1.460.3-14/90 и 1.460.3-23.98. Данные серии получили широкое распространение в отечественной практике проектирования благодаря своей технологичности и относительной легкости. Однако в современных условиях рыночного ценообразования на металлопрокат, заложенные в них металлоемкие решения не всегда являются экономически оправданными, что требует проведения актуального сравнительного анализа с учетом текущих стоимостных показателей. Стропильные фермы, выполненные согласно данной серии, являются оптимальными, с точки зрения, материалоемкости и цены. Они имеют бесфасоночные узлы и замкнутые поперечные сечения из ГСП [13, 14]. При этом ГСП изготавливают из листовой стали путем автоматизированных процессов гибки и сварки, что также является довольно эффективным по цене. Однако горячекатаный прокат остается востребованным не в

полном спектре своей номенклатуры, что создает при применении типовых серийных конструктивных решений некоторый дисбаланс по стоимости, несмотря на то, что по массе данные конструктивные решения близки к оптимально возможным. Таким образом, получается, что оптимальная по весу конструктивная форма не всегда является оптимальной по стоимости. При этом инженеры-проектировщики и конструкторы не имеют стимула к модификации классических конструктивных форм и поиска решений, являющихся близким к оптимальным с учетом удельной стоимости, а не удельного веса металлокаркаса [15]. В связи с этим возникает вопрос разработки методов, позволяющие инженерам-проектировщикам, на стадии проектирования принять оптимальные конструктивные решения по несущей способности, весу и стоимости.

Цель работы. Разработка методов, которые позволят интегрировать стоимостные показатели металлопроката на всех этапах проектирования.

Задачи:

1. Выявить определенные закономерности в ценах и ассортименте металлопроката. Разработать подходы к проектированию и найти такие конструктивные формы, чтобы металлический каркас имел оптимальные показатели стоимости.
2. Применить методы оптимизации и программные средства, такие как библиотека «Scipy» и язык программирования «Python». С их помощью аппроксимировать площадь поперечного сечения несущих элементов, которая представляет собой непрерывную функцию одного или двух параметров.
3. Обработать большой массив данных и на основе этого получить распределение цен на основные наименования металлопроката. Далее следует сопоставить эти данные и выявить определенные закономерности.

2. Материалы и методы.

Стандартный процесс подбора изгибаемых элементов выполняется по СП 16.13330.2017 по следующей формуле:

$$W_{tr,min} = \frac{M}{R_y \gamma_c} \quad (1)$$

где M – изгибающий момент, R_y – расчетное сопротивление стали, γ_c – коэффициент условий работы.

При этом значения требуемого момента сопротивления $W_{tr,min}$ должны быть не ниже дискретных значений момента сопротивления в рамках сортамента металлопроката. После чего могут быть определены весовые и экономические показатели. Таким образом, складывается ситуация, в которой проектировщик, закладывая сечения несущих элементов и руководствуясь принципами оптимума массы, не всегда получает оптимальные по цене конструктивные решения, а служба заказчика не всегда обладает возможностями перерасчета конструктивных решений, исходя из оптимума стоимости [16-17].

Загрузив базу данных сортовентов наиболее часто используемых стальных прокатных профилей, разработан алгоритм на языке программирования «Python» (разработка авторов), где проведен анализ зависимостей основных геометрических характеристик относительно друг друга. Далее аппроксимировав эти зависимости непрерывными функциями одной или двух переменных, можно определить металлоемкость конструктивного решения без ограничений связанных с дискретностью сортамента. Для швеллеров и двутавров, зависимости момента сопротивления от площади поперечного сечения аппроксимировались квадратичной кривой, далее решением квадратичного уравнения получалась обратная зависимость площади поперечного сечения от момента сопротивления, как непрерывной функции. Для получения непрерывной функции для ГСП профилей использовался алгоритм оптимизации функции «Optimize» библиотеки «Scipy» языка программирования «Python». Исходные данные брались из сортамента по ГОСТ 30245-2012. Задавалась функция вида:

$A(W,t) = (a * W^2 + b * t^2 + c * W * t) * d$ – для которой искали коэффициенты: a, b, c, d .

Используя возможности алгоритмов машинного обучения, можно выявить ассоциации между определенными признаками в наименовании профиля и удельной

стоимости, а также между геометрическими параметрами сечений [18-20]. Получив аппроксимационные зависимости удельной стоимости от геометрических параметров сечений, зная исходные данные для проектирования и непрерывную функцию площади поперечного сечения, можно определить непрерывную функцию удельной стоимости, следовательно, добиться оптимальных параметров стоимости, а не веса конструкций [16–18].

3. Результаты и обсуждение

Для получения непрерывной функции зависимости площади от момента сопротивления и толщины стенки профиля, выбраны наиболее распространенные типы фасонного проката: швеллеры, двутавры, ГСП квадратные и прямоугольные.

Аппроксимация непрерывной функции площади A_b (см²) от момента сопротивления $W_{x,тр}$ (см³) для швеллеров может быть выполнена по следующей формуле:

$$A_{ch} = \sqrt{605.53 + 7.57 * W_{x,тр} - 18.61} \quad (2)$$

Аппроксимация непрерывной функции площади $A_{дв,б}$ (см²) от момента сопротивления $W_{x,тр}$ (см³) для двутавров балочных может быть выполнена по следующей формуле:

$$A_{дв,б} = \sqrt{4073 + 12.41 * W_{x,тр} - 53.87} \quad (3)$$

Аппроксимация непрерывной функции площади A_{rhs} (см²) от момента сопротивления $W_{x,тр}$ (см³) и толщины t (см) для прямоугольных ГСП может быть выполнена по следующей формуле:

$$A_{rhs} = \sqrt{-\frac{W_{x,тр}^2}{1600} + 24.716 * t^2 + 10.63 * W_{x,тр} t^2} \quad (4)$$

Аппроксимация непрерывной функции площади A_{shs} (см²) от момента сопротивления $W_{x,тр}$ (см³) и толщины t (см) для квадратных ГСП может быть выполнена по следующей формуле:

$$A_{shs} = \sqrt{-\frac{W_{x,тр}^2}{2287} + 28.575 * t^2 + 11.72 * W_{x,тр} * t} \quad (5)$$

Зависимость удельной стоимости руб/т от момента сопротивления W для швеллеров из стали класса С345 (рис.1):

$$C'_{sh,345} = \frac{37674}{(1 + e^{-W_{x,тр}+14})} + 93876 \quad (6)$$

Зависимость удельной стоимости руб/т от момента сопротивления W для двутавров из класса стали С345:

$$C'_{DV,345} = -\frac{36900}{(1 + e^{-0.08(W_{x,тр}-180)})} + 136150 \quad (7)$$

Анализируя ценовое распределение по вышеупомянутой номенклатуре профилей, получаем зависимость удельной стоимости руб/т от момента сопротивления W для швеллеров из класса стали С245:

$$C'_{sh,245} = \frac{38800}{(1 + e^{-W_{x,тр}+145})} + 93825 \quad (8)$$

Зависимость удельной стоимости руб/т от момента сопротивления W для двутавров из класса стали С245:

$$C'_{DV,245} = -\frac{34433}{(1 + e^{-0.08(W_{x,тр}-175)})} + 125633 \quad (9)$$

Аппроксимирующие зависимости, полученные методами обработки и оптимизации данных в библиотеке «Scipy» языка программирования «Python» для удельной стоимости ГСП от приведенных параметров Ψ и толщины t , имеют следующий вид:

$$C'_{ГСП_ПР_345} = 397.4 \Psi^2 + 5490 t^2 - 167350 \Psi * t + 245113 \quad (10)$$

$$C'_{ГСП_КВ_345} = 494 \Psi^2 + 11424 t^2 - 104412 \Psi * t + 181498 \quad (11)$$

$$C'_{ГСП_ПР_245} = 177 \Psi^2 + 7475 t^2 - 203942 \Psi * t + 271945 \quad (12)$$

$$C'_{ГСП_КВ_245} = 276 \Psi^2 + 11914 t^2 - 153498 \Psi * t + 219006, \quad (13)$$

Коэффициенты в уравнениях (10)-(13) являются эмпирическими константами, обеспечивающими размерность руб./т).

где

$$\psi = \frac{1000}{100t+A} \quad (14)$$

t – толщина ГСП, (см)

A_s – площадь ГСП (см²), определенная по формуле (4) или (5)

Зависимость удельной стоимости руб/т от толщины t для листовой стали класса С245:

$$C'_{pl,245} = \frac{13450}{(1+e^{-3(t-1.6)})} + 66386 \quad (15)$$

Зависимость удельной стоимости руб/т от толщины t для листовой стали класса С345:

$$C'_{pl,345} = \frac{17950}{(1+e^{-3(t-2)})} + 81682 \quad (16)$$

Таким образом, стоимость погонного метра конструктивного элемента в рублях может быть определена, используя приведенные выше аппроксимирующие функции по формуле при заданном требуемом моменте сопротивления $W_{тр}$ и толщине t :

$$C_{пр} = \frac{C'_{пр} * 0.785 * A_{пр}}{1000} \quad (17)$$

где $A_{пр}$ – площадь (см²)

$C'_{пр}$ – относительная стоимость профиля (руб./т.), определенная по формулам: (6) – (16)

Для оценки эффективности использования той или иной марки стали предлагается ввести относительный показатель конструктивно-стоимостной эффективности k_{eff} , определяемый по формуле:

$$k_{eff} = \frac{C'}{R_y} \quad (18)$$

Вышеизложенная методика оценки удельной стоимости позволяет отдельно оценить удельную стоимость конструкций по стоимости погонного метра и достигнуть скорее оптимальной стоимости несущего стального каркаса, нежели чем его минимальной массы.

Например, функцию стоимости квадратного метра прогонного покрытия из швеллеров можно записать в виде функции параметров равномерно распределенной нагрузки – g (кг/см²), шага прогонов – b (см) и пролета прогонов – l (см) при использовании стали класса С345 в следующем виде:

$$C[g, b, l]_{C345} = \left[\frac{29.574}{\left(1+e^{-\frac{gbl^2}{3450*8}+145}\right)} + 73.653 \right] \left(\sqrt{605.53 + 7.57 * \frac{gbl^2}{3450*8}} - 18.61 \right) / b \quad (19)$$

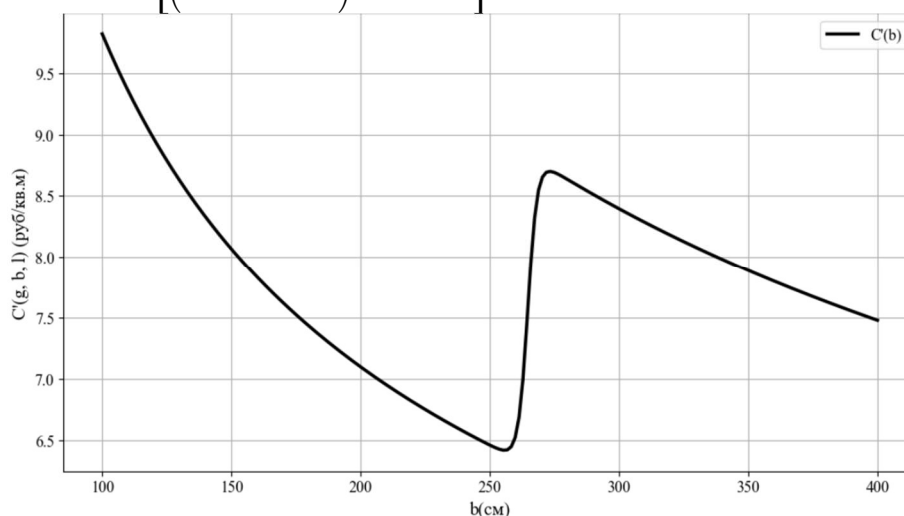


Рис. 1. График зависимости стоимости квадратного метра прогонного покрытия от шага расстановки прогонов (иллюстрация авторов)

Fig. 1. Graph of the dependence of the cost per square meter of purlin roofing on the spacing of the purlins (illustration by the authors)

После чего можно определить оптимальный шаг прогонов с учетом минимизации удельной стоимости прогона на погонный метр (рис. 1). Данный график демонстрирует наличие выраженного минимума стоимости, что позволяет определить оптимальный шаг b при заданных параметрах нагрузки и пролета при исполнении прогонов из швеллеров.

Анализируя график можно видеть, что аппроксимирующие функции корректно отражают тот факт, что удельная стоимость швеллеров №24 и №27 в 1.5 раза выше, чем остальной номенклатуры по соответствующему ГОСТ 8240-97. Таким образом, проектировщик на стадии расчета покрытия получает возможность разработать конструктивное решение, при котором можно достичь минимума стоимости покрытия.

Еще одним примером может служить сравнение вариантов исполнения балочной клетки с различным шагом установки балок (рис. 2). Балочная клетка включает главные балки, второстепенные балки, балки настила и настил. При этом шаг балок настила и второстепенных балок может быть разным. Выполняется поиск оптимального шага с учетом оптимума массы и оптимума стоимости (рис. 3). К примеру, более редкий шаг балок увеличивает их сечение, что позволяет использовать принцип концентрации металла для оптимума массы, однако приводит к большему расходу стали на настил. Сравнение поверхностей оптимизации по массе и стоимости наглядно показывает несовпадение точек оптимума, что подтверждает тезис о необходимости учета стоимостных факторов наряду с весовыми. К примеру, вследствие сложившейся рыночной конъюнктуры определенная номенклатура двутавровых балок имеет более высокую удельную стоимость, следовательно, использование шагов балок, где будет задействована более дорогая номенклатура сечений, повысит стоимость даже при условии минимума общей массы. На рис. 3 (б) можно видеть, что для балочной клетки размером 14×7 м оптимальный по общей массе балок и настила (4248 кг на ячейку 14×7) шаг, при которой вдоль пролета главной балки располагается 3 второстепенные балки ($14/4=3.5$ м), а вдоль пролета второстепенной балки располагается 6 балок настила ($7/6=1.167$ м). Однако если смотреть на оптимум стоимости (373 т.р. на ячейку 14×7) оптимальными шагами являются для второстепенных балок и балок настила - ($14/3=4.67$ м) и ($7/6=1.167$ м) соответственно.

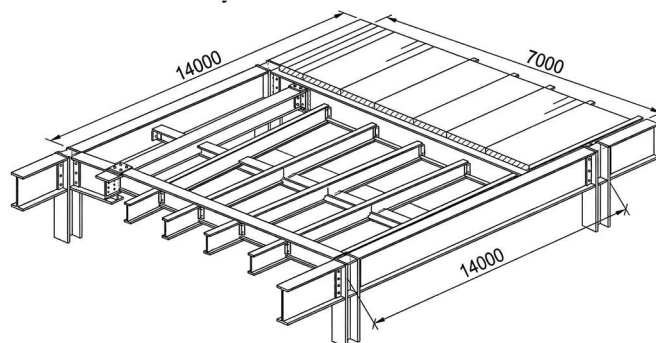


Рис. 2. Схема балочной клетки с главными и второстепенными балками, балками настила и настилом (иллюстрация авторов)

Fig. 2. Principal scheme of a beam cage with girders, primary and secondary beams and steel plate flooring (illustration by the authors)

Практическая реализация предлагаемой методики поиска альтернатив рационального по стоимостным показателям конструктивного решения представлена на примере анализа проекта «Многофункционального спортивного комплекса для г. Москва». Указанный комплекс представляет собой здание сложной формы: разновысотное, имеющее разные этажи, и состоящее из нескольких самостоятельных блоков, стоящих вплотную друг к другу. На момент подготовки проектной документации стальной пространственный каркас представлял собой комбинацию стропильных ферм высотой 2200 мм, жестко сопряженных с колоннами в карнизном узле, и жестким опиранием колонн на фундамент. Подобная компоновка является рациональной для большинства промышленных зданий при использовании ферм высотой 3150 мм, имеющих в составе каркаса мостовые опорные краны. Статическая неопределимость и повышенная жесткость поперечной рамы с учетом пространственной работы стального каркаса приводит к существенному снижению горизонтальных перемещений. Предварительный анализ

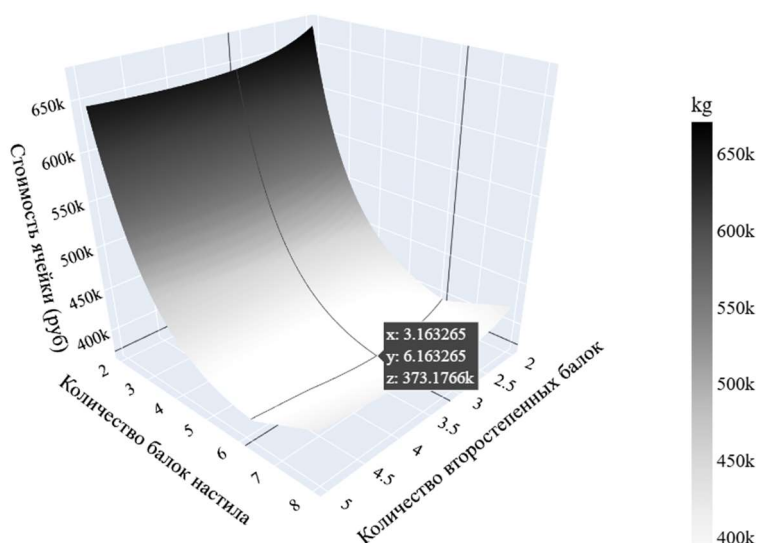
компоновки стропильных ферм с определением оптимальной высоты по известной методике, разработанной Н.С. Стрелецким, показал, что высота ферм, принятая в проектом решении не является оптимальным и имеет перерасход стали для фермы пролетом $L=35$ м в поясах, а для ферм пролетом $L=25$ м в элементах решетки.

$$G_{opt} = l_p \sqrt{\frac{2 \sum M}{L} \psi} + 1 \quad (20)$$

- для ферм $L = 35$ м: $h_{opt} = \frac{35}{6} (0.7 \cdot 6 + 1) = 3,03$ м.

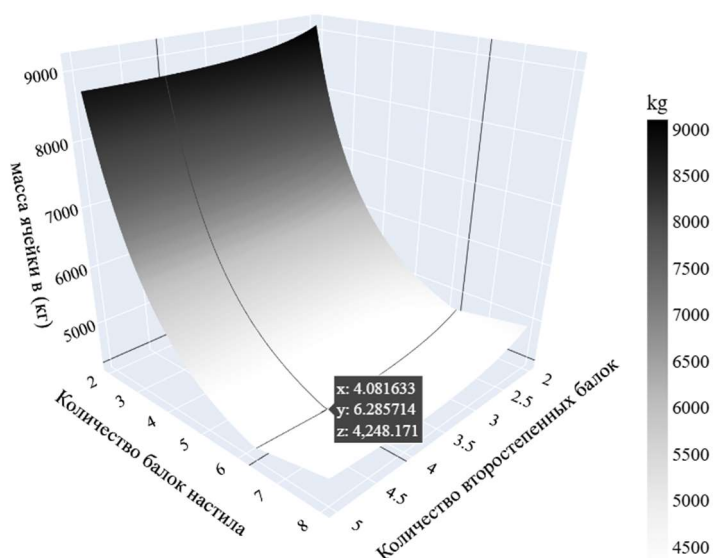
- для ферм $L = 25$ м: $h_{opt} = \frac{25}{6} (0.7 \cdot 6 + 1) = 2,16$ м.

Оптимум стоимости (руб) балочной клетки 14х7м,
сталь С245, нагрузка 500кг/кв.м



а)

Оптимум массы в (кг) балочной клетки 14х7м,
сталь С245, нагрузка 500кг/кв.м



б)

Рис. 3. Поверхности оптимизации балочной клетки с размерами 14×7м при нагрузке 500 кг/кв.м из стали С245: а – оптимизация по стоимости ячейки, в руб; б – оптимизация по массе ячейки, в кг (иллюстрация авторов)

Fig. 3. Optimization surfaces of a 14x7m beam cage with a load of 500 kg/sq.m made of C245 steel: а – optimization for the cost of the cell (RUB), b - optimization for the weight of the cell, (kg) (illustration by the authors)

Анализ же распределения усилий в раме позволил сформировать альтернативу проектному решению с применением стропильных ферм системы «Молодечно», изготавливаемых из ГСП с оценкой стоимостных показателей профилей. В зависимости от очертания фермы с приведением в рассматриваемой методике критерия массы-стоимости элементов ферм, отнесенной к единичной площади здания, а также к единичной площади вертикальной проекции очертания фермы. Исходя из распределения усилий в элементах стропильной фермы сформированы 3 альтернативы, приведенные в табл. 1. В качестве первой альтернативы принят вариант фермы, совпадающей с общими параметрами фермы по серии 1.460.3-23.98 с увеличением высоты фермы на уровне конька до 3040 мм. Указанный вариант при пролетах более 30 м не является рациональным к применению, поскольку смещает уровень максимальных усилий в поясах относительно оптимального и требует модификации очертания.

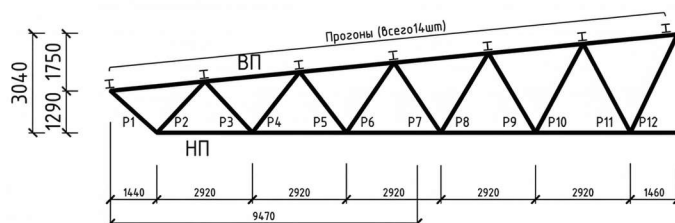
В качестве второй альтернативы фермы принят вариант с измененной геометрией (с понижением нижнего пояса), возвращающей положение расчетного сечения.

В качестве третьего варианта фермы рассмотрен принцип деления фермы на отправочные марки, позволяющие изготавливать фермы из двух отправочных марок длиной 12,5 м, а ферму ФС35 комплектовать дополнительной центральной маркой длиной 10 м, что позволяет обеспечить типизацию ферм различных пролетов табл.1 (рис. 4-5). Эпюры распределения усилий в поясах ферм (рис. 5) позволяют проанализировать эффективность использования материала по длине пролета и обосновать выбор рационального очертания поясов.

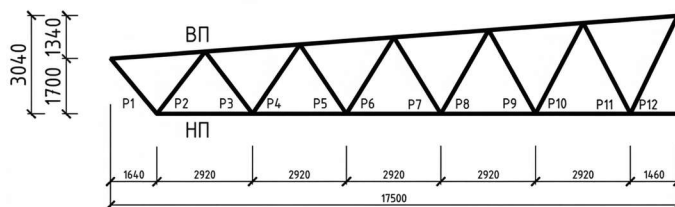
Таблица 1

№	Вариант	Вес поясов, кг	Вес решетки, кг	Стоимость поясов, руб	Стоимость решетки, руб	Показатель эффективности, $C(g)$ кг·руб/м ⁴
1	Ферма ФС35-1	2994,6	816,3	208839	54127	22665
2	Ферма ФС35-2	2968,8	775,5	203414	42547	20848
3	Ферма ФС35-3	2836	775,5	192758	42547	19152
4	Проектное решение	3252,9	975,2	247489	96511,2	35970

ФС35-Вариант 1



ФС35-Вариант 2



ФС35-Вариант 3

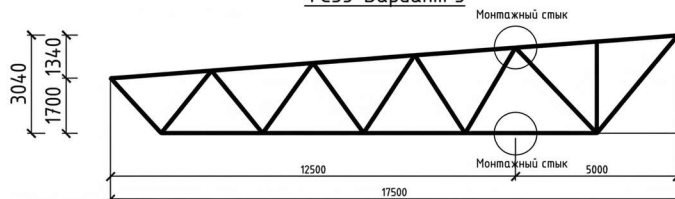


Рис. 4. Варианты ферм (иллюстрация авторов)

Fig.4. Truss options (illustration by the authors)

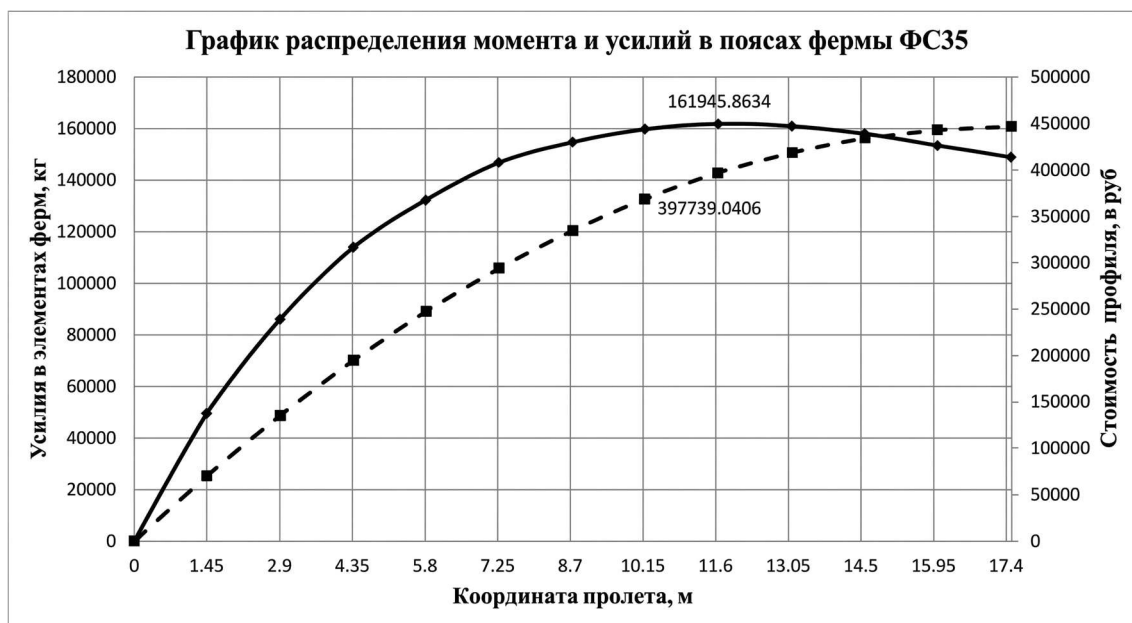


Рис. 5. Характер распределения внутренних усилий в элементах фермы (усиления в поясах) на основе балочной аналогии распределения моментов с учетом очертания пояса (иллюстрация авторов)

Fig.5. The nature of the distribution of internal forces in the elements of the truss (forces in the belts) based on the beam analogy of the distribution of moments, taking into account the outline of the belt (illustration by the authors)

По результатам сравнения вариантов по стоимостному признаку на основе разработанной методики, учитывающей связь удельной стоимости от вида профиля, установлено, что даже небольшое превышение по весу ферм проектного варианта, изготовленного с поясами из двутавров и решеткой из прокатных спаренных уголков (увеличение по массе не превышает 15 %), приводит к увеличению стоимости ферм более 30 %, что необходимо учитывать при проектировании стальных конструкций на основе предложенной методики [13, 15] с изучением структуры стоимости стальных профилей.

Сравнение полученных данных с результатами других авторов подтверждает общую тенденцию. Как и в работах [21], исследование выявило, что использование стали повышенной прочности (С345) не всегда является экономически оправданным из-за более высокой удельной цены, несмотря на выигрыш в массе. Это коррелирует с выводами о необходимости многокритериального подхода при выборе профилей [22].

4. Заключение

1. Разработана методика аппроксимации дискретных стоимостных показателей металлопроката в непрерывные функции, что позволяет использовать аналитические методы оптимизации.

2. Эмпирически подтверждено расхождение между минимумом массы и минимумом стоимости конструкций (до 15-30% в зависимости от типа профиля).

3. Обоснована необходимость перехода от чисто весового критерия к стоимостному для повышения конкурентоспособности стальных каркасов.

4. Выявлены ограничения систем типа «Молодечно» при пролетах более 30 м с точки зрения экономической эффективности.

Разработанная методика определения удельной стоимости конструктивного решения на основе обработки больших массивов данных позволяет получить распределение цены основных наименований металлопроката, что способствует формулированию проектного решения не только на основе традиционного критерия минимального расхода стали, но и на основе минимизации стоимости конструктивного решения.

Следует также отметить, что различия в стоимости прокатных профилей относительно ГСП, достигающих 35 % не в пользу прокатных профилей, потенциально

приводит к угнетению хорошо апробированных конструктивных решений, таких как фермы из уголков, двутавров и т.п. Выводя в качестве кажущегося наиболее прогрессивного решения ферм типа «Молодечно», которые, являясь признанными в рамках серийного производства, провоцируют применение их во всей номенклатуре металлоконструкций. В частности, при пролетах более 30 м подобные фермы требуют особого внимания, как в расчётном, так и в конструктивном обосновании или целесообразности применения ферм, проектируемых по аналогии систем «Молодечно».

Список литературы / References

1. Cucuzza R., Martinelli P., Bianchini D. Sustainable and cost-effective optimal design of steel structures by minimizing cutting trim losses // *Automation in Construction*. 2024. No. 167. Art. 105724. DOI: 10.1016/j.autcon.2024.105724.
2. Askar M., Hyder H., Salman A. Prediction of design and optimization of steel structures using machine learning and artificial neural networks // *Smart Structures & Systems*. 2025. Vol. 36. No. 1. P. 45–58.
3. Василькин А. А., Зубков Г. В. Параметрическая оптимизация навесной конструкции численными методами // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2022. № 7(9). С. 34–49.
Vasilkin A. A., Zubkov G. V. Parametric optimization of a canopy structure by numerical methods. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhova*. 2022. No. 7(9). P. 34–49.
4. Туснин А. Р., Абдурахмонов А. Х. Несущая способность центрально-сжатого двутаврового стержня при стесненном кручении // *Промышленное и гражданское строительство*. 2020. № 9. С. 21–27. <https://doi.org/10.33622/-7019.2020.09.21-27>.
Tusnin A. R., Abdurakhmonov A. KH. Bearing capacity of an axially-compressed i-beam rod under restrained torsion // *Industrial and Civil Engineering*. 2020. No. 9. P. 21–27. <https://doi.org/10.33622/-7019.2020.09.21-27>.
5. Шведов К. Н., Кавун Д. Е., Соколов К. Е., Килишевский Ю. В. Производство двутавровых балок на ЕВРАЗ НТМК в постоянном развитии // *Сталь*. 2020. № 6. С. 26–27.
Shvedov K. N., Kavun D. E., Sokolov K. E., Kilishevskiy Yu. V. Production of I-beams at EVRAZ NTMK in constant development // *Steel*. 2020. No. 6. P. 26–27.
6. Марутян А. С. Двутавровые гнутозамкнутые профили с трубчатыми полками и расчет оптимальной компоновки их составных сечений // *Строительная механика инженерных конструкций*. 2020. № 16 (5). С. 334–350.
Marutyan A. S. I-shaped bent closed profiles with tubular shelves and calculation of the optimal layout of their composite sections. 2020. No. 16. P. 334–350.
7. Nur Liza Rahim, Lee Jun Siang, Shamshinar Salehutdin et al. Optimization analysis for bolted steel I-beam: Considering various sizes of beam web with a focus on sustainability design // *International Conference on Civil Engineering and Technology 2023*. 2024. P. 1–8. DOI:10.1088/1755-1315/1369/1/012034.
8. Xiang, Yufey, Zhu, Leroy, Xin. Welded steel I-section columns: Residual stresses, testing, simulation and design // *Engineering Structures*. 2023. P. 1–55. DOI:10.1016/j.engstruct.2023.115631.
9. Гимранов Л. Р., Гайнетдинов Р. Г., Хайруллин Л. Р., Пазвак А. Расчет фибробетонного блока в составе локально усиленных узлов ферм из гнутосварных профилей // *Вестник МГСУ*. 2024. Т. 19. Вып. 5. С. 752–762. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.752-762.
Gimranov L. R., Gainetdinov R. G., Khayrullin L. R., Pazvak A. Calculation of a fiber-reinforced concrete block as part of locally reinforced nodes of trusses from bent-welded profiles. *Bulletin of MGSU. Monthly Journal on Construction and Architecture*. 2024. Vol. 19. Iss. 5. P. 752–762. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.5.752-762.
10. Гимранов Л. Р., Гайнетдинов Р. Г., Пазвак А. Методика расчета К-образного узла фермы из гнутосварных профилей, усиленного фибробетонным блоком и анкерным болтом в месте примыкания растянутого раскоса // *Известия вузов. Строительство*. 2024. № 5. С. 25–35. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-785-5-25-35.

- Gimranov L. R., Gainetdinov R. G., Pazvak A. Methodology for calculating a K-shaped truss node from bent-welded profiles reinforced with a fiber-reinforced concrete block and an anchor bolt at the junction of a tensioned brace. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2024. No. 5. P. 25–35. DOI: 10.32683/0536-1052-2024-785-5-25-35.
11. Nawrot J. An analytical and numerical assessment of the load capacity of the K-joint of flat steel trusses // *Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej Budownictwo*. 2020. Vol. 175. Issue 25. P. 168–173. DOI: 10.17512/znb.2019.1.26.
 12. Яфаунов Э. А., Казаров А. Р., Карданов А. А. Расчет балки из стальных швеллеров в условиях косоугольного изгиба // *Перспектива-2024 : материалы Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Нальчик, 2024. С. 444–449.*
Yafaunov E. A., Kazarov A. R., Kardanov A. A. Calculation of a beam from steel channels under oblique bending conditions. // *Perspective-2024: Proceedings of the International Scientific Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists*], Nalchik. 2024. P. 444–449.
 13. Xu W., Han L., Tao Z. Flexural behavior of curved concrete filled steel tubular trusses // *Journal of Constructional Steel Research*. 2014. Vol. 93. P. 119–134. DOI:10.1016/j.jcsr.2013.10.015.
 14. Wenyuan Kong, Yongfa Huang, Zhan Guo et al. Experimental study on square hollow stainless steel tube trusses with three joint types and different brace widths under vertical loads // *Reviews on Advanced Materials Science* 2021; 60: P. 519–540. <https://doi.org/10.1515/rams-2021-0049>.
 15. Понтрягин Л. С., Болтянский В. Г., Гамкредидзе Р. В., Мищенко Е. Ф. Математическая теория оптимальных процессов. – М. : Наука, 1983. – 393 с.
Pontryagin L. S., Boltyanskiy V. G., Gamkrelidze R. V., Mishchenko E. F. Mathematical theory of optimal processes. Moscow: Science, 1983. 393 p.
 16. Mohammad Ali Madhavipour, Asaad Faramarzi, Samir Dirar et al. Optimised steel frame design using reclaimed steel: Logistics impact on reuse efficiency // *Journal of Constructional Steel Research* 236. 2025. P. 1–16. DOI:10.1016/j.jcsr.2025.110046.
 17. Jamakovic S., Skejic D. Design of cost-effective steel frame structures. *Elektronički časopis građevinskog fakulteta Osijek*. 2012. P. 1–13. DOI:10.13167/2012.4.1.
 18. Рейтман М. И., Шапиро Г. С. Методы оптимального проектирования деформируемых тел : постановки и способы решения задач оптимизации параметров элементов конструкций. – М. : Наука, 1976. – 258 с.
Reytman M. I., Shapiro G. S. Methods of optimal design of deformable bodies: formulations and methods for solving optimization problems of parameters of structural elements. Moscow: Science, 1976. 258 p.
 19. Тамразян А. Г., Алексейцев А. В. Современные методы оптимизации конструктивных решений для несущих систем зданий и сооружений // *Вестник МГСУ*. 2020. Т. 15. № 1. С. 12–30. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.1.12-30.
Tamrazyan A.G., Alekseytsev A.V. Modern optimization methods for bearing systems of buildings and structures. *Bulletin of MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2020. 15. No. 1. P. 12–30. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.1.12-30.
 20. Юсупов А. К., Муселемов Х. М., Вишталов Р. И. Оптимизация стропильных и рамных конструкций // *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. 2024. № 3. С. 215–226. DOI: 10.21822/2073-6185-2024-51-3-215-226.
Yusupov A.K., Muselemov Kh.M., Vishtalov. R.I. Optimization of Rafter and Frame structures. *Bulletin of Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2024. No. 3. P. 215–226. DOI: 10.21822/2073-6185-2024-51-3-215-226.
 21. Kravanja S., Zula R., Santic S. Life-Cycle Cost Optimization of Steel–Concrete Composite Floors // *Applied Sciences*. 2021. No. 11(21). Art. 10316. DOI: 10.3390/app112110316.

22. Shen X., Wang Y., Li J. Multi-objective optimization of steel cross-sections for MEP supports // Journal of Building Engineering. 2024. No. 98. Art. 111317. DOI: 10.1016/j.jobbe.2024.111317.

Информация об авторах

Исаев Алексей Викторович, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: isaev@kgasu.ru, ORCID: 0009-0003-0215-5252

Гимранов Линур Рафаилович, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: leenuur@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1728-1825

Гайнетдинов Ришат Габдулхаевич, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: rishat.gajnetdinov@bk.ru, ORCID: 0000-0003-3068-3482

Салимов Айдар Фатыхович, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: salimovaf1962@mail.ru, ORCID: 0000-0003-0295-576X

Гафурова Лейсан Эдуардовна, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: leysan-gafurova@mail.ru, ORCID: 0009-0006-2583-5591

Information about the authors

Alexey V. Isaev, candidate of technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: isaev@kgasu.ru, ORCID: 0009-0003-0215-5452

Linur R. Gimranov, candidate of technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: leenuur@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1728-1825

Rishat G. Gainetdinov, candidate of technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: rishat.gajnetdinov@bk.ru, ORCID: 0000-0003-3068-3482

Aidar F. Salimov, candidate of technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: salimovaf1962@mail.ru

ORCID: 0000-0003-0295-576X

Leisan E. Gafurova, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: gafurovale@kgasu.ru, ORCID: 0009-0006-2583-5591

Дата поступления: 11.04.2025

Дата принятия: 30.04.2026