
Оценка несущей способности П-образных арочных профилей для возведения бескаркасных арочных покрытий под климатические условия Республики Хакасия

А. В. Русских, Д. Г. Портнягин

*Хакасский технический институт –
филиал Сибирского федерального университета*

Аннотация: В данной работе рассмотрены бескаркасные арочные покрытия, возведенные из П-образных арочных профилей в зависимости от пролета покрытия и от способа утепления для резко-континентального климата Республики Хакасия. Рассмотрены два способа утепления с применением теплоизоляционных материалов: пенополиуретана и минеральной ваты. Толщина профиля была принята, равная 1,2 мм. В результате, доказано, что требуются дополнительные конструктивные решения для усиления данных покрытий на большие пролеты, например, для пролетов 15, 20 и 25 метров и высотой, равной половине пролета, или мероприятия для уменьшения снеговой нагрузки на покрытие. Исходя из полученных результатов было замечено, что большое влияние на несущую способность покрытия в данном регионе оказывает пульсационная нагрузка, прилагаемая к покрытию, по сравнению со снеговой нагрузкой.

Ключевые слова: бескаркасное арочное покрытие, П-образный арочный профиль, резко-континентальный климат Республики Хакасия, пенополиуретан, минеральная вата.

Бескаркасные арочные покрытия впервые появились в середине XX века и данные сооружения начал выпускать предприниматель Питер Педерсен под торговой маркой «Wonder Building» (Удивительные сооружения) [1]. Они использовались в начале в качестве хранения военной техники и хранения зерна, а на сегодняшний день используются, например, в качестве спортивных сооружений и торговых центров [1,2]. В дальнейшем появлялись и другие компании, которым было интересно развивать данные сооружения, так как их себестоимость была низка по сравнению с другими сооружениями по нижеследующим причинам [3,4]:

- экономия земляных работ, так как фундаменты могут быть малозаглубленными;

- отсутствие полноценного каркаса и стен;

- возведение покрытия поэлементной сборкой;

- экономия на технике и на рабочей силе, так как данные покрытия легки по сравнению с каркасными и стеновыми сооружениями, и могут

собираться несколькими рабочими и с небольшим количеством оборудования.

Благодаря этому, данные покрытия начали изучаться и модернизироваться вплоть до сегодняшнего дня и в других странах.

Данные покрытия можно классифицировать [1]:

1) по форме сечения профиля:

– П-образный арочный профиль;

– трапециевидный профиль;

2) по наличию и отсутствию поперечного гофрирования;

3) по способам утепления:

– утепление внутри пенополиуретаном;

– утепление минеральной ватой при возведении двойной арки.

На сегодняшний день ведутся научные исследования по изучению и повышению несущей способностей данных типов арочных профилей для возведения бескаркасных арочных покрытий как за рубежом, так и в России [5-7].

Цель проделанной работы – оценить несущую способность бескаркасных арочных покрытий, возведенных арочными П-образными профилями при климатических условиях Республики Хакасия в зависимости от способа их утепления.

В данной работе рассмотрены арочные покрытия пролетом 9, 12 и 15 м и высотой, равной половине пролета и по способу утепления: внутреннее утепление полиуретаном и минеральной ватой между двух арок из П-образных профилей представлено на рис. 1. Фрагмент профиля изображен на рис. 2. Климатические условия были приняты для Республики Хакасия, которая относится ко II снеговому и III ветровому району, согласно СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия». Также Республика Хакасия относится к сейсмическим районам и её сейсмичность равна 7 баллам, согласно СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах».

Утепление арок было принято согласно теплотехническому расчету. Для первого варианта утепления принята толщина пенополиуретана 140 мм плотностью $\rho=80 \text{ кг/м}^3$, согласно СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий». Для второго варианта была выбрана минеральная вата торговой марки Технониколь Технофас толщиной 140 мм и плотностью $\rho=145 \text{ кг/м}^3$.

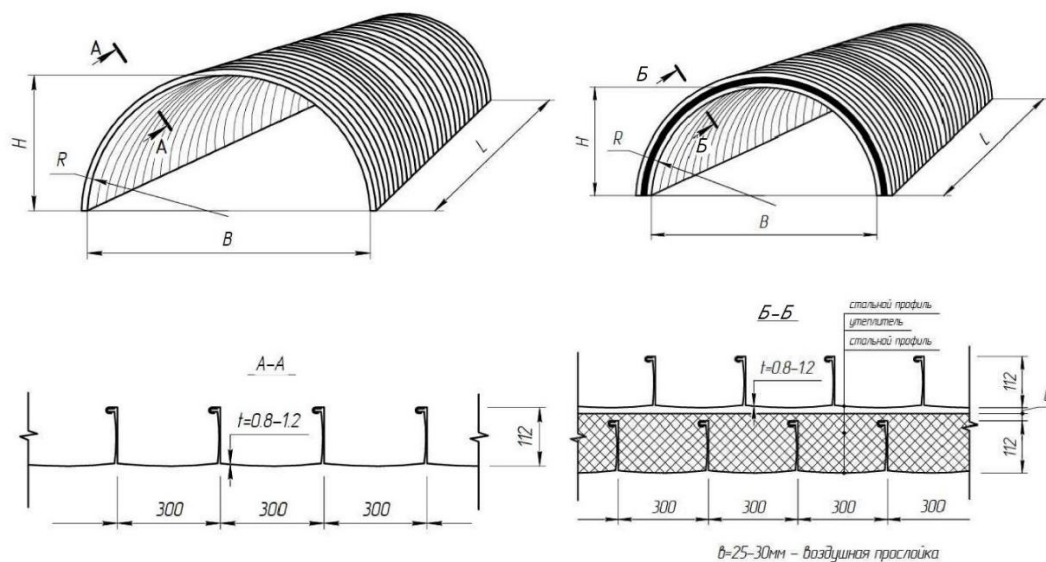


Рис. 1 – Разрез по сечениям профилей арочных покрытий, составленных из П-образных профилей, согласно ТУ 5283-001-82913322-2009: слева – арочное покрытие, возведенное на одном П-образном профиле, справа – арочное покрытие, утепленное минеральной ватой между двумя П-образными профилями.

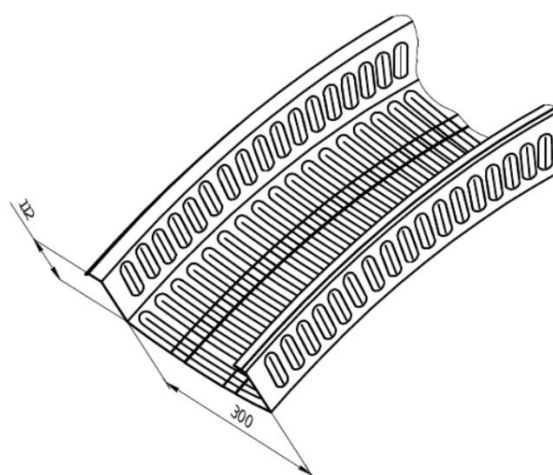


Рис. 2 – Фрагмент П-образного арочного профиля, согласно ТУ 5283-001-82913322-2009.

П-образный арочный профиль был принят для всех расчетных схем толщиной 1,2 мм, согласно ТУ 5283-001-82913322-2009 «Бескаркасные арочные конструкции покрытий из стальных холодногнутых профилированных листов», и марки стали С245 с расчетным сопротивлением $R_y=240$ МПа, согласно СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции». Геометрические и прочностные характеристики данных профилей были сведены в таблицу № 1. Недостающие численные характеристики были рассчитаны самостоятельно. В дальнейшем они использовались для описания жесткостных характеристик стержневых элементов расчетных схем. Пример расчетной схемы покрытия, построенной на плоскости XOZ, показан на рис. 3.

Данные покрытия рассчитывались как для внецентренно сжатых/растянутых элементов [8,9] по формуле (1):

$$\frac{F}{A} + \frac{M_y}{W_y} = \sigma \leq R_y, \quad (1)$$

где F – продольная сжимающая/растягивающая сила на рассматриваемом участке, кН; A – площадь сечения профиля, м²; M_y – изгибающий момент на рассматриваемом участке по оси Y , кН·м; W_y – минимальный момент сопротивления профиля по оси Y , м³; σ – нормальное напряжение на рассматриваемом участке, кН/м²; R_y – расчетное сопротивление стали, кН/м²

Эпюры моментов, продольных сил и максимальных перемещений от исходной расчетной схемы в плоскости XOZ вычислялись в программном комплексе SCAD Office 21 методом конечных элементов [10]. Закрепление расчетных схем покрытий на концах принято шарнирное. Данные покрытия задавались стержнями. Расчетные и прочностные характеристики указывались в SCAD Office 21 численным методом и представлены на рис. 4. Комбинации нагрузок представлены в таблицах № 2 и 3. Так как расчетная схема построена на одной плоскости XOZ, сейсмическая и пульсационная нагрузка по Y не рассматривалась.

Таблица № 1

Геометрические и прочностные характеристики сечений

Наименование профиля		П-образный арочный профиль П-1,2
Толщина профиля, мм		1,2
Вес арки, кг		5,95
Площадь A , мм ²		726
Момент инерции, см ⁴	I_x	78,1
	I_y	65,3
Момент сопротивления, см ³	W_{x1}	15,6
	W_{x2}	12,7
	W_{y1}	9,4
	W_{y2}	14,8
Продольная жесткость EF , кН		149 556
Изгибаемая жесткость, кН·м ²	EJ_x	160,886
	EJ_y	134,518
Крутильная жесткость $GI_{кр}$, кН/м ²		113,62
Полярный момент инерции $I_{кр}=I_x+I_y$, см ⁴		143,4
Сдвиговая жесткость GF , кН	по оси X (в SCAD Office по Y)	5 229,23
	по оси Y в SCAD Office по Z)	12 201,54
Условная площадь среза (рассчитан в SCAD Консул [10]), см ²	по оси X (в SCAD Office по Y)	0,66
	по оси Y (в SCAD Office по Z)	1,54

Полученные значения были внесены в таблицу, формулами для быстрых вычислений нормальных напряжений в покрытиях σ и определения коэффициентов использования при разных загрузениях $K_{п}$, по формуле (2):

$$K_{п} = \sigma / R_y, \quad (2)$$

где R_y – расчетное сопротивление стали, кН/м²; σ – вычисленное нормальное напряжение в рассматриваемом участке, кН/м².

Конечный результат представлен в таблицах № 4 и 5. После расчета, в таблице был проведен анализ результатов проведенного расчета по каждому типу утепления.

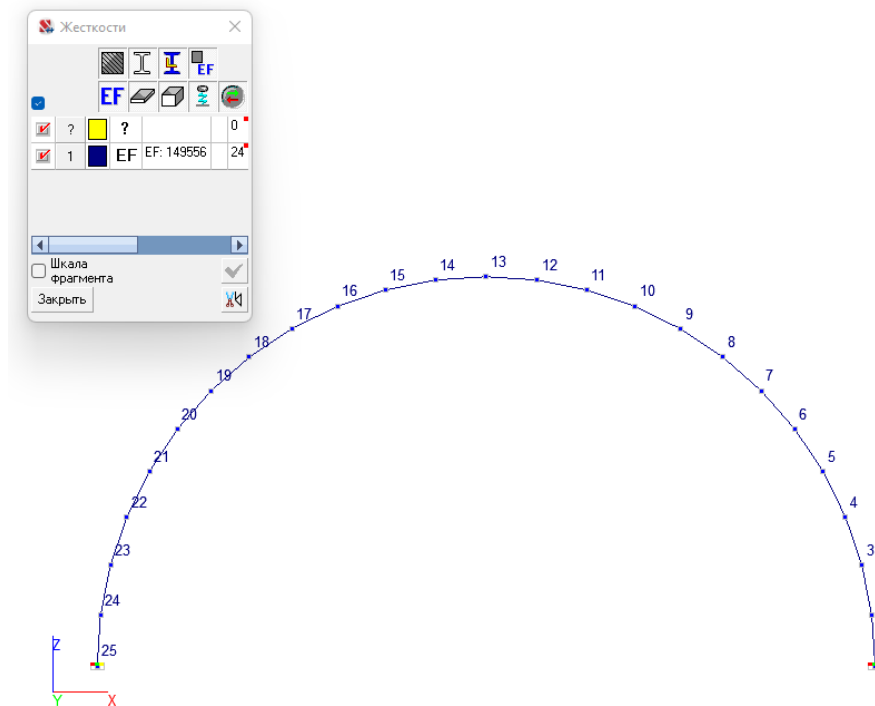


Рис. 3. – Пример расчетной схемы арочного покрытия пролетом 9 м.

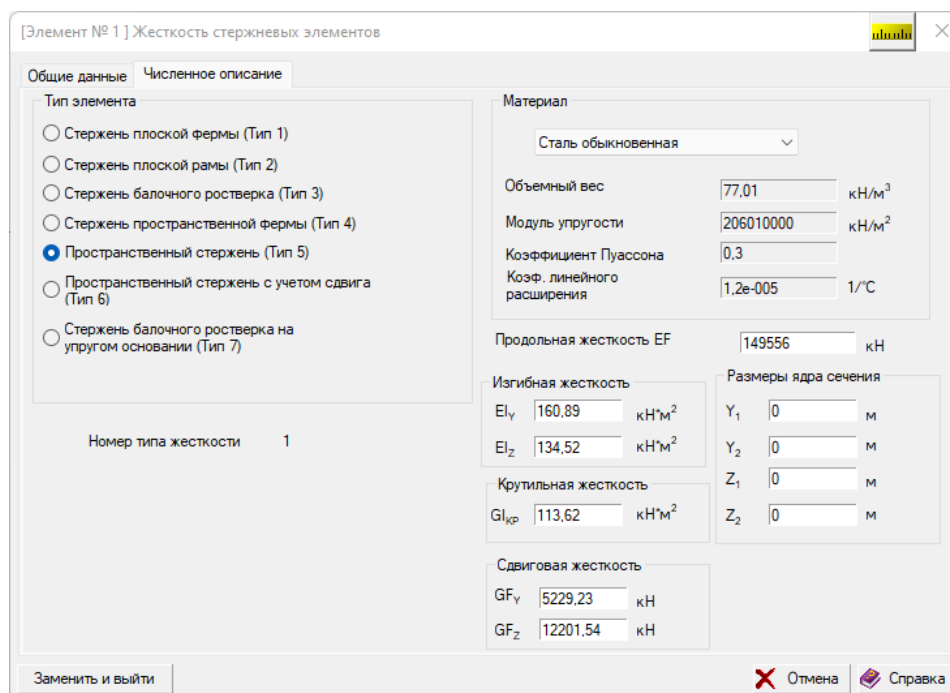


Рис. 4. – Численное описание геометрических характеристик стержней расчетных схем.

Таблица № 2

Комбинации загружений для покрытий, утепленные пенополиуретаном

№п/п	Комбинация загружений
1	"Собственный вес покрытия" + "Вес утеплителя"
2	"Собственный вес покрытия" + "Вес утеплителя"+0,9·"Снеговая нагрузка (I вариант загружений)"
3	"Собственный вес покрытия" + "Вес утеплителя"+0,9·"Снеговая нагрузка (II вариант загружений)"
4	"Собственный вес покрытия" + "Вес утеплителя"+0,9·"Снеговая нагрузка (I вариант загружений) · 0,7·"Пульсация по оси +X (I вариант загружений)"
5	"Собственный вес покрытия" + "Вес утеплителя"+0,9·"Снеговая нагрузка (II вариант загружений) + 0,7·"Пульсация по оси +X (II вариант загружений)"
6	"Собственный вес покрытия" + "Вес утеплителя"+0,9·"Снеговая нагрузка (I вариант загружений) + 0,7·"Пульсация по оси -X (I вариант загружений)"
7	"Собственный вес покрытия" + "Вес утеплителя"+0,9·"Снеговая нагрузка (II вариант загружений) + 0,7·"Пульсация по оси -X (II вариант загружений)"
8	0,9·"Собственный вес покрытия"+0,9·"Вес утеплителя"+0,5·"Снеговая нагрузка (I вариант загружений) + 1·"Сеймика по оси X (I вариант загружений)"
9	0,9·"Собственный вес покрытия"+0,9·"Вес утеплителя"+0,5·"Снеговая нагрузка (II вариант загружений) + 1·"Сеймика по оси X (II вариант загружений)"
10	0,9·"Собственный вес покрытия"+0,9·"Вес утеплителя"+0,5·"Снеговая нагрузка (I вариант загружений) + 1·"Сеймика по оси Z (I вариант загружений)"
11	0,9·"Собственный вес покрытия"+0,9·"Вес утеплителя"+0,5·"Снеговая нагрузка (II вариант загружений) + 1·"Сеймика по оси Z (II вариант загружений)"

Таблица № 3

Комбинации загружений для покрытий, утепленные минеральной ватой

№ п/п	Комбинации загружений для внешнего и внутреннего профилей	
12	Внешний профиль	"Собственный вес покрытия"
13		"Собственный вес покрытия"+0,9·"Снеговая нагрузка (I вариант загружений)"
14		"Собственный вес покрытия"+0,9·"Снеговая нагрузка (II вариант загружений)"
15		"Собственный вес покрытия"+0,9·"Снеговая нагрузка (I вариант загружений) · 0,7·"Пульсация по оси +X (I вариант загружений)"
16		"Собственный вес покрытия"+0,9·"Снеговая нагрузка (II вариант загружений) + 0,7·"Пульсация по оси +X (II вариант загружений)"
17		"Собственный вес покрытия"+0,9·"Снеговая нагрузка (I вариант загружений) + 0,7·"Пульсация по оси -X (I вариант загружений)"
18		"Собственный вес покрытия"+0,9·"Снеговая нагрузка (II вариант загружений) + 0,7·"Пульсация по оси -X (II вариант загружений)"
19		0,9·"Собственный вес покрытия"+0,5·"Снеговая нагрузка (I вариант загружений) + 1·"Сеймика по оси X (I вариант загружений)"
20		0,9·"Собственный вес покрытия"+0,5·"Снеговая нагрузка (II вариант загружений) + 1·"Сеймика по оси X (II вариант загружений)"
21		0,9·"Собственный вес покрытия"+0,5·"Снеговая нагрузка (I вариант загружений) + 1·"Сеймика по оси Z (I вариант загружений)"
22		0,9·"Собственный вес покрытия"+0,5·"Снеговая нагрузка (II вариант загружений) + 1·"Сеймика по оси Z (II вариант загружений)"
23		Внутренний профиль
24	0,9·"Собственный вес покрытия"+0,9·"Вес утеплителя"+1·"Сеймика по оси X"	
25	0,9·"Собственный вес покрытия"+0,9·"Вес утеплителя"+1·"Сеймика по оси Z"	

Результаты расчетов покрытий, утепленные пенополиуретаном

№п/п	Пролет покрытия l , м	Высота покрытия h , м	Коэффициент использования арочного покрытия по прочности при заданном пролете арки K_{Π}	Максимальное перемещение расчетной схемы от исходного положения в плоскости XOZ, мм
1	9	4,5	0,44	34,27
2	12	6	0,91	113,15
3	15	7,5	1,47	436,45

Вывод: Анализируя полученные значения, было установлено, что неблагоприятное загрузке при расчете покрытия во всех пролетах - под номером 4 и 6. В пролете 9 метров большой запас по прочности и, как следствие, удорожание сооружения. Следует рассмотреть арочный П-образный профиль с меньшей толщиной профиля. Арочное покрытие пролетом 15 метров имеет коэффициент использования больше единицы, что означает “перегруз” при комбинации загрузке под номером 5. Следует рассмотреть конструктивные решения по увеличению несущей способности и/или мероприятия по снижению снеговой и ветровой нагрузки. Данные арочные покрытия не нормируются по прогибам и перемещениям. Полученные значения могут использоваться для дальнейшей оценки и составления нормативных требований для арочных покрытий по II группе предельных состояний конструкций.

Исходя из полученных данных, были составлены графики зависимостей:

- 1) Зависимость между пролетом покрытия l и коэффициентом использования арочного покрытия по прочности K_{Π} , изображенная на рис. 5;
- 2) Зависимость между пролетом покрытия l и максимальным перемещением расчетной схемы от исходного положения в плоскости XOZ, изображенная на рис. 6.

Таблица № 5

Результаты расчетов покрытий, утепленные минеральной ватой

№ п/п	Пролет покрытия l , м	Высота покрытия h , м	Коэффициент использования арочного покрытия по прочности при заданном пролете арки K_p	Максимальное перемещение расчетной схемы от исходного положения в плоскости XOZ, мм
4	Наружный арочный профиль			
	9	4,5	0,45	34,69
	Внутренний арочный профиль			
	8,68	4,34	0,12	5,18
5	Наружный арочный профиль			
	12	6	0,93	146,63
	Внутренний арочный профиль			
	11,68	5,84	0,21	14,26
6	Наружный арочный профиль			
	15	7,5	1,68	438,75
	Внутренний арочный профиль			
	14,68	7,34	0,31	33,80

Вывод: Анализируя полученные значения, было установлено, что неблагоприятным нагружением для всех внутренних профилей является комбинация нагружения под номером 24. Внутренние профили имеют большой запас по прочности и, как следствие, удорожание сооружения. Анализируя наружные профили, приходим к выводу, что неблагоприятным сочетанием нагружения является для пролета 9 метров сочетание под номером 16 и для пролетов 12 и 15 под номером 17. В пролете 9 метров большой запас по прочности, что приводит тоже к удорожанию покрытия. Следует рассмотреть внутренние и наружные профили с меньшей толщиной профиля, чем 1,2 мм. Арочное покрытие пролетом 15 метров имеет коэффициент использования больше единицы, что означает “перегруз” при комбинации нагружения под номером 5. Следует также для данного типа покрытия рассмотреть конструктивные решения по увеличению несущей способности или мероприятия. Данные арочные покрытия не нормируются по прогибам и перемещениям. Так как покрытие состоит из двух профилей, перемещение внешнего профиля будет меньше, вследствие опирания на внутренний профиль. Следует это учесть при дальнейшей оценке и составлении нормативных требований для арочных покрытий по II группе предельных состояний конструкций.

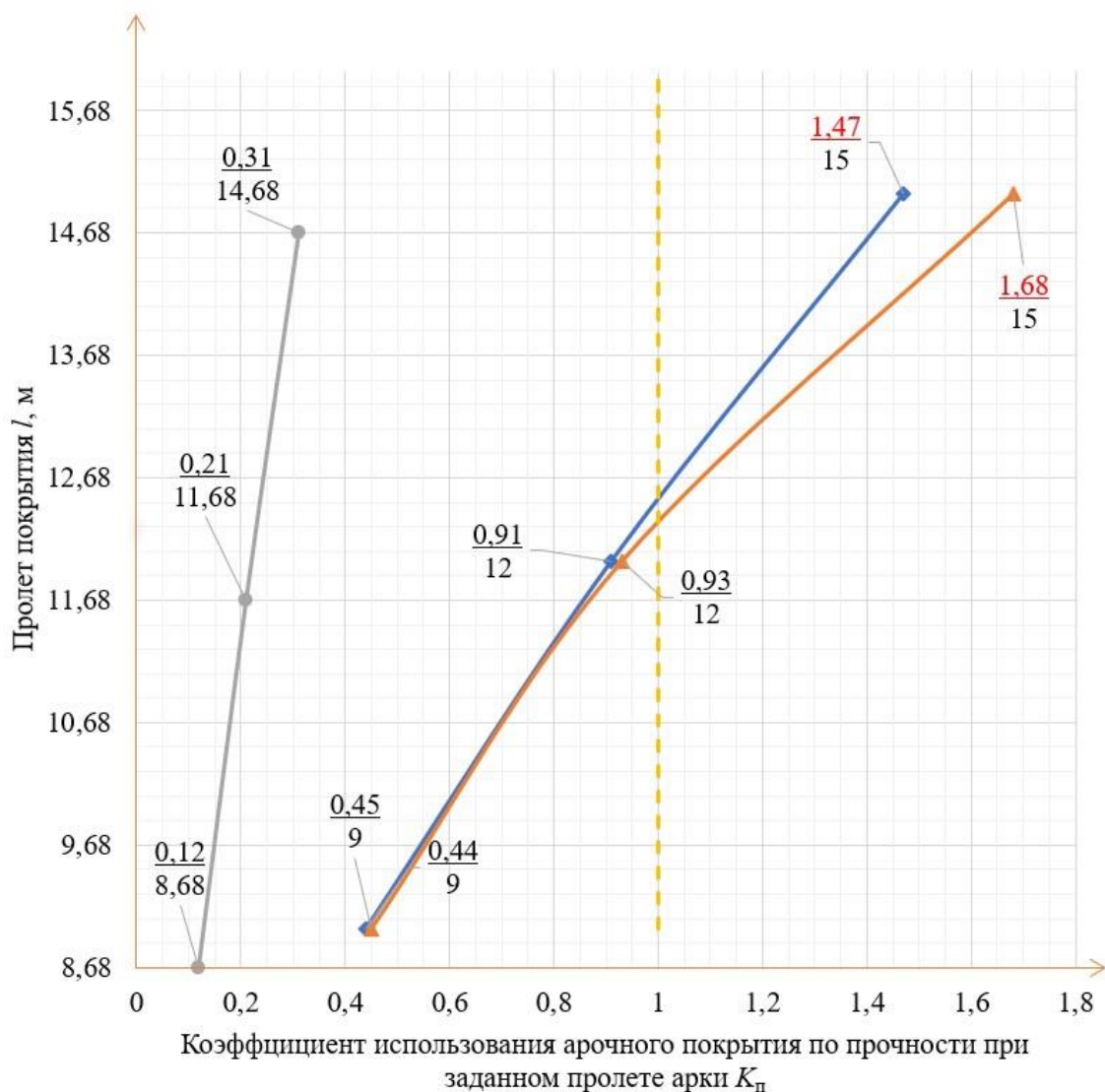


Рис. 5 – График зависимости между пролетом покрытия l и коэффициентом использования арочного покрытия по прочности K_p :

- — бескаркасное арочное покрытие, утепленное пенополиуретаном,
- — наружный арочный профиль бескаркасного арочного покрытия, состоящего из 2-х П-образных профилей,
- — внутренний арочный профиль бескаркасного арочного покрытия, состоящего из 2-х П-образных профилей,
- — предельно допустимое значение коэффициента использования K_p равный 1.

Благодаря проделанной работе и составленным графикам зависимостей, можно сделать вывод, что при возведении арочных покрытий из П-образных профилей в условиях резко-континентального климата Республики Хакасия из промежуточных значений длин пролетов мы получим

приблизительные значения коэффициента использования K_{Π} и максимальное перемещение расчетной схемы в плоскости XOZ.

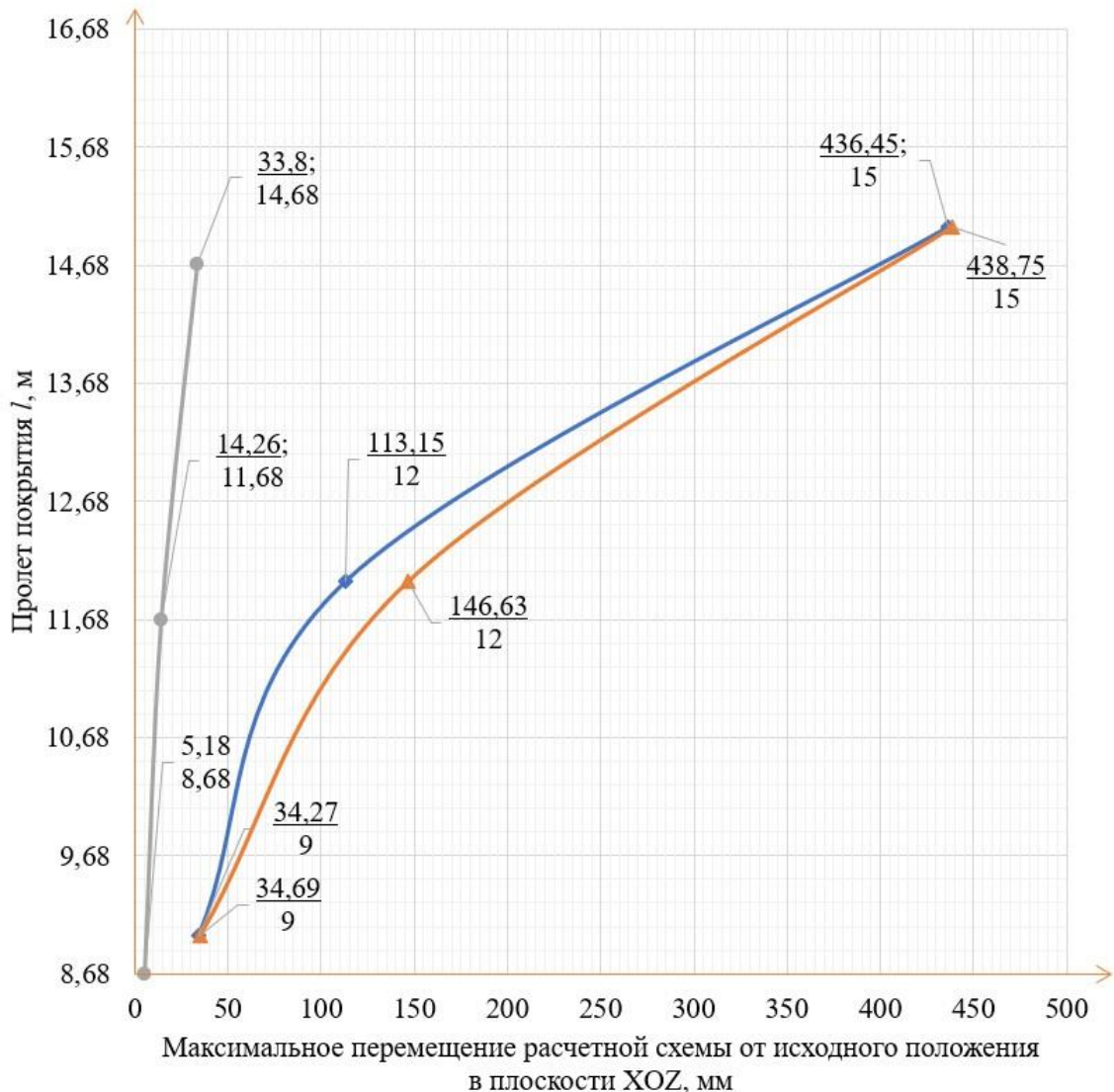


Рис. 6 – График зависимости между пролетом покрытия l и максимального перемещения расчетной схемы от исходного положения в плоскости XOZ:
 ◆ — бескаркасное арочное покрытие, утепленное пенополиуретаном,
 ◀▶ — наружный арочный профиль бескаркасного арочного покрытия, состоящее из 2-х П-образных профилей, ● — внутренний арочный профиль бескаркасного арочного покрытия, состоящего из 2-х П-образных профилей.

Проблема данных покрытий, проектируемых для резко-континентального климата Республики Хакасия в том, что они нужны для

больших пролетов и с минимальными площадями мертвых зон, которые начинают появляться, если высота покрытия меньше половины пролета.

Покрытия пролетами 9 метров для первого и второго типа утепления имеют большой запас по прочности, что требует замены профиля с меньшим сечением, для уменьшения расхода стали. Для пролетов 15 метров для первого и второго типа утепления требуются дополнительные конструктивные мероприятия по увеличению несущей способности и дополнительные мероприятия по снижению воздействия снеговой и ветровой нагрузок.

В будущем данные графики могут использоваться при дальнейших исследованиях и быть рассмотрены для составления методических указаний, нормативных требований и документации по их проектированию.

Литература

1. Жданов Д. А., Уласевич В. П. Бескаркасные арочные покрытия из стальных тонкостенных профилей: история, современное состояние и перспективы применения в Республике Беларусь // Вестник Брестского государственного технического университета. Строительство и архитектура, 2016, №1 URL: elibrary.ru/item.asp?id=36945941.

2. Sweeney S., Briassoulis D., Kao A. Evaluation of K-Span as a rapidly erectable lightweight mobilization structure // US Army Corps of Engineers Construction Engineering Research Laboratory, Technical Report M-91/06, 1991, URL: archive.org/details/DTIC_ADA231699.

3. Калабин Ю. Л. Проблемы эксплуатации бескаркасных арочных ангаров // Журнал «Master Journal», 2020, №1. URL: elibrary.ru/item.asp?id=43776868.

4. Мазур В. А., Чайка М. А. Выбор рационального метода возведения утепленных бескаркасных арочных ангаров // Вестник Донбасской

национальной академии строительства и архитектуры, 2019, №4 URL: elibrary.ru/item.asp?id=42389391.

5. Макеев С. А., Краснощеков С. А. Расчет несущей способности бескаркасных цилиндрических зернохранилищ технологии ZENAN, Австралия // Журнал «Международный научно-исследовательский журнал», 2017, №12-5 URL: elibrary.ru/item.asp?id=32368304.

6. Макеев С. А. Математическая модель бескаркасного двухслойного арочного свода из холодногнутых тонколистовых стальных профилей // Журнал «Строительная механика и расчет сооружений», 2009, № 2 URL: elibrary.ru/item.asp?id=11784150.

7. Piekarczyk A., Malowany K., Wiech P., Kujawska M., Sulik P. Stability and bearing capacity of arch-shaped corrugated shell elements: experimental and numerical study // Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences, 2015, №1. URL: [semanticscholar.org/paper/Stability-and-bearing-capacity-of-arch-shaped-shell-Piekarczyk-Malowany/3ffb7f92636fd0b45ab6d518b24f93714280907d](https://www.semanticscholar.org/paper/Stability-and-bearing-capacity-of-arch-shaped-shell-Piekarczyk-Malowany/3ffb7f92636fd0b45ab6d518b24f93714280907d).

8. Красновский Б. М. Промышленное и гражданское строительство в задачах с решениями. Москва: Издательство АСВ, 2018. 1520 с.

9. Насонов С. Б. Руководство по проектированию и расчету строительных конструкций. В помощь проектировщику. Москва: Издательство АСВ, 2019. 816 с.

10. Карпиловский В. С., Криксунов Э. З., Маляренко А. А., Перельмутер А. В., Перемутьер М. А., Фиалко С. Ю. SCAD Office. Версия 21. Вычислительный комплекс SCAD++. Москва: Издательство «СКАД СОФТ», Издательство АСВ, 2015. 848 с.

References

1. Zhdanov D. A., Ulasevich V. P. Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura, 2016, №1. URL: elibrary.ru/item.asp?id=36945941.
2. Sweeney S., Briassoulis D., Kao A. US Army Corps of Engineers Construction Engineering Research Laboratory, Technical Report M-91/06, 1991, URL: archive.org/details/DTIC_ADA231699.
3. Kalabin Yu. L. Master Journal, 2020, №1. URL: elibrary.ru/item.asp?id=43776868.
4. Mazur V. A., Chayka M. A. Vestnik Donbasskoy natsional'noy akademii stroitel'stva i arkhitektury, 2019, №4. URL: elibrary.ru/item.asp?id=42389391.
5. Makeev S. A., Krasnoshchekov S. A. Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skiy zhurnal, 2017, №12-5. URL: elibrary.ru/item.asp?id=32368304.
6. Makeev S. A. Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy, 2009, № 2. URL: elibrary.ru/item.asp?id=11784150.
7. Piekarczyk A., Malowany K., Wiech P., Kujawinska M., Sulik P. Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences, 2015, №1. URL: semantic scholar.org/paper/Stability-and-bearing-capacity-of-arch-shaped-shell-Piekarczyk-Malowany/3ffb7f92636fd0b45ab6d518b24f93714280907d.
8. Krasnovskiy B. M. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo v zadachakh s resheniyami. [Civil and industrial construction in problems with solutions]. Moskva: Izdatel'stvo ASV, 2018. 1520 p.
9. Nasonov S. B. Rukovodstvo po proektirovaniyu i raschetu stroitel'nykh konstruktsiy. V pomoshch' proektirovshchiku. [Guide to the design and calculation of building structures. To help the designer]. Moskva: Izdatel'stvo ASV, 2019. 816 p.
10. Karpilovskiy V. S., Kriksunov E. Z., Malyarenko A. A., Perel'muter A. V., Peremul'ter M. A., Fialko S. Yu. [SCAD Office. Versiya 21. Vychislitel'nyy



kompleks SCAD++. SCAD Office. Version 21. SCAD++ computational complex.
Moskva: Izdatel'stvo «SKAD SOFT»]. Izdatel'stvo ASV, 2015. 848 p.