

Строительные конструкции, здания и сооружения

Научная статья

УДК 624.94.014.2

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-3/47-63>

А.В. Голиков, А.А. Байрамов, Ю.А. Мельникова, П.В. Якимив, А.С. Соловьева

ГОЛИКОВ АЛЕКСАНДР ВЛАДИМИРОВИЧ – к.т.н., доцент, alexandr_golikov@mail.ru✉,
<https://orcid.org/0000-0001-6588-6031>БАЙРАМОВ АЙХАН АЛИМАГОМЕДОВИЧ – студент, ayxan.10.1999@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0003-1610-0869>МЕЛЬНИКОВА ЮЛИЯ АНДРЕЕВНА – магистрант, juliamelnikova1@mail.ruЯКИМИВ ПАВЕЛ ВЛАДИМИРОВИЧ – студент, pyakimiv02@gmail.com,
<https://orcid.org/0000-0002-9212-8532>СОЛОВЬЕВА АННА СЕРГЕЕВНА – к.э.н., доцент, solovan@yandex.ru,
<https://orcid.org/0000-0003-2250-6208>*Волгоградский государственный технический университет*
Волгоград, Россия**Анализ эффективности применения
отдельных конструктивных решений стальных прогонов
в покрытиях арочного типа**

Аннотация. В статье выполнен расчет и дано обоснование эффективности применения отдельных конструктивных решений стальных прогонов в покрытиях арочного типа. Характер работы прогонов в покрытиях прямолинейной формы и конструкций прогонов в покрытиях криволинейного очертания имеет существенные различия: все прогоны, установленные по единому уклону кровли, преимущественно испытывают единый характер напряженно-деформированного состояния; каждый прогон, установленный на криволинейной поверхности, испытывает свойственное его положению на покрытии напряженно-деформированное состояние, отличное от соседнего прогона. Указанный характер работы прогонов, установленных на криволинейных поверхностях, не позволяет применить единое эффективное сечение из перечня существующих на момент написания данной работы. Классифицированы основные конструктивные типы прогонов, применяемые в покрытиях арочного типа: прогоны сплошного сечения в виде швеллера и двутавра, решетчатые прогоны в виде плоских и пространственных ферм. Критический анализ опыта применения прогонов для установки на криволинейные поверхности позволил поставить цели работы: определить области применимости существующих конструктивных решений прогонов в конструкциях покрытий арочного типа; предложить и конструктивно проработать новую универсальную конструкцию прогонов, способную эффективно работать в условиях покрытий арочного типа. Предметом исследования данной работы является характер изменения рациональной конструктивной формы прогонов покрытия в конструкциях арочного типа на примере реализации конструктивной формы в отдельных конструктивных решениях. Основные результаты работы получены после обработки результатов серии исследований на численных и аналитических расчетных моделях конструкций прогонов. Достоверность полученных результатов обеспечивается корректной постановкой задач исследования, классической обработкой и объективной интерпретацией результатов численных и аналитических экспериментов. Для достижения целей данного исследования выполнено разделение территории России на пять условных нагрузочных зон. Выполнен расчет основных конструктивных типов прогонов для предусмотренных нагрузочных зон. По результатам комплексной сметно-аналитической оценки определена целесообразность применения каждого из исследованных конструктивных решений. Исходя из результатов исследований предложено рациональное решение прогонов, применение которого позволит снизить сметную стоимость и металлоемкость конструкции

© Голиков А.В., Байрамов А.А., Мельникова Ю.А., Якимив П.В., Соловьева А.С., 2022

Статья: поступила: 28.07.2022; рецензия: 06.08.2022, 22.08.2022.

при обеспечении несущей способности и жесткости для условий работы под нагрузкой на криволинейных поверхностях.

Ключевые слова: стальной прогон покрытия, напряженно-деформированное состояние, арочное покрытие, нагрузочная зона, область применения, рациональное конструктивное решение

Для цитирования: Голиков А.В., Байрамов А.А., Мельникова Ю.А., Якимив П.В., Соловьева А.С. Анализ эффективности применения отдельных конструктивных решений стальных прогонов в покрытиях арочного типа // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2022. № 3(52). С. 47–63.

Введение

Строительство является ключевой отраслью в жизни общества. В процессе развития общества совершенствуется и данная отрасль. Возникает все больше задач рационального проектирования строительных металлических конструкций, требующих инновационного подхода в решении с учетом установления действительных условий нагружения и характера работы конструкций под нагрузкой. Одной из сложных задач является установление рациональных конструкций перекрытия большепролетных зданий. В качестве перекрытия большепролетных зданий свое применение нашли пространственные сплошные и стержневые оболочки, купола, ви-сячие вантовые покрытия, мембранные и тентовые покрытия, а также традиционные конструкции больших пролетов: фермы, рамы, арки и подобные конструктивные системы. Среди пространственных конструкций наибольшее распространение получили арочные конструкции. Они позволяют перекрыть пролеты до 150 м, добиться архитектурной выразительности сооружения и достаточно просты в монтаже по сравнению с рядом других типов большепролетных конструкций. Наиболее полно конструктивные решения арочных покрытий для общественных зданий рассматриваются в работах Г.И. Артебякиной. [1] и А.М. Ибрагимова [3].

Актуальность темы исследования обуславливается тем, что в современной практике строительства все чаще возникает потребность в возведении большепролетных сооружений спортивного, культурного и общественного значения, но при этом процесс строительства осложняется конструированием и подбором наиболее рациональных сечений прогонов с учетом особенностей их работы в конструкциях арочного типа.

Анализ конструктивных решений и опыта проектирования конструкций прогонов в арочных покрытиях

Несущие конструкции арочного покрытия состоят из непосредственно арок и прогонов, соединяющих между собой арки и передающих нагрузку с покрытия на арку (рис. 1). Снижение экономических показателей и общей стоимости арочных конструкций возможно выполнить либо путем нахождения рационального конструктивного решения конструкции прогонов, либо применением беспрогонной кровли. Сравнительный анализ достоинств и недостатков прогонного и беспрогонного решения покрытий приведен в работе А.А. Липатовой [6].



Рис. 1. Общий вид арочного покрытия
(Источник: <https://stalyn.ru/angar-tenty-proizvodstvo#zamer>)

Материал данной статьи посвящен работе покрытий арочного типа с применением кровли, устроенной по прогонам.

Прогоны в общем случае предназначены для восприятия нагрузок от веса кровли и атмосферных осадков с последующей передачей их на конструкции, которые расположены ниже – стропильные фермы, ригели поперечных рам каркаса и арки криволинейных сооружений. Современные исследования характера работы балок как элементов каркаса описаны в работах современных отечественных ученых И.В. Роменского, А.Н. Миронова, Н.А. Тарасенко [5], А.О. Лукина [7]. Результаты аналитических исследований работы стальных прокатных балок, закрепленных от потери устойчивости, приводится в статье [2]. Исследования по изучению работы стальных изгибаемых стержневых элементов под действием статических нагрузок параллельно ведутся в работах иностранных коллег [16–19]. В частности, в статье М. Okamura, Y. Fukasawa [18] учтен опыт зарубежных коллег по анализу работы стальных балок.

Тип и форма прогонов выбирается по критериям экономической эффективности с учетом технологических возможностей изготовления, наличием и стоимостью исходных материалов, типом ограждающих конструкций и т. д. По форме прогоны бывают сплошного сечения из холодногнутых или горячекатаных профилей (рис. 2) и сквозными.

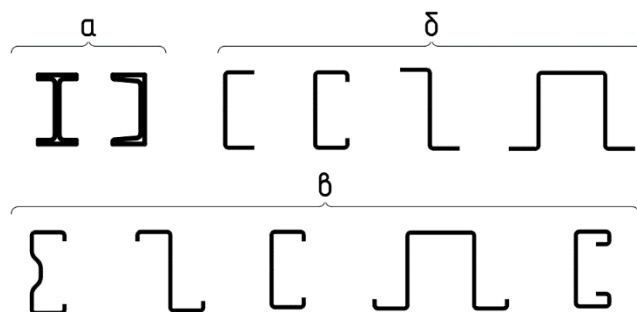


Рис. 2. Сечения профилей для изготовления прогонов:

а – горячекатаные профили; б – гнутые профили; в – холодногнутые профили

При достаточно больших пролетах (более 10 м) используют решетчатые прогоны в виде легких ферм с верхним поясом, работающим как сжато-изогнутый стержень (рис. 3).



Рис. 3. Решетчатый прогон в виде фермы

(Источник: <https://ingenieria.yogameok.com/wp-content/uploads/2019/04/esTRUCTURA-metalica.jpg>)

Наиболее современной и рациональной конструкцией следует признать пространственные треугольные блоки покрытия (рис. 4), которые являются более устойчивыми во всех расчетных направлениях работы под нагрузкой. Работа пространственных блоков рассмотрена в трудах А.С. Марутяна [8–10], А.Ф. Кузнецова [4], А.Г. Юрьева, В.А. Зиньковой [14, 15], А.Н. Оржеховского, А.В. Мушанова [11].

Опыт проектирования конструкций прогонов достаточно обширен. Стальные прогоны реализуют обычно в виде балок, установленных в горизонтальном положении, и рассматривают неотъемлемой частью системы каркаса здания. Основное конструктивное исполнение зависит от параметров крыши, а также характерных атмосферных воздействий, реализующихся в период эксплуатации. Обобщив накопленный опыт строительства, с уверенностью можно отметить, что применение сечений швеллерного типа неэффективно в криволинейных поверхностях по причине вероятности развития искривлений в направлении меньшей жесткости сечения (рис. 5).

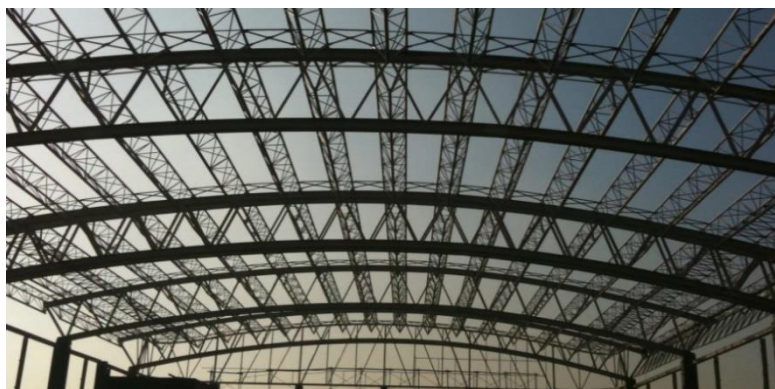


Рис. 4. Пространственные треугольные блоки покрытия
(Источник: <https://german.alibaba.com/product-detail/steel-construction-warehouse-turkey-167154763.html>)

Опыт применения конструкций шпренгельных прогонов, достоинства и недостатки данного решения, в частности склонность к изгибу элементов в поперечном направлении при установке на наклонные поверхности, подробно описаны в работе А.В. Соловьева [13].



Рис. 5. Работа прогонов в арочных покрытиях с искривлениями в плоскости наименьшей жесткости

Традиционный подход к назначению сечения прогонов состоит в назначении единого сечения для всего покрытия. Особенность работы прогонов при установке их на криволинейную поверхность в том, что направление действия усилий на стержень изменяется с изменением положения прогона на покрытии. Прогон в конструктивном исполнении традиционно рассматривается в виде изгибаемого стержня, работающего по балочной схеме. Распространенные сечения балок – швеллер, двутавр и коробчатое сечение. В случае, когда всем прогонам покрытия назначено единое сечение, а по длине арки происходит изменение положения (поворот) сечения и изменяется характер действия нагрузок, применение одного сечения

традиционного типа является неэффективным по критерию использования несущей способности сечения – на разных участках размещения прогонов коэффициент использования будет существенно отличаться. По результатам расчетов несущей способности и жесткости установлено, что при использовании традиционных сечений прогонов в арочных покрытиях разброс коэффициента использования сечения может находиться в диапазоне от 0,25 до 0,95.

Обзор современной литературы, доступной для критического анализа, показал отсутствие исследований в направлении поиска областей применения различных типов конструкций прогонов для условий работы в арочных покрытиях.

Практическая ценность работы состоит в установлении областей применимости существующих типов прогонов и в разработке эффективной конструкции прогонов, позволяющей уменьшить материалоемкость, снизить расходы на его изготовление, транспортировку и монтаж.

Цели работы:

- определить области применимости существующих конструктивных решений прогонов в конструкциях покрытий арочного типа;
- предложить и конструктивно проработать новую универсальную конструкцию прогонов, способную эффективно работать в условиях покрытий арочного типа.

Задачи, решенные в работе для достижения целей исследования:

- выполнен анализ опыта проектирования и конструктивных решений прогонов для арочных покрытий;
- территория России условно разделена на нагрузочные зоны, учитывающие нагрузку от веса многослойной конструкции кровли, нагрузку от снеговых отложений и нагрузку от действия ветра;
- рассчитаны существующие типы прогонов покрытия в целях определения сферы их применимости;
- предложено наиболее эффективное и универсальное конструктивное решение прогона, способного воспринимать нагрузку в различных условиях работы применительно к арочным покрытиям и исследовано их напряженно-деформированное состояние;
- по результатам оценки сметной стоимости различных конструктивных типов прогонов определено наиболее экономичное решение для применения в условиях работы арочных покрытий.

Краткая характеристика объекта исследования.

Нагрузки и воздействия

Объектом исследования данной работы являются прогоны арочного покрытия (рис. 6) со следующими геометрическими параметрами: высота $H = 15,0$ м, ширина $B = 60,0$ м, длина $L = 100,0$ м. Шаг арок принят равным $n = 6,0$ м. Расчет нагрузок выполнен для пяти нагрузочных зон, условно выделенных по всей территории России.

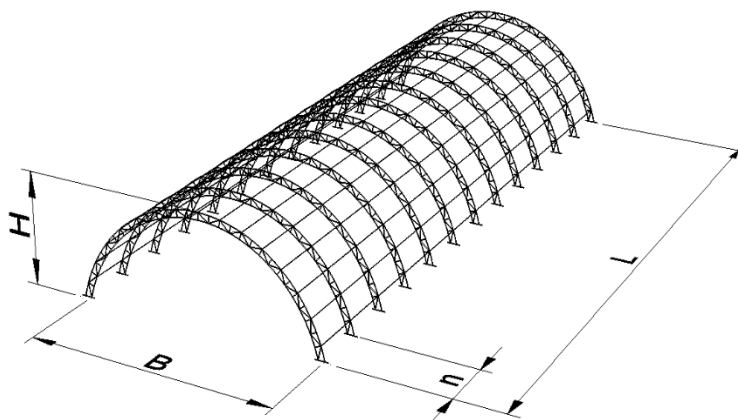


Рис. 6. Маркировка геометрии арочного покрытия

Прогоны работают как балки по разрезной или реже по неразрезной схеме. Их рассчитывают на действие постоянных (собственный вес элементов кровли) и временных (атмосферные воздействия) нагрузок (рис. 7). Реже к конструкциям арок подвешивают технологическое оборудование. Совместное действие этих нагрузок относится к основному сочетанию, и расчет ведется с учетом соответствующих коэффициентов, установленных нормами проектирования.

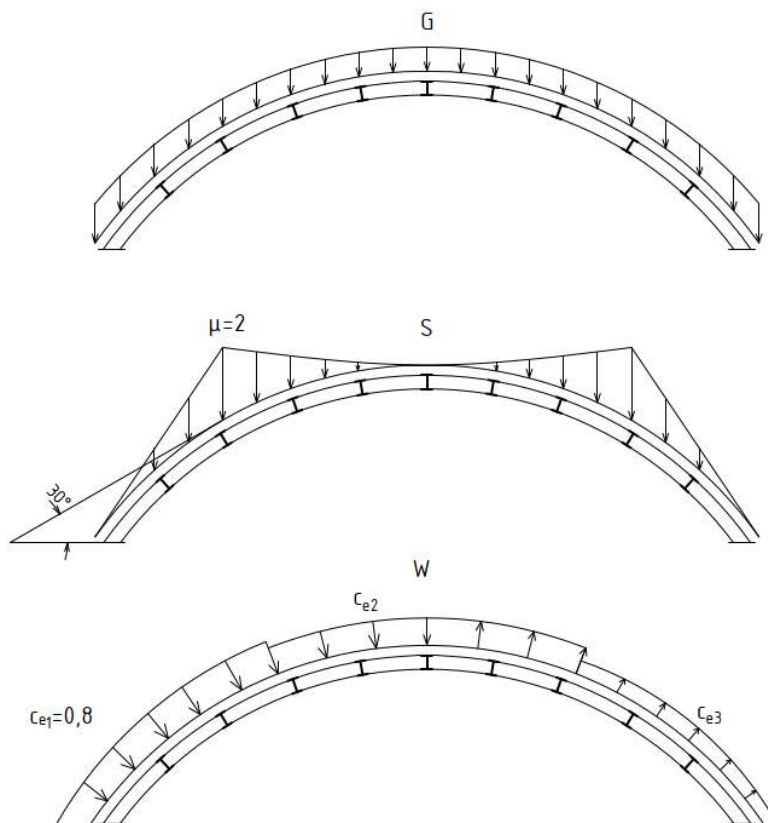


Рис. 7. Схемы действия нагрузок на покрытия:
G – собственный вес элементов покрытия, **S** – снеговая нагрузка, **W** – ветровая нагрузка

Жесткость прогонов проверяется на действие нормативных нагрузок. Относительный расчетный прогиб ограничивается предельным значением $l/200$ по указаниям табл. Д 1 СП 20.13330.2016¹ при наиболее распространенном шаге $n=6,0$ м.

Для практического применения результатов исследований выполнено условное разделение России на нагрузочные зоны по уровню действующих нагрузок. Маркировка нагрузочных зон условно выполнена по городам (табл. 1).

Таблица 1

Нагрузочные зоны

Нагрузочная зона (город)	Снеговой район по СП 20.13330.2016 ¹	Ветровой район по СП 20.13330.2016 ¹
Краснодар	I	IV
Волгоград	II	III
Омск	III	II
Воркута	V	IV
Петропавловск-Камчатский	VII	VII

¹ СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. Москва: Минстрой России, 2016. 80 с.

Собственный вес элементов покрытия определяется отдельно для каждого нагрузочного района, так как напрямую зависит от сечения элементов и толщины утеплителя, применяемого в данном регионе. Полученные значения нагрузок сведены в табл. 2.

Таблица 2

Действующие нагрузки

Нагрузочная зона (город)	Собственный вес, кПа	Снеговая нагрузка, кПа	Ветровая нагрузка, кПа
Краснодар	0,21	0,952	0,896
Волгоград	0,235	1,904	0,71
Омск	0,261	2,856	0,56
Воркута	0,299	4,760	0,896
Петропавловск-Камчатский	0,299	6,664	1,587

Данные табл. 2 свидетельствуют о том, что значения снеговых и ветровых нагрузок для северных районов России значительно превышают нагрузки, действующие на конструкции в южных регионах.

Для определения применимости существующих конструктивных решений и разработки нового конструктивного решения прогона выполнен расчет серии аналитических моделей прогонов согласно указаниям актуальных нормативных документов в части расчета стержней, изгибаемых в двух плоскостях.

Результаты расчета конструкций прогонов

1. Результаты расчета конструкций прогонов сплошного сечения

Расчет конструкций прогонов сплошного сечения выполнен как для разрезной шарнирно опертой балки для каждой нагрузочной зоны. Наиболее неблагоприятное положение прогонов на арочном покрытии соответствует положению с наклоном в $\alpha=30^\circ$ (положение 2 на рис. 8), для которого будет максимум совместного действия снеговой нагрузки и ветровой активной нагрузки. В двух главных плоскостях сечения стержня прогона от действия нагрузок (для описанного выше характера реализации нагрузки) возникают соответствующие изгибающие моменты.

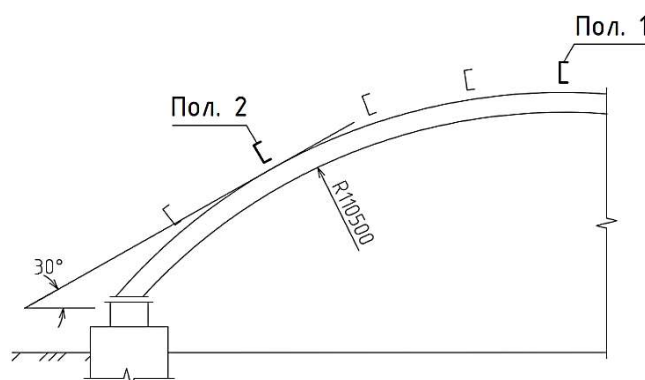


Рис. 8. Маркировка принятых расчетных положений пространственного блока покрытия для выполнения расчетов

Исходя из расчетов прогонов сплошного сечения под действием нагрузки для каждой нагрузочной зоны получены распределения требуемого момента сопротивления в двух главных плоскостях – для сечения из швеллера (рис. 9 а) и для сечения из двутавра (рис. 9 б).

На основании проведенных расчетов можно сделать вывод о применимости сплошных сечений прогонов для каждой нагрузочной зоны (табл. 3).

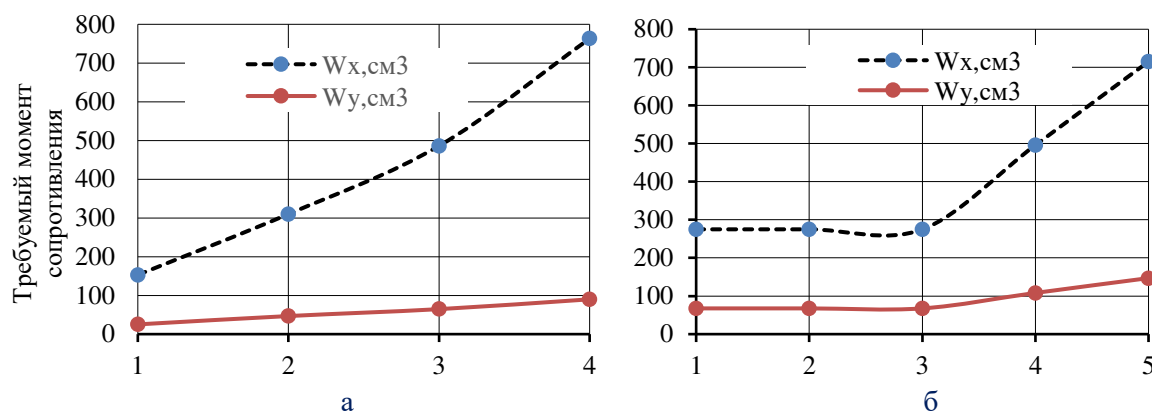


Рис. 9. График зависимости требуемого момента сопротивления сечения швеллеров (диаграммы на рис. а) и сечения двутавров (диаграммы на рис. б) в зависимости от нагрузочных зон (городов):
1 – Краснодар; 2 – Волгоград; 3 – Омск; 4 – Воркута; 5 – Петропавловск-Камчатский

Таблица 3

Применимость сечений для каждой нагрузочной зоны

Нагрузочная зона (город)	Швеллеры	Двутавры широкополочные
Краснодар	20П	20Ш1
Волгоград	27П	20Ш1
Омск	33П	20Ш1
Воркута	40П	26Ш1
Петропавловск-Камчатский	-	30Ш1

При анализе табл. 3 делаем вывод, что применение швеллера в качестве прогонов в районах крайнего севера неэффективно по причине того, что сечение швеллера более чем 40П сортаментом не предусмотрено.

Дополнительно была рассмотрена конструкция прогонов из труб квадратного сечения. По результатам расчетов сделан вывод, что квадратный профиль неэффективен – сечение подбирается по критерию жесткости, при этом обладает существенным запасом по критерию прочности. Об эффективных подходах при назначении размеров балок см. в работе [2].

2. Результаты расчета прогонов решетчатого типа

Пргоны решетчатого типа рассмотрим на примере плоской шпренгельной системы и прогонов в виде пространственных блоков.

Шпренгельный прогон представляет собой стержневую систему треугольной формы, состоящую из верхнего пояса и системы раскосов, которые крепятся к поясу (рис. 10).

Пояса шпренгельной системы работают как сжато-изгибаемые стержни, раскосы – как центрально-нагруженные стержни. Принятые по результатам расчетов сечения шпренгельной системы для каждой нагрузочной зоны представлены в табл. 4.

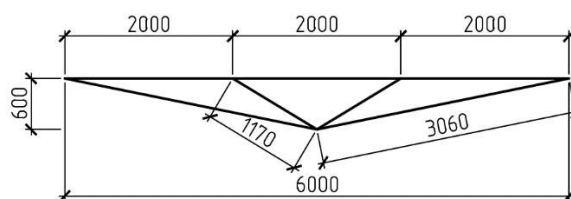


Рис. 10. Схема рассчитанного шпренгельного прогона

Анализируя работу шпренгельного прогона, легко проследить, что применение данного типа прогона возможно только на горизонтальных участках или участках с незначительным уклоном по причине того, что при установке на наклонную поверхность под действием на-

ружки в элементах прогона возникает дополнительный изгибающий момент в направлении из плоскости прогона (проблема поперечного изгиба плоских ферм).

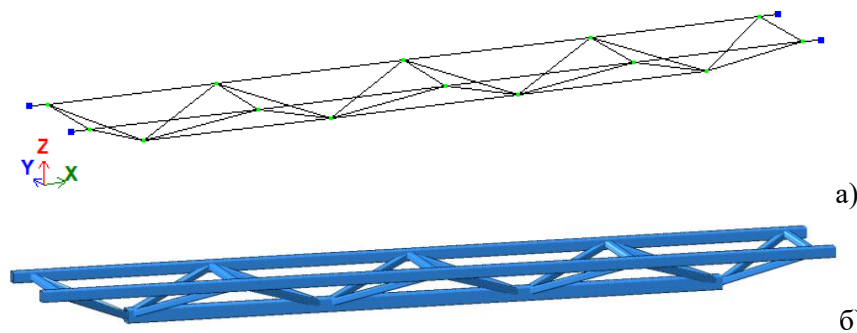
Таблица 4

Сечения шпренгельной системы для каждой нагрузочной зоны

Тип профиля	1. Краснодар	2. Волгоград	3. Омск	4. Воркута	5. Петропавловск- Камчатский
Верхний пояс (сечение из швеллера по ГОСТ 8240-97)	8П	10П	10П	14П	16П
Раскосы (сечение из гнутого швеллера) по ГОСТ 8278-83)	30×25×3	30×25×3	30×25×3	30×25×3	40×20×3
Опорные раскосы (сечение из гнутого швеллера по ГОСТ 8278-83)	30×25×3	30×25×3	30×25×3	40×40×3	42×42×4

3. Расчет прогона в виде пространственного блока покрытия

Отмеченную проблему изгиба плоских ферм, установленных на наклонные поверхности в направлении из плоскости фермы, решаем применением прогонов, выполненных в форме пространственных блоков. Пространственный блок покрытия эффективно применять треугольного сечения, соответственно выполненного из трех плоских ферм (рис. 11).



**Рис. 11. Пространственный решетчатый блок покрытия конструкции [10]:
а) расчетная схема; б) 3D-модель**

Для опирания конструкций кровли (чаще всего профилированного настила) верхние пояса пространственных ферм выполняются сечением из гнутосварного замкнутого квадратного профиля.

Целью применения данной конструкции является снижение материалоемкости и повышение жесткости покрытия.

Для расчетов принимаем блок треугольного сечения с длиной верхнего пояса 6,0 м, длиной нижнего – 4,5 м.

Нагрузка приложена равномерно-распределенной по длине верхних поясов ферм (пояс совмещает роль прогонов).

Расчет выполнен для двух случаев: первый случай – блок установлен на вершине арки при горизонтальном положении верхних поясов, при этом коэффициент превышения снеговой нагрузки $\mu = 1$ – равномерный снег; второй случай – когда блок стоит под углом 30° , при этом коэффициент μ наибольший при снеговом мешке (рисунки 7 и 8).

Расчет выполнялся в программном комплексе ЛИРА САПР. Мозаика перемещений, полученная по результатам расчетов, представлена на рис. 12.

Исходя из данных мозаики перемещений можно сделать вывод, что конструкция пространственного блока является весьма жесткой.

Результат подбора сечения элементов конструкции представлен в табл. 5.

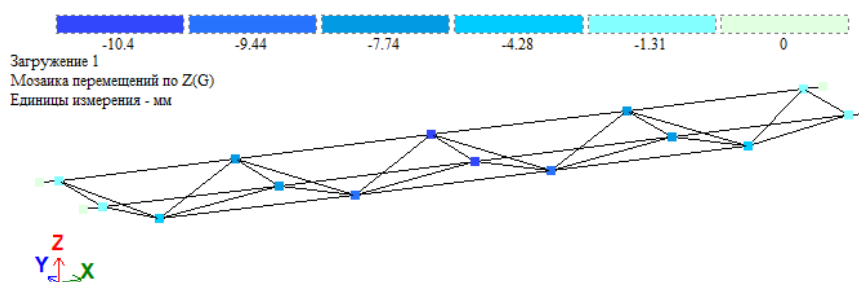


Рис. 12. Мозаика перемещений узлов решетчатого блока

Таблица 5

Принятые сечения элементов пространственного блока

Элемент конструкции	1. Краснодар	2. Волгоград	3. Омск	4. Воркута	5. Петропавловск-Камчатский
Верхний пояс	40×4	50×3	50×4	60×4	60×6
Нижний пояс	40×3	40×4	50×3	50×6	60×6
Раскосы	40×3	40×3	40×3	40×3	40×3
Опорные раскосы	40×3	40×3	40×3	40×3	40×3
Связи верхнего пояса	40×3	40×3	40×3	40×3	40×3

Следует отметить, что большинство сечений стержней пространственного блока подбираются исходя из конструктивных требований, что приводит к неэффективному использованию материала конструкций. Пути решения указанной проблемы – применение в качестве элементов решетки элементов из круглой стали и применение решетчатых блоков при шаге арок девять и более метров.

4. Конструктивное решение и работа под нагрузкой прогонов в виде универсальной поворотной конструкции

Опираясь на данные проведенных расчетов основных типов прогонов, можно сделать промежуточный вывод, что для арочных покрытий требуется разработка универсальной конструкции прогонов. Предлагаемый прогон универсальной конструкции должен позволить, с одной стороны, эффективно применять выбранную конструкцию в различных климатических районах и, с другой стороны, одинаково эффективно работать в любом положении на арке.

В качестве таковой предложена конструкция прогона поворотного типа, которая представляет собой плоскую ферму с верхним поясом из круглой трубы (рис. 13) и решеткой из квадратных замкнутых профилей. Установка прогона осуществляется на опорную конструкцию с круговым постаментом. В процессе установки плоская ферма занимает строго вертикальное положение и фиксируется в проектное положение. Данное решение позволит снизить металлоемкость конструкции и исключить изгиб в направлении из плоскости фермы, которому подвержена конструкция шпренгельных прогонов при неподвижном закреплении к арке.

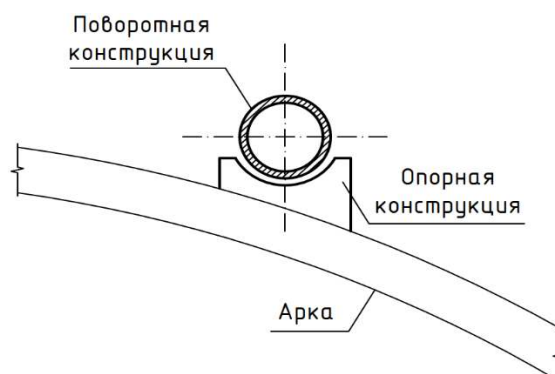


Рис. 13. Конструкция прогона поворотного типа

Нижний пояс и решетка работают на восприятие вертикальной нагрузки, верхний пояс работает в составе фермы в вертикальной плоскости и дополнительно воспринимает усилие в направлении из плоскости фермы с учетом характера действия ветра. Твёрдотельная модель фермы поворотной конструкции показана на рис. 14.



Рис. 14. Твёрдотельная модель фермы прогона поворотной конструкции

В результате расчетов были подобраны сечения несущих элементов прогонов (табл. 6).

Таблица 6

Принятые сечения элементов поворотной конструкции для нагрузочных зон

Тип профиля	1. Краснодар	2. Волгоград	3. Омск	4. Воркута	5. Петропавловск-Камчатский
Верхний пояс (сечение – труба круглая по ГОСТ 32931-2015)	60×3	70×3	73×4	83×5	102×5
Нижний пояс *	40×3	40×3	40×3	50×3	50×5
Раскосы *	40×3	40×3	40×3	40×3	40×3
Опорные раскосы *	40×3	40×3	40×3	40×3	40×3

* Сечение элементов решетки принято из гнутосварных замкнутых квадратных профилей по ГОСТ 30245–2012.

По данным таблицы установлено, что как для конструкции решетчатого прогона, так и для пространственного блока в качестве растянутых элементов решетки целесообразно применять круглую сталь.

Металлоемкость и затраты труда принятых конструкций прогонов

Оценка эффективности рассчитанных типов прогонов для каждой нагрузочной зоны выполнена по двум критериям – по металлоёмкости и по трудозатратам (табл. 7).

Расчет показателей металлоёмкости и затрат труда рассчитаны для размеров сооружения, указанных в п. «Краткая характеристика объекта исследования» для участка перекрытия одного пролета прогонов пролетом $l=6$ м (один шаг арок).

Таблица 7

Результаты расчета металлоемкости и затрат труда принятых конструкций прогонов при строительстве в условных нагрузочных зонах

Конструкция	Вес 1 ед., кг	Тип операции	Катет сварного шва, мм	Длина сварного шва, мм
<i>Краснодар</i>				
Швеллер №20П	97,8	Резка	-	-
Двутавр №20Ш1	183,6	Резка	-	-
Шпренгель	55,92	Резка и приварка	4	640
Пространственный блок	122,17	Резка и приварка	4	6720
Поворотная конструкция	60,59	Резка и приварка	4	2560
<i>Волгоград</i>				
Швеллер №27П	166,2	Резка	-	-
Двутавр №20Ш1	183,6	Резка	-	-
Шпренгель	65,16	Резка и приварка	4	640
Пространственный блок	126,82	Резка и приварка	4	6720
Поворотная конструкция	65,03	Резка и приварка	4	2560

Окончание табл. 7

Конструкция	Вес 1 ед., кг	Тип операции	Катет сварного шва,	Длина сварного шва, мм
<i>Омск</i>				
Швеллер №33П	219	Резка	-	-
Двутавр №20Ш1	183,6	Резка	-	-
Шпренгель	65,16	Резка и приварка	4	640
Пространственный блок	141,44	Резка и приварка	4	6720
Поворотная конструкция	76,13	Резка и приварка	4	2560
<i>Воркута</i>				
Швеллер №40П	289,8	Резка	-	-
Двутавр №26Ш1	256,2	Резка	-	-
Шпренгель	93,18	Резка и приварка	4	800
Пространственный блок	171,46	Резка и приварка	4	6720
Поворотная конструкция	97,26	Резка и приварка	4	2560
<i>Петропавловск-Камчатский</i>				
Двутавр №30Ш1	321,6	Резка	-	-
Шпренгель	110,33	Резка и приварка	4	824
Пространственный блок	212,84	Резка и приварка	4	6720
Поворотная конструкция	121,7	Резка и приварка	4	2560

Данные табл. 7 позволяют оценить стоимость строительно-монтажных работ.

Анализ стоимости строительно-монтажных работ

Результаты расчета стоимости строительно-монтажных работ для каждого типа конструкции прогонов в зависимости от нагрузочной зоны представлены без учета НДС в табл. 8.

Стоимость монтажа конструкции рассчитана для размеров сооружения, указанных в п. «Краткая характеристика объекта исследования», для участка перекрытия одного пролета прогонов длиной 6 м (один шаг арок).

Таблица 8

Стоимость принятых конструкций прогонов при строительстве в условных нагрузочных зонах, руб.

Конструкция	Стоимость монтажа конструкции	Стоимость конструкции	Общая стоимость
<i>Краснодар</i>			
Швеллер № 20П	40519,83	459210,96	499730,79
Двутавр №20Ш1	50265,31	850551,17	925601,84
Пространственный блок	44671,97	274850,22	319522,19
Поворотная конструкция	22569,47	172155,85	194725,32
<i>Волгоград</i>			
Швеллер № 27П	31294,45	553358,36	584652,81
Двутавр №20Ш1	50265,31	850551,17	925601,84
Пространственный блок	97193,66	385405,07	482598,73
Поворотная конструкция	44638,19	188241,12	232879,31
<i>Омск</i>			
Швеллер № 33П	43874,45	715946,36	759820,86
Двутавр №20Ш1	50265,31	850551,17	925601,84
Пространственный блок	54402,34	334716,02	389118,36
Поворотная конструкция	32141,07	245166,76	277307,83

Конструкция	Стоимость монтажа конструкции	Стоимость конструкции	Общая стоимость
<i>Воркута</i>			
Швеллер № 40П	99857,36	1797575,12	1897432,48
Двутавр №26Ш1	149424,26	2642170,73	2791594,99
Пространственный блок	94249,27	579879,8	674129,07
Поворотная конструкция	69982,02	533811,58	603793,6
<i>Петропавловск-Камчатский</i>			
Двутавр № 30Ш1	224001,34	3960867,29	4184868,63
Пространственный блок	160803,54	989363,1	1150166,64
Поворотная конструкция	181262,82	1382642,22	1563905,04

Характер распределения общей стоимости строительства конструкций прогонов отображен на графиках (рис. 15).

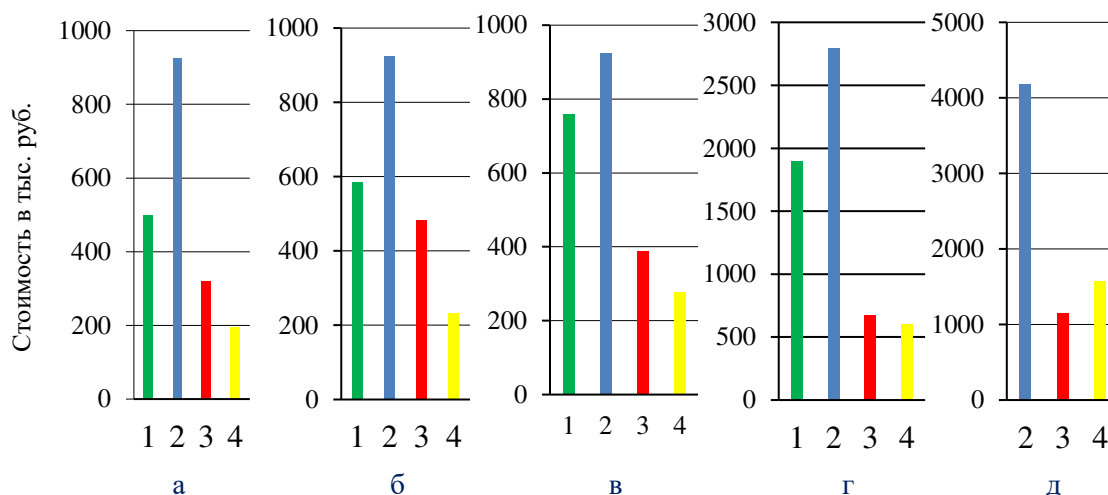


Рис. 15. Сравнение сметной стоимости типов конструкций прогонов для города:
а) Краснодар; б) Волгоград; в) Омска; г) Воркута; д) Петропавловск-Камчатский.
Тип конструкций прогонов:

1 – швеллер; 2 – двутавр; 3 – пространственный блок; 4 – поворотная конструкция

По результатам комплексной оценки стоимости строительства исследуемых типов прогонов отметим, что наиболее экономичным решением для строительства в 1–4 условных нагрузочных зонах является предложенная поворотная конструкция. Наиболее экономичным для строительства в пятой условной нагрузочной зоне является решение в виде пространственного блока.

Обсуждение результатов

Анализ опыта расчета и проектирования показал отсутствие четких рекомендаций относительно выбора рациональной конструкции прогонов для применения в покрытиях с криволинейной поверхностью. Указанная проблема требовала от проектировщика проведения значительного объема нетиповых работ исследовательской направленности, целью которых было определить наиболее эффективное конструктивное решение прогонов покрытия проектируемого здания.

Результатами приведенной в данной статье комплексной оценки применимости исследованных конструктивных решений прогонов в покрытиях арочного типа являются четкие рекомендации для проектировщиков, представленные в виде графиков, таблиц и номограмм.

Заключение

1. По результатам анализа существующего опыта строительства выполнена классификация конструктивных типов прогонов, наиболее часто применяемых при проектировании арочных покрытий: прогоны сплошного сечения в виде швеллера, двутавра и гнутосварных замкнутых профилей; сквозное сечение в виде плоских ферм шпренгельного типа и объемных пространственных блоков.

2. Для оценки области применимости исследуемых конструктивных типов прогонов выполнено условное разделение территории России на пять условных нагрузочных зон (районов) с привязкой к крупным городам: 1 – Краснодар, 2 – Волгоград, 3 – Омск, 4 – Воркута, 5 – Петропавловск-Камчатский.

3. Итогом серии расчетов определены и представлены в табличном виде области применимости конструктивных типов прогонов, принятых к изучению.

4. С учетом достоинств и недостатков наиболее часто применяемых в строительстве конструктивных типов прогонов предложена к применению конструкция прогона поворотного типа.

5. Для оценки сметной стоимости работ рассчитаны металлоёмкость и трудозатраты на изготовление исследуемых конструктивных типов прогонов.

6. Полученные результаты исследований работы конструкции прогонов показывают, что при равных нагрузках и равных пролетах конструктивное решение в виде пространственного блока является на 23 % менее металлоёмким по сравнению с прогоном сплошного сечения и на 34 % менее затратным по сравнению с другими конструктивными типами.

7. По результатам оценки сметной стоимости различных конструктивных типов прогонов разработаны номограммы изменения стоимости строительства различных конструктивных типов в зависимости от принятого нагрузочного района. По критерию общей стоимости строительства наиболее экономичным для применения в условиях работы арочных покрытий стало решение в виде прогона поворотного типа.

Перспективы дальнейших исследований

Исследование конструктивной формы в целях поиска оптимальных, эффективных и рациональных решений неизменно является одной из ключевых задач в науке о строительных конструкциях. В дальнейших работах по направлению совершенствования конструктивной системы покрытий арочного типа авторами предлагается провести следующие исследования:

- выполнить детальную проработку конструкции узла опирания поворотного прогона на конструкции арок и узлов крепления конструкций кровли к верхнему поясу поворотной конструкции;

- разработать устойчивую стержневую оболочку арочного покрытия, состоящую из следующих конструкций – многопролетные прогоны (для соблюдения требований СП 16.13330.2017², изм. 2 по конструктивным условиям возможности устройства связей по прогонам) и система связей по покрытию.

Предлагаемое к изучению арочное покрытие в форме стержневой комбинированной оболочки разрабатывается для решения двух задач: создание устойчивой связевой системы покрытия и применение единого эффективного типа прогона покрытия.

Заявленный вклад авторов: А.В. Голиков – формулировка целей и задач исследования, руководство исследованиями, обобщение, анализ и интерпретация результатов, окончательная редакция статьи, согласование статьи со всеми авторами; А.А. Байрамов – проведение аналитических расчетов и численных экспериментов на моделях, анализ, систематизация и обобщение данных, написание статьи; Ю.А. Мельникова – анализ конструктивных решений и опыта проектирования прогонов, разработка численных моделей исследуемых конструкций, сбор нагрузок на конструкции, написание статьи; П.В. Яки-

² СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*. Москва: Минстрой России, 2016. 142 с.

мив – обработка данных аналитических расчетов и численных экспериментов, подготовка таблиц и номограмм, написание статьи; А.С. Соловьева – расчет сметной стоимости строительства каждого из исследуемых вариантов конструкций.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Артебякина Г.И., Щербина В.А. Обзор конструктивных решений арочных покрытий для общественных зданий // Молодой ученый. 2017. № 6(140). С. 29–31. EDN: XXJVIP
2. Голиков А.В., Веремеев Д.В. Области рациональной работы стальных прокатных балок, закрепленных от потери устойчивости // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2021. Т. 17. № 2. С. 175–187. DOI: 10.22363/1815-5235-2021-17-2-175-187
3. Ибрагимов А.М., Кукушкин И.С. Сравнительный анализ вариантов конструктивных решений пологих арочных покрытий зданий // Вестник МГСУ. 2014. № 3. С. 59–66. EDN: RYXTMJ
4. Кузнецов А.Ф., Кузнецов В.А. Стальные решетчатые прогоны из труб для покрытий зданий, устойчивые против коррозии // Приволжский научный журнал. 2012. № 3(23). С. 20–26. EDN: PFGOWR
5. Роменский И.В., Миронов А.Н., Тарасенко Н.А., Мещерин Е.А., Гладких А.Ю. Конструкции прогонов покрытия в виде балок с перфорированной стенкой // Металлические конструкции. 2020. Т. 26. № 2. С. 77–85. EDN: GJRVQF
6. Липатова А.А. Сравнительный анализ прогонного и беспрогоного решения покрытий // Инновации. Наука. Образование. 2021. № 33. С. 1454–1459. EDN: IOZGVU
7. Лукин А.О. Определение прогибов балок с гофрированной стенкой с учетом сдвиговых деформаций // Инженерный вестник Дона. 2013. № 1(24). С. 14. EDN: PYZMPN
8. Марутян А.С. Оптимизация ферменных конструкций с полураскосными решетками // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2020. Т. 16. № 3(21). С. 39–50. DOI: 10.34708/GSTOU.2020.39.71.006
9. Марутян А.С. Оптимизация ферменных конструкций с ромбическими решетками // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2021. Т. 17. № 1(23). С. 54–68. DOI: 10.34708/GSTOU.2021.75.62.006
10. Марутян А.С., Оробинская В.Н. Трехгранные фермы покрытий (перекрытий) и оптимизация их высот // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. № 2(101). С. 172–183. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.2.172-183
11. Оржеховский А.Н., Мушанов А.В., Штурмина А.А., Штурмина В.А. Оптимизация конструкции структурного покрытия из труб на прямоугольном плане // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2020. № 3(143). С. 49–53. EDN: JRDHRV
12. Юрьев А.Г., Зинькова В.А., Смоляго Н.А., Яковлев О.А. Оптимизация структуры металлических ферм // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2017. № 7. С. 41–45. DOI: 10.12737/article_5940f018660ea0.09243801
13. Соловьев А.В., Соловьева О.Н. Анализ причин обрушения конструкций открытого склада готовой продукции // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство и строительные технологии: сборник статей 78-й Всероссийской научно-технической конференции, Самара, 19–23 апреля 2021 г. Самара: Самарский гос. техн. ун-т, 2021. С. 94–100. EDN: FSSWMQ
14. Юрьев А.Г., Зинькова В.А. Оптимизация нагружения металлических ферм // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2020. № 2. С. 56–61. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-56-61
15. Юрьев А.Г., Зинькова В.А. Расчет металлических ферм на основе вариационных принципов // Региональная архитектура и строительство. 2019. № 3(40). С. 145–149. EDN: BVTSVC
16. Feng R., Liu J., Chen Z., Roy K., Chen B., Lim J.B.P. Numerical investigation and design rules for flexural capacities of H-section high-strength steel beams with and without web openings. *Engineering Structures*. 2020;225:111278. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111278
17. Kim M.-Y., Nanzad N., Hayat U. Effects of un-bonded deviators on the out-of-plane buckling of steel H-beams pre-stressed by a straight tendon cable. *Engineering Structures*. 2020;214:110566. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110566
18. Okamura M., Fukasawa Y. Characteristics of local vibration in I-section steel beam subjected to lateral impact load. *Sustainability*. 2000;48:635–644.
19. Zinkova V.A. Optimization of the structure of flat metal tube trusses. *Lecture notes in civil engineering*. 2021;95:213–218. DOI: 10.1007/978-3-030-54652-6_32

Original article

<http://doi.org/10.24866/2227-6858/2022-3/47-63>

Golikov A., Bayramov A., Melnikova Y., Yakimiv P., Soloveva A.

ALEKSANDR V. GOLIKOV, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,
alexandr_golikov@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0001-6588-6031>AYHAN A. BAYRAMOV, Student, ayxan.10.1999@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0003-1610-0869>YULIA A. MELNIKOVA, Master Student, juliamelnikova1@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-6983-2679>PAVEL A. YAKIMIV, Student, pyakimiv02@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9212-8532>ANNA S. SOLOVEVA, Candidate of Economics Sciences, Associate Professor,
solovan@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2250-6208>*Volgograd State Technical University*

Volgograd, Russia

**Application efficiency analysis of some structural solutions
for steel purlins in the arched roofs**

Abstract. In this article, the calculation and justification of the effectiveness of some structural solutions of steel purlins in the cover of arch type. The nature of operation of purlins in rectilinear coverings and purlin structures in curvilinear outline coverings has significant differences: all purlins installed along a single roof slope, predominantly experience a single character of the stress-strain state; each purlin installed on a curved surface, experiences a stress-strain state characteristic of its position on the coating, which is different from the neighboring purlin. The specified nature of the operation of purlins installed on curved surfaces does not allow the use of a single effective section from the list of existing ones at the time of writing this work. The main constructive types of purlins used in arched-type coatings are classified: continuous section purlins in the form of a channel and an I-beam, lattice purlins in the form of flat and spatial trusses. A critical analysis of the experience of using purlins for installation on curved surfaces made it possible to set the objectives of the work: to determine the areas of applicability of existing design solutions for purlins in arched-type coating structures; to suggest and constructively develop a new universal design of purlins which can work effectively in conditions of arch-type coatings. The subject of the study of this work is the nature of the change in the rational constructive form of the roof purlins in arch-type structures on the example of the implementation of the constructive form in individual structural solutions. The main results of the work were obtained after processing the results of a series of studies on numerical and analytical computational models of purlin structures. The reliability of the obtained results is ensured by the correct formulation of research tasks, classical processing and objective interpretation of the results of numerical and analytical experiments. To achieve the objectives of this study, the territory of Russia was divided into five conditional loading zones. The basic structural types of purlins for the specified load zones have been calculated; the feasibility of using each of the investigated structural solutions has been determined by the results of the complex estimation and analytical assessment. Based on the research results, a rational solution for the purlins is proposed, the use of which will reduce the estimated cost and metal consumption of the structure while ensuring the bearing capacity and rigidity for working conditions under load on curved surfaces.

Keywords: steel cover purlin, stress-strain state, arch cover, load zone, area of application, rational design solution

For citation: Golikov A., Bayramov A., Melnikova Y., Yakimiv P., Soloveva A. Application efficiency analysis of some structural solutions for steel purlins in the arched roofs. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2022;(3):47-63. (In Russ.).

Contribution of the authors: A.V. Golikov – formulation of research goals and objectives, research management, generalization, analysis and interpretation of results, final revision of the article, coordination of the article with all authors; A.A. Bayramov – carrying out analytical calculations and numerical experiments on models, analysis, systematization and generalization of data, writing the article; Yu.A. Melnikova – analysis of design solutions and experience in designing runs, development of numerical models of the structures under study,

collection of loads on structures, writing the article; P.V. Yakimiv – data processing of analytical calculations and numerical experiments, preparation of tables and nomograms, writing the article; A.S. Solovyova – calculation of the estimated cost of construction of each of the studied design options. The authors declare no conflict of interests.

REFERENCES

1. Artebyakina G., Shcherbina V. Review of constructive solutions of arch coverings for public buildings. *Young Scientist*. 2017;(6):29–31. (In Russ.). EDN: XXJVIP
2. Golikov A.V., Veremeev D.V. Areas of rational operation of steel rolling beams secured against curvatures. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2021;17(2):175–187. (In Russ.). DOI: 10.22363/1815-5235-2021-17-2-175-187
3. Ibragimov A.M., Kukushkin I.S. Comparative Analysis of the Construction Solution Variants for Flat Arch Coverings of Buildings. *Vestnik MGSU*. 2014;(3):59–66. (In Russ.). EDN: RYXTMJ
4. Kuznetsov A.F., Kuznetsov V.A. Corrosion-resistant steel purlins from pipes for coverings of buildings. *Privolzhsky Scientific Journal*. 2012;(3):20–26. (In Russ.). EDN: PFGOWR
5. Romensky I.V., Mironov A.N., Tarasenko N.A., Mescherin E.A., Gladkikh A.Yu. Constructions runs coverings in the form castellated beam. *Metall Constructions*. 2020;26(2):77–85. (In Russ.). EDN: GJRVQF
6. Lipatova A.A. Comparative analysis of the purlin and no purlin solution of coatings. *Innovations. Science. Education*. 2021;(33):1454–1459. (In Russ.). EDN: IOZGVU
7. Lukin A.O. Determination of deflections of beams with corrugated web with the shear strain. *Engineering Journal of Don*. 2013;(1):14. (In Russ.). EDN: PYZMPN
8. Marutyan A.S. Optimization of truss structures with half-slanted lattices. *Herald of GSTOU. Technical Sciences*. 2020;16(3):39–50. (In Russ.). DOI: 10.34708/GSTOU.2020.39.71.006
9. Marutyan A.S. Optimization of truss structures with rhombic lattices. *Herald of GSTOU. Technical sciences*. 2021;17;(1):54–68. (In Russ.). DOI: 10.34708/GSTOU.2021.75.62.006
10. Marutyan A.S., Orobinskaya V.N. Triangular Trusses for Roofs (Floors) and Optimization of their Depths. *Vestnik MGSU*. 2017;12(2):172–183. (In Russ.). DOI: 10.22227/1997-0935.2017.2.172-183
11. Orzhehovsky A.N., Mushchanov A.V., Shturmina A.A., Shturmina V.A. Optimization of the design of the structural coating of pipes on a rectangular plan. *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2020;(3):49–53. (In Russ.). EDN: JRDHRV
12. Yuriev A.G., Zinkova V.A., Smolyago N.A., Yakovlev O.A. Structure optimization of the metal trusses. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2017;(7):41–45. (In Russ.). DOI: 10.12737/article_5940f018660ea0.09243801
13. Solovjev A.V., Solovjeva O.N. Analysis of the causes of collapse of structures of the open warehouse of finished products. Traditions and innovations in construction and architecture. *Construction and building technologies: Collection of articles from the 78th All-Russian Scientific and Technical Conference, Samara, April 19–23, 2021*. Samara, Samara State Technical University, 2021. P. 94–100. (In Russ.). EDN: FSSWMQ
14. Yuriev A.G., Zinkova V.A. Loading optimization of the metal trusses. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2020;(2):56–61. (In Russ.). DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-2-56-61
15. Yuriev A.G., Zinkova V.A. Calculation of metal trusses based on variational principles. *Regional Architecture and Construction*. 2019;3(40):145–149. (In Russ.). EDN: BVTVC
16. Feng R., Liu J., Chen Z., Roy K., Chen B., Lim J.B.P. Numerical investigation and design rules for flexural capacities of H-section high-strength steel beams with and without web openings. *Engineering Structures*. 2020;225:111278. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111278
17. Kim M.-Y., Nanzad N., Hayat U. Effects of un-bonded deviators on the out-of-plane buckling of steel H-beams pre-stressed by a straight tendon cable. *Engineering Structures*. 2020;214:110566. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110566
18. Okamura M., Fukasawa Y. Characteristics of local vibration in I-section steel beam subjected to lateral impact load. *Sustainability*. 2000;48:635–644.
19. Zinkova V.A. Optimization of the structure of flat metal tube trusses. *Lecture notes in civil engineering*. 2021;95:213–218. DOI: 10.1007/978-3-030-54652-6_32