



УДК 624.014

А.В. Исаев – кандидат технических наук, ассистент

И.Л. Кузнецов – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой металлических конструкций и испытания сооружений

Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КазГАСУ)

ВАРИАНТНОСТЬ КРИТЕРИЕВ ОПТИМАЛЬНОСТИ ПРИ СИНТЕЗЕ РАЦИОНАЛЬНОГО КОНСТРУКТИВНОГО РЕШЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ СТАЛЬНЫХ СТРОПИЛЬНЫХ ФЕРМ

АННОТАЦИЯ

В статье рассматривается обзор и влияние критериев оптимальности на выбор рационального конструктивного решения на примере стальных стропильных ферм покрытия. Указывается на многообразие критериев, в числе которых могут быть не только нормативные технико-экономические показатели, но и частные интересы участников инвестиционной системы, существенно влияющих на выработку компромиссного решения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Конструкции, надежность, критерии оптимальности, технико-экономические показатели.

A.V. Isaev – candidate of technical sciences, assistant

I.L. Kuznesov – doctor of technical sciences, professor, chief of the Metal Designs and Test of Constructions department

Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE)

VARIANCE OF OPTIMALITY CRITERIA AT SYNTHESIS OF RATIONAL CONSTRUCTIVE SOLUTION BASED ON STEEL ROOF TRUSSES EXAMPLE

ABSTRACT

This article reviews the survey and influence of optimality criteria on the choice of rational constructive solution based on example of cover system consisted of steel roof trusses. The variety of criteria, among which may be not only normative technical-economic indicators, but also the private interests of investment system parties, significantly influencing on the compromise decision making, is described.

KEYWORDS: Building constructions, reliability, optimality criteria, technical-economic indicators.

На современном этапе развития строительного производства разработано достаточно большое количество вариантов металлических конструкций (МК). При реализации инвестиционного проекта возникает проблема выбора оптимального конструктивного решения, разрешаемая на сегодняшний день посредством использования нормативных ТЭП, а также известных методов оптимального и вариантного проектирования, реализующих традиционные критерии выбора: материалоемкость конструкций, трудоемкость их изготовления, технологические возможности изготовления и монтажа, возможность членения конструкций, стоимость и эксплуатационные затраты и т.п. На основании подобных критериев определяются требования к геометрии и очертанию конструкции; требования завода-изготовителя, связанные с

технологичностью и трудоемкостью изготовления; требования транспортных и монтажных организаций и т.п. При этом, существующие ТЭП и методы оптимального проектирования приводят к формированию области эффективных решений, высоко оцениваемых по определенным показателям. Сделать же правильный выбор варианта конструктивного решения, отвечающий требованиям всех участников инвестиционного проекта при использовании традиционных критериев, является достаточно сложной задачей. Критерии эффективности (оптимальности), выражающиеся в интересах участников инвестиционного проекта, требуют их классификации, а также рассмотрения схем взаимодействия участников инвестиционного проекта. Очевидно, что стремление наиболее полного удовлетворения одного или нескольких критериев при



разработке проекта неизбежно должны приводить к угнетению или невыполнению других показателей [1]. Это приводит к необходимости правильного назначения совокупности критериев выбора, а также оценки их весовых показателей при решении задач. Однако, при всей развитости методов математического программирования и вычислительных средств, следует отметить сложность задач оптимизации в многокритериальной постановке, разработанных для наиболее простых конструкций на основе циклического процесса решения большого числа задач с использованием частных критериев. Это обусловлено существованием неформализуемых критериев и усредненного характера коэффициентов, входящих в функциональную зависимость описания конструктивных форм. Кроме того, формализация по какому-либо синтезированному критерию, например, по приведенным затратам, может привести к ошибочному результату, поскольку, включая в себя частные критерии, требует правильного их согласования [3], а также прогнозирования их изменчивости в процессе функционирования системы.

Особенно сложным в применении даже частных критериев является решение проектных задач уникальных зданий и сооружений, в силу проявления конфликтных ситуаций между участниками инвестиционного проекта и отсутствием опыта их проектирования. Сказанное проиллюстрируем на примере разработки конструктивного решения большепролетных ферм покрытия пролетом 42 и 50 м, используемых для перекрытия пространств одинакового функционального назначения. Рассматривая в качестве исходных данных разницу в отметках установки опорных узлов, принадлежащих одной ферме $h=6,0$ м, а также создание криволинейной поверхности покрытия, исходя из требований архитектурного замысла (рис. 1), оптимальная высота стропильной фермы может быть назначена по экономическим соображениям из условия наименьшего веса. Исходя из решения

рассматриваемой задачи, оптимальная высота фермы, характеризуемая минимальным расходом стали, составляет $h_{opt}=8,0$ м. Однако рассматриваемое покрытие потребовало образования одностроннего уклона для обеспечения организованного отвода атмосферных осадков. Исходя из данных условий, через две опорные точки можно определить необходимые кривые очертания, которые будут ограничены кривой покрытия, например, уравнением окружности или параболы (с учетом требований трудоемкости изготовления) и линией нижнего пояса, отвечающей предельной высоте и членения конструкций из условий транспортировки, а также из функциональных условий обеспечения внутреннего пространства с превышением нижнего пояса в середине пролета фермы относительно опорного узла $H_{cp}=2,0$ м (отметка 14,00 м). При указанных ограничениях наиболее рациональная конструкция будет определяться из условия постоянства распределения усилий в поясах при высоте поперечного сечения фермы, удовлетворяющей условиям транспортного габарита: $h_{ф}=h_{тр}=3,85$ м, образования шарнирных соединений опорных узлов и обеспечения деформативного критерия, при котором минимальная высота фермы составляет $h_{ф, min}=3,70$ м.

Однако описанные функциональные ограничения приводят к уменьшению сечения ферм в середине пролета до $h_{ф}=2,80$ м, а увеличение высоты фермы за счет очертания верхнего пояса приводит к образованию обратного уклона (очертание нижнего пояса на стадии формирования конструктивного решения ограничено превышением H_{cp}). При удовлетворении требований внутреннего пространства возникает необходимость повышения отметок опирания ферм на колонны, но данное решение не приемлемо для конструкторов смежных разделов, а также с позиции повышения энергозатрат на эксплуатацию дополнительно-образуемого объема. Исходя из данных ограничений, которые, как видно, находятся в противоречии, определены варианты стропильных ферм с криволинейным верхним поясом

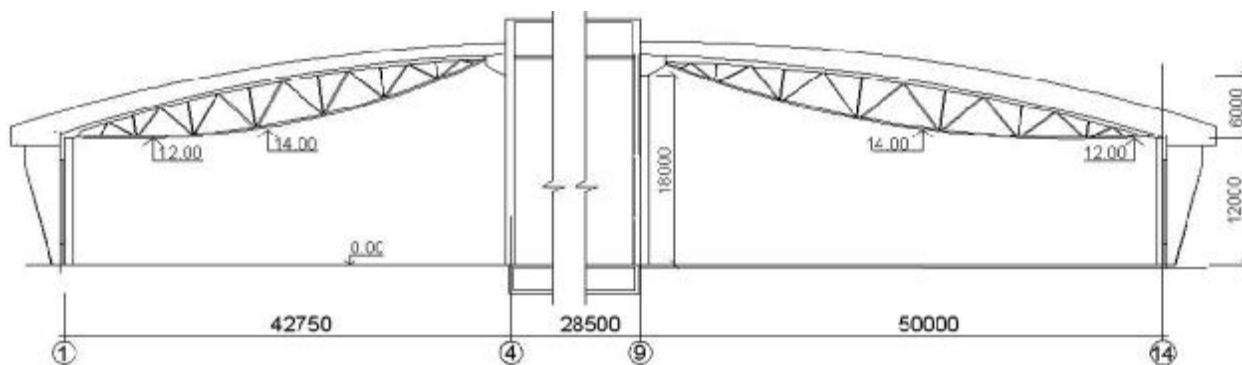


Рис. 1. Общая схема покрытия в соответствии с требованиями архитектурной выразительности и функциональных требований обеспечения внутреннего пространства



Рис. 2. Варианты конструктивных решений стропильных ферм пролетом 50 м

по радиусу окружности (рис. 2):

I-й вариант: с ломаным нижним поясом и равным шагом панелей раскосов;

II-й вариант: с ломаным нижним поясом и шагом панелей, определенным из оптимального угла наклона раскосов;

III-й вариант: с криволинейным нижним поясом и шагом панелей, определенным из оптимального угла наклона раскосов.

Очертание верхнего пояса по радиусу окружности принято в соответствии с интересами завода-изготовителя, поскольку при рассматриваемых пролетах радиус кривизны верхнего пояса соответствует предельному прогибу замкнутых элементов [2]: $R=l^2/(400D)$, где l -длина элемента верхнего пояса, D -характерный размер замкнутого профиля.

Учитывая шаг установки ферм $b=7,8$ м, необходимо определить конструктивное решение прогонного покрытия с минимальным расходом стали, которое позволит откорректировать конструктивное решение стропильных конструкций. Исходя из решения данной задачи, наиболее рациональным оказалось решение

прогонов по неразрезной равнопрогибной или равномоментной (рис. 3) схеме работы с расходом стали $g_{\text{прог}}=11,0$ кг/м². Вариант однопролетной схемы работы прогонов приводит к перерасходу стали 2,5 кг/м² (22 %).

Однако стоит отметить, что показатели расхода стали для профильных сечений в современных условиях ценообразования не несут объективной информации, поскольку стоимость металлопроката может существенно отличаться в зависимости от калибра сечения при неизменных классах стали, специализации поставщиков, территориального района строительства с определенной развитостью номенклатуры профилей. Это приводит к необходимости учета локальной стоимости (стоимости по прайс-листу) элементов конструкций, а также мониторинга динамики изменения цен по индивидуально-сформированному банку поставщиков. На рис. 4 приведена стоимость металла прогонов 1 м² покрытия, выполненных из прокатного швеллера в зависимости от калибра сечения (приведенная для наглядности к стоимости наименьшего из рассматриваемых сечений).

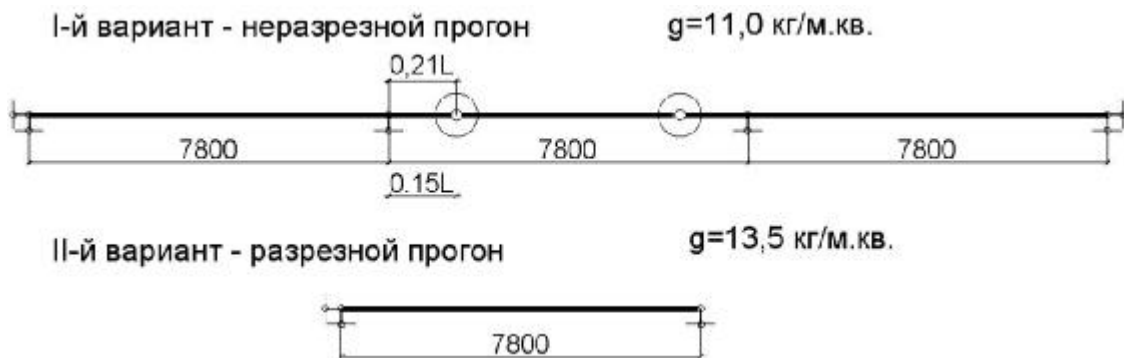


Рис. 3. Варианты конструктивных решений прогонов



Из диаграммы стоимости профилей по различным фирмам-поставщикам можно отметить, что при использовании стоимости сечений рассматриваемых профилей металлопроката на прогоны покрытия указанный перерасход металла может быть нивелирован стоимостью применяемых вариантов на 1 м^2 площади с учетом трудоемкости монтажа прогонов и технических возможностей монтажной организации. Действительно, использование в данном случае швеллера № 27 по неразрезной схеме может быть нерационально относительно использования более простой однопролетной схемы с применением швеллера № 30 при закупке металла в фирме № 2, поскольку разница в стоимости металлопроката составляет 4%. В таком случае процесс принятия наиболее эффективного варианта должен проводиться по согласованию требований остальных участников проекта. Кроме того, следует отметить общую динамику увеличения цены металлопроката с увеличением сечения, что требует учета при рассмотрении вариантов решений (например, учет развития пластических деформаций). К примеру, стоимость швеллера № 24 на 7-24 % меньше стоимости швеллера № 27.

Зачастую же проектная организация не рассматривает вопросы стоимостного обоснования (принимая в качестве критерия только расход материалов), полагаясь на наиболее отработанный вариант проектов-аналогов либо привязки типовых

решений. Причина такого подхода, по мнению [3], заключается в интересах самой проектной организации, поскольку экономический эффект для нее может быть получен только за счет снижения себестоимости проектных работ, а, следовательно, в условиях существующего ценообразования в проектировании невыгодно заниматься поиском новых конструктивных решений.

Рассматриваемое конструктивное решение стропильной фермы в виде плоскостной конструкции требует обеспечения ее боковой устойчивости, а также разработки мероприятий по обеспечению пространственной жесткости каркаса. При этом расход стали на конструкции связей по покрытию (по верхнему поясу) составляет $10-11,5 \text{ кг/м}^2$ на связевой блок. Кроме того, рассматриваемое решение стропильных ферм требует дополнительных монтажных элементов, необходимых для раскрепления ферм в процессе монтажа (учитывая вес стропильных ферм $G = 18-20,5 \text{ т}$), что для монтажной организации при сложившейся материальной базе и технологии монтажа является ухудшающим фактором (отметим, что с позиции монтажной организации наиболее рациональной является конструкция, имеющая наименьшую массу, минимальное количество отправочных элементов и допускает использование сравнительно недорогих монтажных механизмов). Однако такая конструкция наиболее проста с позиции завода-изготовителя в сравнении с пространственной системой.

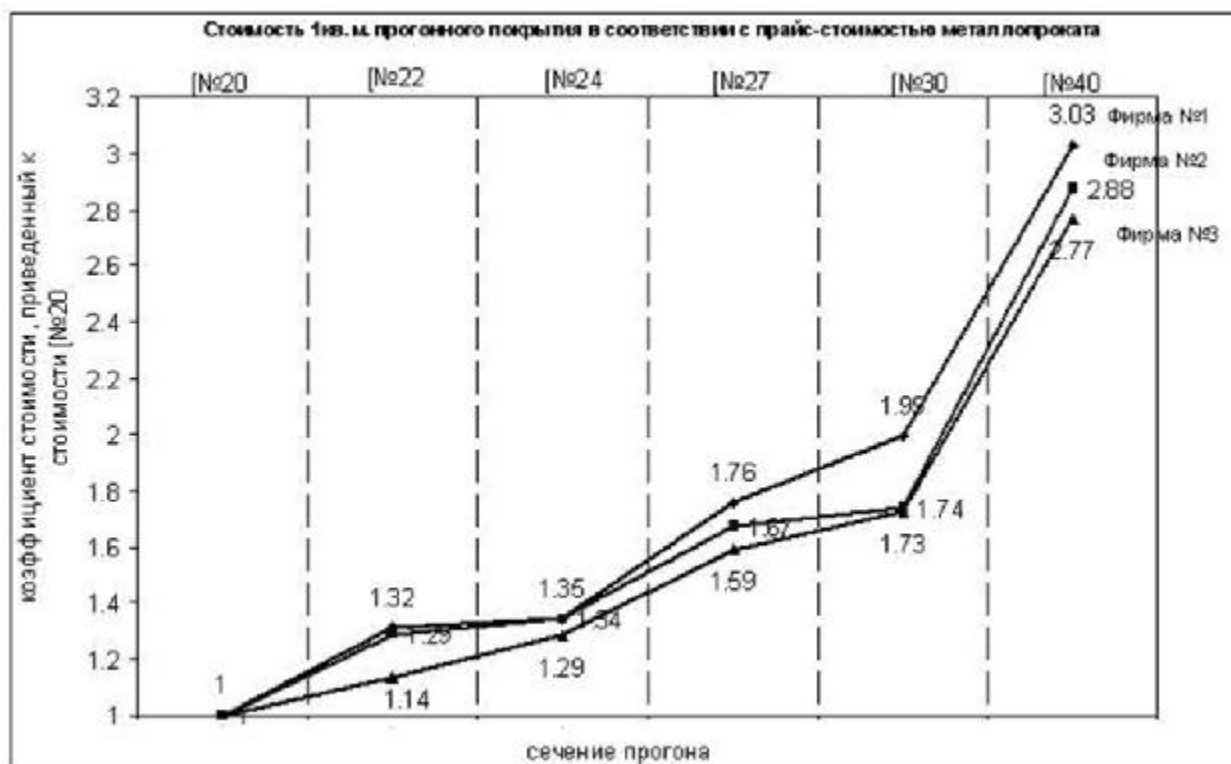


Рис. 4. Стоимость 1 м^2 прогонного покрытия по прайс-стоимости фирм-поставщиков в зависимости от калибра сечения прогонов



С другой стороны, учитывая уровень усилий в элементах фермы, для плоскостной конструкции возникает необходимость перехода на прокатные профили двутаврового сечения, поскольку применение в данном случае сечений из круглых или профильных труб нецелесообразно с позиции их стоимости, а также технологичности применения (в действительности, применение толстостенных труб больших диаметров, имеющих в сортаментах, ограничено технологией их изготовления, что в итоге существенно отражается на их стоимости). Действительно, применение прокатных двутавровых профилей в указанных фермах приводит к сокращению их стоимости на 10-14% при увеличении веса ферм на 3-7%, а, учитывая требования конструирования узловых соединений ферм из труб, где сечения элементов решетки принимаются не только из условий прочности и устойчивости, но и из условия продавливания (по соотношению диаметров пояса и решетки), стоимость последних существенно вырастет при неоправданном расходе металла. К примеру, теоретическая масса ферм [4] из профильных и круглых труб соответственно, определенных по критерию прочности-устойчивости, составляет: $G_{ф.теор.} = 10,5-11,7$ т. Окончательный вес ферм с учетом конструктивных требований составит: $G_{ф.факт.} = 13,8-16,7$ т. В такой постановке рассматриваемый вариант фермы удовлетворяет требованиям завода-изготовителя. Однако существенный недостаток указанных конструктивных схем заключается в необходимости выполнения укрупнительных фланцевых стыков на высокопрочных болтах, устанавливаемых по периметру замкнутых профилей. Это приводит к необходимости применения листового проката толщиной до 60 мм при использовании стали повышенной прочности с гарантированными физико-механическими свойствами, что в свою очередь осложняет сварочные работы крепления фланцев к основному металлу поясов и влияет на надежность

работы покрытия. Кроме того, данный стык неприемлем с позиции архитектурных требований.

Из сказанного видно, что рассматриваемые по рис. 2 конструктивные схемы ферм неприемлемы (варианты стропильных ферм с определением расхода стали приведены в табл.) для участников проекта по различным показателям, основными из которых являются:

- критерий надежности, характеризующий вероятность безотказной работы конструкции;
- критерий несущей способности, обеспечивающий необходимую прочность и устойчивость при соответствующем расходе материалов и затратах труда на изготовление и монтаж;
- технологические критерии трудоемкости изготовления и монтажа, сочетающие себестоимость конструкций в деле;
- критерии расхода материалов и приведенных затрат;
- критерий габаритных размеров;
- антропологический критерий, характеризующий эргономичность, архитектурную выразительность и т.п.

Кроме того, рассматривая предельные случаи перехода в пространственные конструкции в виде балки (рис. 5а) коробчатого сечения с оптимальной высотой $h_{opt} = 5,80$ м и минимальной высотой $h_{min} = 3,73$ м и пространственной рамы Г-образной рамы (рис. 5б), расход стали на конструкции получен соответственно $g_{бал} = 112,7$ кг/м², $g_{рам} = 44,0$ кг/м².

В результате же согласования интересов завода-изготовителя, монтажной организации, функциональных и архитектурных требований, а также интересов участников смежных разделов разработан компромиссный вариант стропильной фермы (рис. 6).

Стропильная ферма выполнена в виде пространственной конструкции с верхним поясом из двух труб на расстоянии 2 м друг от друга и

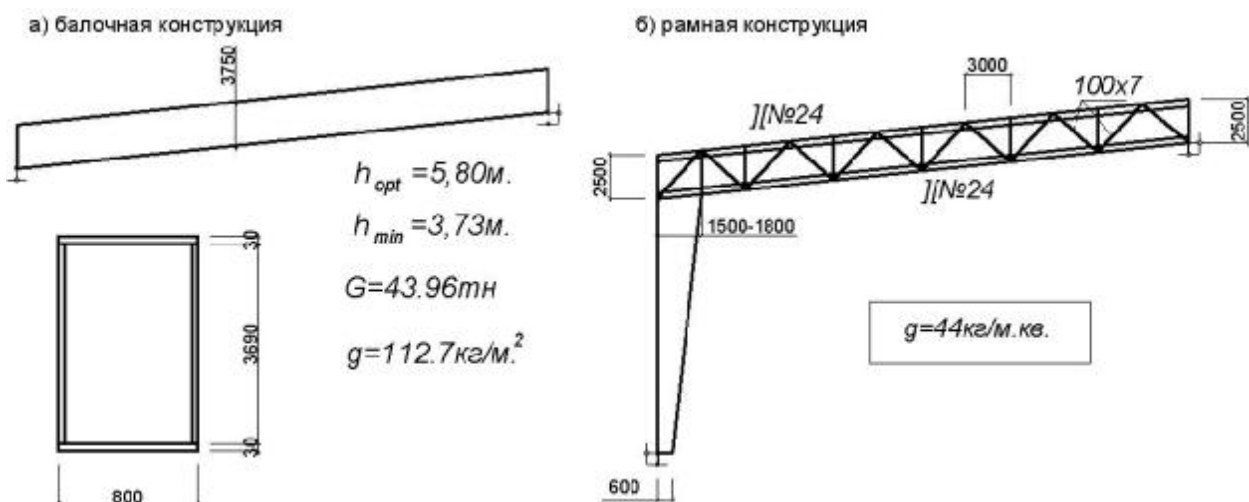










Рис. 5. Варианты конструктивных схем: а) балочная, б) рамная конструкция



Сравнение вариантов стропильных ферм в виде плоскостных конструкций

Поперечное сечение фермы	Вес фермы, кг	Расход стали, кг/м ²	Прогиб фермы, мм	Примечание / сечение
1	2	3	4	5
Вариант I (по рис. 2)				
	17253,9	44,24	144,1	Пояса – труба D, решетка – труба d. d/D ≥ 0,3
	19266,1	49,4	127,1	Пояса – труба D, решетка – труба d. d/D ≥ 0,3, D/t = 30-35
	15800	40,5		Пояса – труба, решетка – прокатные уголки
	20250	51,92	160,6	Пояса – труба профильная, решетка – труба профильная
	16200	41,5		То же без учета конструктивных требований узловых соединений
Вариант II (по рис. 2)				
	16961,8	43,49	147,5	Пояса – труба D, решетка – труба d. d/D ≥ 0,3
	18800	48,2	125,24	Пояса – труба D, решетка – труба d. d/D ≥ 0,3, D/t=30-35
	15150	38,8		Пояса – труба, решетка – прокатные уголки
	20486	52,53	164,35	Пояса – труба профильная, решетка – труба профильная
	16500	42,3		То же без учета конструктивных требований узловых соединений
Вариант III (по рис. 2)				
	16700	46,2		Тр. 450x14 Тр. 325x12 Тр. 159x6 Тр. 127x5
	13800	35,4		Гн. 300x12 Гн. 250x12 Гн. 160x6 Гн. 100x5

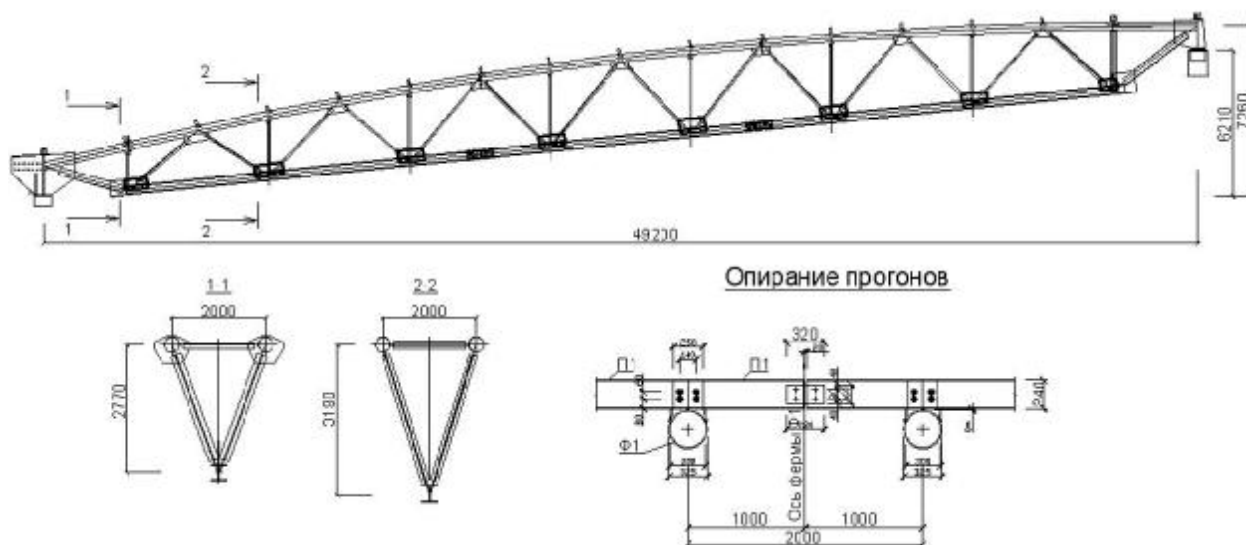


Рис. 6. Вариант стропильной фермы

прямолинейным нижним поясом из прокатного двутавра, образующих в сечении треугольную конструкцию.

Рассматривая требования завода-изготовителя, критерий надежности и несущей способности в сочетании с требованиями архитектурной выразительности и функциональных требований, нижний пояс фермы выполнен в виде прямого стержня из прокатного двутавра.

Это позволило снизить затраты на продольный гиб поясов, а также сократить поперечные габариты монтажных соединений, переориентировав фланцевые стыки (с работой болтов на растяжение) на постановку боковых накладок с работой болтов на срез, что в итоге повышает надежность работы фермы. Учитывая требования монтажной организации, верхний пояс выполнен в виде горизонтальной плоской фермы, обеспечивающей устойчивость всей конструкции в процессе монтажа, но увеличивает вес фермы и дополнительные затраты на изготовление. При этом, изменяя статическую схему работы прогонов покрытия расход стали на них составил $g_{\text{прог}} = 9,0 \text{ кг/м}^2$, с снижением стоимости металлопроката на 22 %.

Из сказанного следует отметить, что большинство из показателей, выражающихся в требованиях сторон, находятся в противоречии, являясь при этом трудно формализуемыми в математической постановке задачи поиска оптимальной конструктивной формы. Очевидно, что получаемое конструктивное решение, удовлетворяющее традиционным критериям оптимальности, может быть неприемлемым в условиях конкретной задачи, отличающейся наличием

определенных и многообразных связей между участниками, реализующими проект, а также наличием частных интересов участников. При этом традиционные показатели, действительно, оказывают существенное влияние на разработку конечного варианта, ограничивая область поиска оптимального решения. Следовательно, проблему выбора оптимального конструктивного решения необходимо рассматривать не только в классической постановке как задачи параметрического синтеза по заданному критерию, но и как процесс согласования интересов участников инвестиционной системы с выработкой критериев, позволяющих получить компромиссное решение.

Литература

1. Кузнецов И.Л. Выбор оптимального конструктивного решения в системе легких металлических конструкций: учебное пособие. – Казань: Каз. инж.-строит. институт, 1990. – 89 с.
2. СП 53-101-98. Изготовление и контроль качества стальных строительных конструкций / Госстрой России. – М.: ГУП ЦПП, 1999.
3. Коклюгина Л.А. Оценка и выбор конструктивного решения металлических конструкций для реализации инвестиционного проекта: автореф. дис... кандидата техн. наук. – Казань: КГАСА, 2000. – 21 с.
4. Лихтарников Я.М. Вариантное проектирование и оптимизация стальных конструкций. – М.: Стройиздат, 1979. – 319 с., ил.