

К ОЦЕНКЕ ДЕФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ РАСЧЕТА ПОЛОГИХ АРОЧНЫХ СВОДОВ-ОБОЛОЧЕК ИЗ СТАЛЬНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ПРОФИЛЕЙ ТИПА MIC

Уласевич В.П., Жданов Д.А., Сидорук А.В.

Аннотация. Изложены результаты численных исследований пространственных конечно-элементных моделей пологого свода-оболочки бескаркасного арочного покрытия из стальных тонкостенных холодногнутох профилей – аналогов профилей *MIC-120* и *MIC-240* американской корпорации *MIC Industries Inc.*

Показана значимость разгружающего эффекта работы пологого свода-оболочки бескаркасного арочного покрытия при оценке сдвиговой жесткости и важность учета последней при проектировании опорных конструкций пологих бескаркасных арочных покрытий из СТП для восприятия горизонтальной составляющей опорной реакции (распора).

Актуальность работы. Идея бескаркасного арочного покрытия из стальных тонкостенных холодногнутох профилей (СТП), совмещающего в себе несущие и ограждающие функции, была запатентована в США в конце 40-х годов 20-го столетия. Однако широкое использование сооружений такого рода для различных нужд в самых разных странах мира началось лишь в 70-ые годы после того, как было создано принципиально новое технологическое оборудование: мобильная панелеформовочная машина и фальцегибочная электрическая машинка, позволившие, во-первых, изготавливать СТП необходимой дугообразной формы непосредственно на строительной площадке, и, во-вторых, осуществлять их соединение в цельную конструкцию, не прибегая к помощи болтов, заклепок или саморезов [1, 2].

В настоящее время при возведении бескаркасных арочных покрытий одним из наиболее используемых профилей является трапециевидный профиль типа *MIC-120* и *MIC-240*, изготавливаемый на оборудовании американской корпорации *MIC Industries Inc.* либо его многочисленных аналогов [4]. Широкое использование профиля данного типа при строительстве бескаркасных арочных сооружений различного функционального назначения, в паре с целостной, относительно простой и апробированной технологией его применения, позволяет говорить о нем, как о новом, в известной мере, архитектурном и конструктивном элементе.

Устойчивая положительная тенденция в распространении рассматриваемых бескаркасных арочных покрытий из СТП объясняется рядом их преимуществ по сравнению с традиционными кровельными системами. В первую очередь это:

– наличие и доступность всего комплекса оборудования, необходимого и достаточного для изготовления арочных профилей трапециевидного поперечного сечения для арочных покрытий пролетом до 30 метров и выше непосредственно на строительной площадке;

– малая металлоемкость, сухая механизированная сборка, высокая скорость строительства и абсолютная водонепроницаемость готового покрытия;

– отсутствие проблем в доставке к месту сборки готовых большепролетных конструктивных элементов (рулоны оцинкованного металла подвозятся непосредственно на стройплощадку совместно с оборудованием для изготовления необходимых профилей);

– меньшая итоговая стоимость строительства объекта и низкие эксплуатационные затраты на покрытие при долговечности последнего до 50 лет.

Анализ существующих конструктивных решений бескаркасных арочных покрытий свидетельствует о преобладании конструкций, монтируемых из СТП полукруговой формы высотой близкой или равной радиусу и устанавливаемых непосредственно на фундамент. При такой конструктивной схеме достаточно просто решается проблема восприятия распора. Кроме того, крутые арки не только менее деформативны, что допускает линейные модели их расчета, но и наиболее надежны с точки зрения обеспечения общей устойчивости здания.

В последние годы внимание проектировщиков обращено на разработку бескаркасных арочных покрытий зданий в виде пологих арочных сводов-оболочек, совмещающих несущие и ограждающие функции в объеме холодного чердачного пространства зданий. Возможны и утепленные формы покрытий сооружений как общественного, так и производственного назначения, а также мансардных надстроек жилых зданий, возводимых в процессе капитального строительства или капитального ремонта покрытий [4].

Однако широкое применение пологих бескаркасных арочных сводов из СТП в покрытиях общественных, производственных и жилых зданий сдерживается наличием ряда расчетно-конструкторских проблем, среди которых отметим три следующие:

1. Отсутствие оптимального конструктивного решения узла сопряжения пологих сводов-оболочек с опорной конструкцией каркаса здания, учитывающего, в частности, сдвиговую жесткость покрытия совместно с изгибной жесткостью опорного контура.

2. Недостаточная изученность нелинейной работы пологого арочного покрытия из СТП как пространственного тонкостенного свода-оболочки под воздействиями неравномерных снеговых нагрузок [3], [4].

3. Отсутствие простых, но в тоже время достаточно точных и надежных методов расчета пространственных пологих сводов-оболочек из СТП на основе, в частности, *стержневых моделей*, способных обеспечить прочность и устойчивость свода с учетом и геометрической нелинейности и местной устойчивости.

Таким образом, исследования по оценке действительного напряженно-деформированного состояния пологих арочных сводов применительно к покрытиям общественных, производственных и жилых зданий представляют собой актуальную задачу как в теоретическом, так и в практическом плане.

Численные исследования. Целью проведения численных исследований в рамках данной статьи являются: оценка сдвиговой жесткости покрытий с гибким опорным контуром; оценка необходимости учета геометрической нелинейности; оценка расчетных моделей с позиции их эффективности и области применения.

Численные исследования проводились для наиболее распространенных в РБ профилей типа *MIC-120* и *MIC-240* (см. рис. 1). Исследовались модели свода-

оболочки с пролетами $L=12$, $L=15$ и $L=18$ м. Расчетная нагрузка принималась равномерно распределенной от собственного веса и снегового воздействия в виде двух несимметричных треугольников в соответствии с EN 1991-1-3.

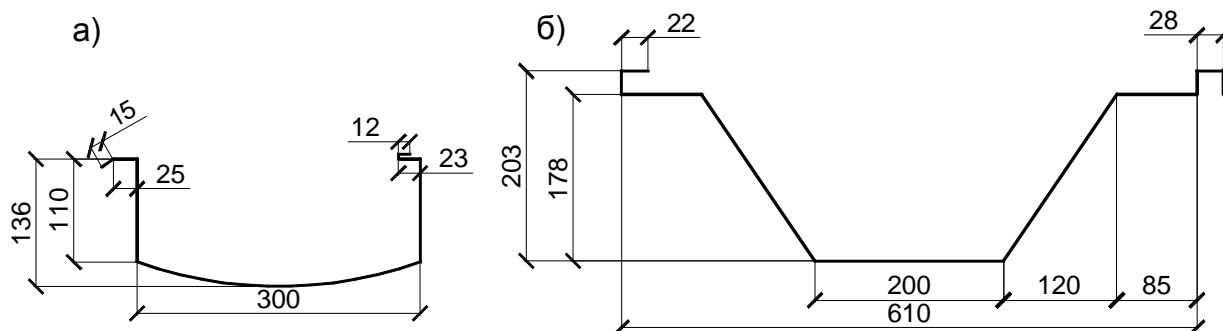


Рисунок 1 – Размеры поперечного сечения профилей:

а) – профиль MIC-120; б) – профиль MIC-240.

В качестве расчетных моделей пологого арочного свода-оболочки из СТХП были приняты:

- модель в виде **пространственного свода-оболочки**, повторяющего форму поперечного сечения холодногнутых элементов типа MIC-120 и MIC-240 (рис. 3, а);
- модель в виде **плоского криволинейного стержня** с эффективными жесткостными характеристиками, вычисленными для полосы свода покрытия шириной 1 м (рисунок 3, б).

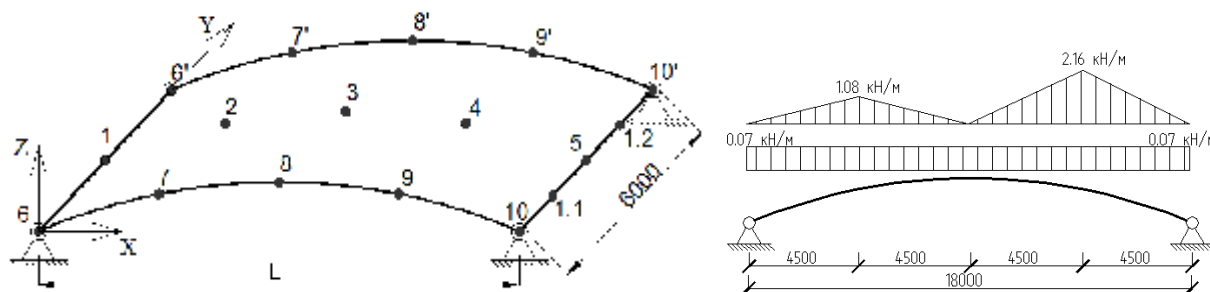


Рисунок 2 – Расчетная модель пологого свода-оболочки и модель воздействия

В качестве инструмента численных исследований использован вычислительный комплекс *Femap with NASTRAN* и компьютерная программа деформационного расчета пологих арочных систем *STARS* в виде стержневой модели арочного свода [3].

Главный упор в численных исследованиях был сделан на конечно-элементную модель свода-оболочки, повторяющую с достаточной точностью форму поперечного сечения холодногнутых арочных элементов типа MIC-120 и MIC-240 (рис. 1). В результате расчета описанной таким образом модели свода в среде *NASTRAN* с толщиной стального оцинкованного листа $t=1.0$ мм и пролетами $L=12$ м, $L=15$ м, $L=18$ м, были получены:

- вертикальные деформации в точках по поверхности свода;
- горизонтальные перемещения опорных участков свода.

В расчетных моделях рассматривалась шарнирная схема крепления свода к опорным двутавровым балкам (рис. 2). С целью оценки влияния сдвиговой жесткости свода-оболочки были приняты две схемы закрепления опорных балок:

- закрепление от вертикального и горизонтального смещения по краям (точки 6, 6' и 10, 10');
- закрепление от вертикального и горизонтального смещения в середине (точки 1 и 5);

Влияние изгибной жесткости опорной балки в горизонтальном направлении учитывалось расчетом свода-оболочки как с конечной ($EI_{on} \neq 0$), так и бесконечно малой ($EI_{on} \rightarrow 0$) жесткостью опорной балки.

Результаты численных исследований свода MIC-240 по расчетной модели, описанной в компьютерной среде *NASTRAN*, представлены в таблицах 1÷3 и на графиках (рис. 4÷6).

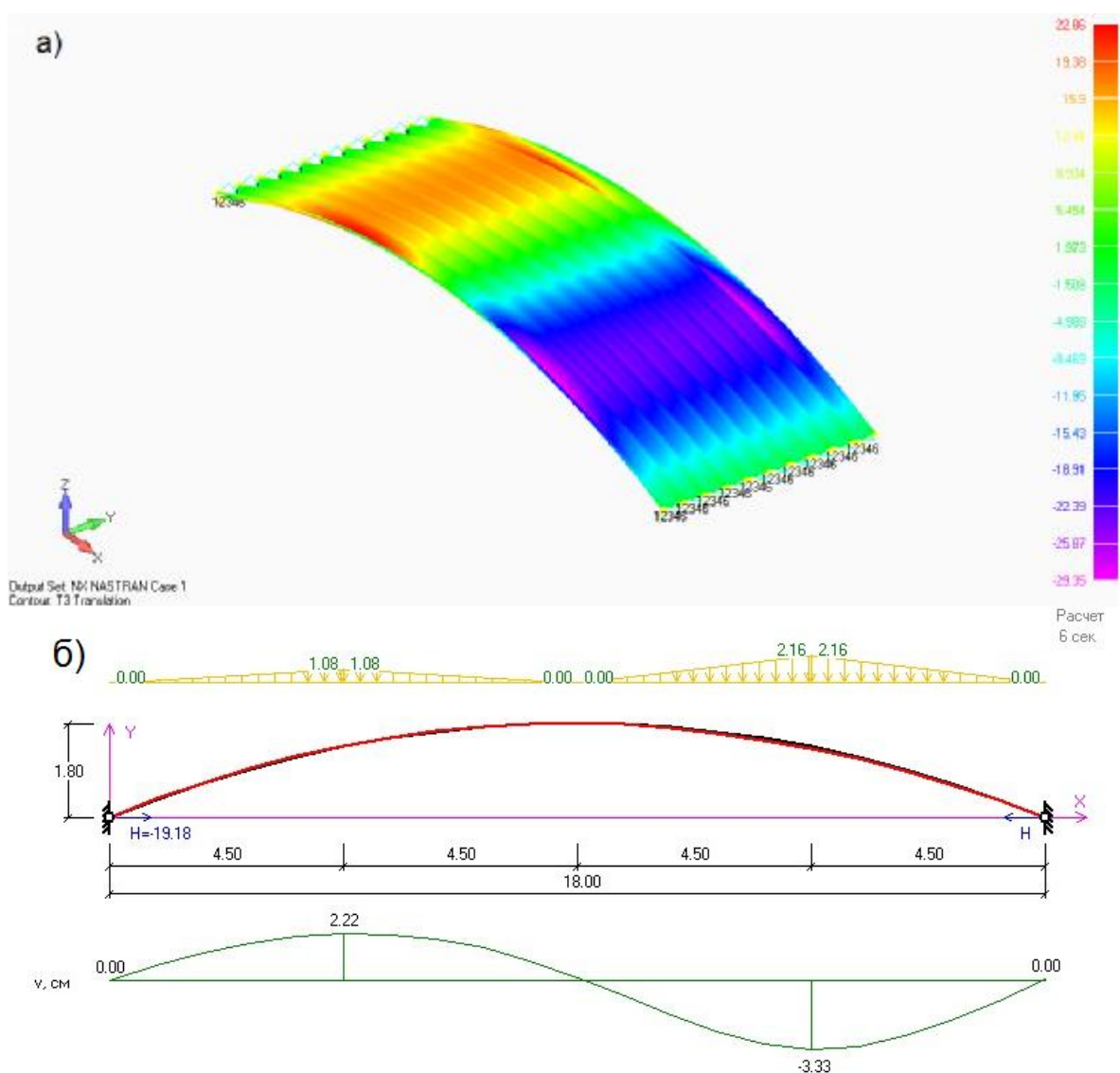


Рисунок 3 – Примеры расчета в изолиниях вертикальных перемещений:
 а) складчатой оболочки (*Femap with NASTRAN*);
 б) плоского криволинейного стержня (*STARS*).

Таблица 1 – Вертикальные перемещения свода МИС-240 в середине пролета

Пролет свода	Жесткость контура	Перемещение в характерных точках, мм				
		1	2	3	4	5
L=12м	$EI_{on} \neq 0$	3.1	30.6	47.3	37.7	4.2
	$EI_{on} \rightarrow 0$	4.8	30.5	47.5	40.1	4.9
L=15 м	$EI_{on} \neq 0$	4.2	25.2	41.9	37.6	1.1
	$EI_{on} \rightarrow 0$	5.4	25.2	42.8	37.6	1.5
L=18 м	$EI_{on} \neq 0$	2.9	25.7	55.6	63.8	1.6
	$EI_{on} \rightarrow 0$	3.6	25.4	53.3	66.3	1.4

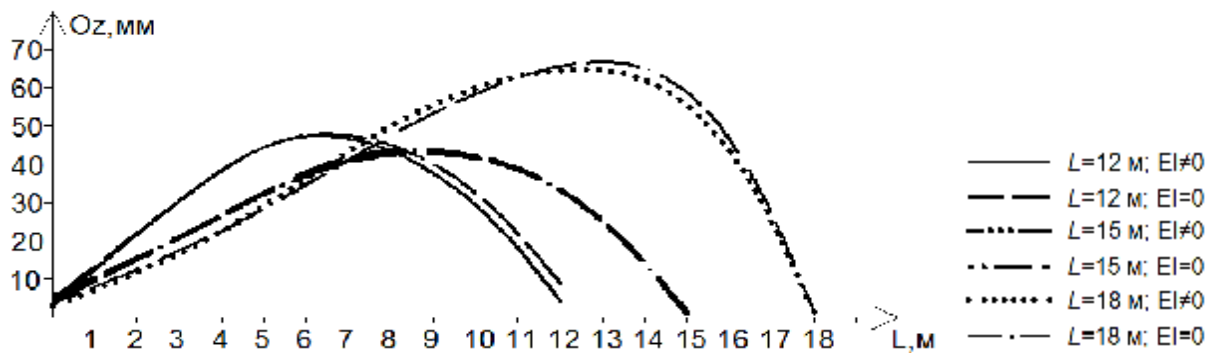


Рисунок 4 – График вертикальных перемещений для точек 1÷5

Таблица 2 – Вертикальные перемещения свода МИС-240 в точ. 6÷10/(6'÷10')

Пролет свода	Жесткость контура	Перемещение в характерных точках, мм				
		6 / (6')	7 / (7')	8 / (8')	9 / (9')	10 / (10')
L=12м	$EI_{on} \neq 0$	0.6/(0.6)	10.9/(10.8)	14.6/(14.8)	1.8/(1.9)	0.3/(0.3)
	$EI_{on} \rightarrow 0$	0.6/(0.5)	13.0/(13.1)	15.8/(15.7)	3.9/(3.7)	0.1/(0.11)
L=15м	$EI_{on} \neq 0$	0.8/(0.8)	21.7/(21.5)	27.3/(27.4)	7.2/(7.1)	0.6/(0.5)
	$EI_{on} \rightarrow 0$	0.4/(0.3)	14.2/(14.3)	30.2/(30.2)	1.8/(1.7)	0.0/(0.1)
L=18м	$EI_{on} \neq 0$	3.8/(3.7)	41.4/(41.5)	55.9/(55.6)	25.9/(25.9)	0.3/(0.3)
	$EI_{on} \rightarrow 0$	2.3/(2.1)	44.5/(44.2)	57.3/(57.1)	23.9/(23.8)	1.0/(1.0)

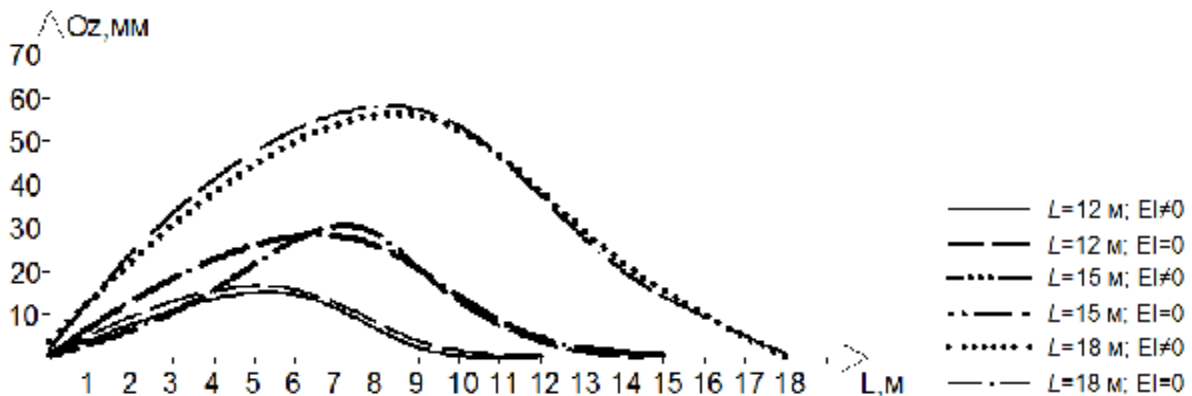


Рисунок 5 - График вертикальных перемещений свода МИС-240 в точках 6÷10/(6'÷10')

Таблица 3 – Горизонтальные перемещения точек торца свода *MIC-240*

Пролет свода	Жесткость опорного контура	Перемещение в характерных точках, мм				
		10	1.1	5	1.2	10'
$L=12\text{м}$	$EI_{on} \neq 0$	0.0	9.4	13.3	9.0	0.0
	$EI_{on} \rightarrow 0$	0.0	9.5	13.5	9.3	0.0
$L=15\text{м}$	$EI_{on} \neq 0$	0.0	11.2	15.2	11.0	0.0
	$EI_{on} \rightarrow 0$	0.0	11.9	15.8	11.7	0.0
$L=18\text{м}$	$EI_{on} \neq 0$	0.0	15.3	21.2	15.1	0.0
	$EI_{on} \rightarrow 0$	0.0	15.8	21.9	15.9	0.0

Следует заметить, что все данные, приведенные в таблицах 1÷3, были получены на основе расчета конечно-элементной модели *NASTRAN* в линейной постановке. В нелинейной постановке была рассчитана лишь конечно-элементная модель свода *MIC-120* пролетом $L=12\text{м}$.

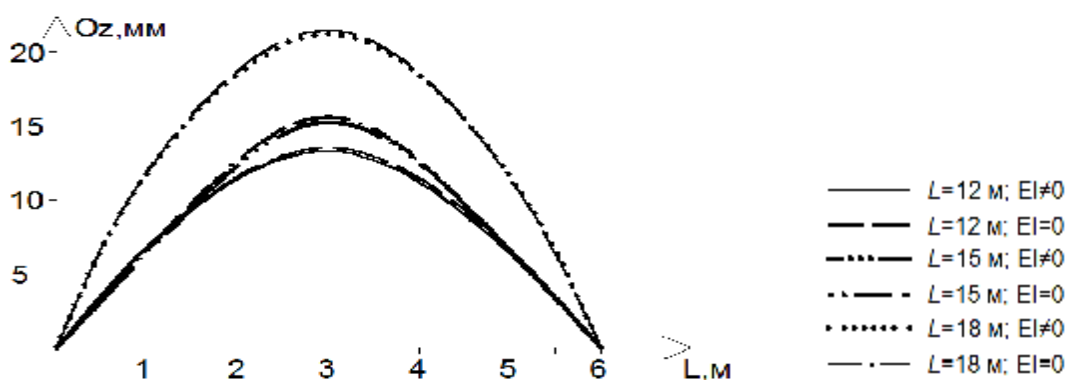


Рисунок 6 – График горизонтальных перемещений опорных точек модели *MIC-240*

Результаты численных расчетов модели свода *MIC-120* в линейной и нелинейной ($L=12\text{м}$) постановках представлены в таблицах 4 и 5.

Таблица 4 – Горизонтальные перемещения опорных точек свода *MIC-120*

Параметры свода-оболочки		Перемещения в характерных точках модели, мм				
		10	1.1	5	1.2	10'
$L=12\text{м}$	$EI_{on} \neq 0$	0.0	5.8	8.6	6.9	0.0
	$EI_{on} \rightarrow 0$	0.0	6.7	9.4	7.8	0.0
$L=12\text{м}^*$	$EI_{on} \neq 0$	0.0	6.9	10.4	8.0	0.0
$L=15\text{м}$	$EI_{on} \neq 0$	0.0	6.8	9.1	7.6	0.0
	$EI_{on} \rightarrow 0$	0.0	7.6	10.1	7.8	0.0
$L=18\text{м}$	$EI_{on} \neq 0$	0.0	2.8	4.9	3.5	0.0
	$EI_{on} \rightarrow 0$	0.0	3.7	5.1	4.5	0.0

* нелинейный расчет

Таблица 5 – Вертикальные перемещения свода *MIC-120* при $L=12\text{м}$ и $EI_{on} \neq 0$

Условия закрепления опорных балок	Перемещения в характерных точках модели, мм				
	1	2	3	4	5
2 опорные точки	2.3	14.2	26.0	31.4	9.5
1 опорная точка	0.0	4.8	8.7	7.4	0.0
Условия закрепления опорных балок	Перемещения в характерных точках модели, мм				
	6/(6')	7/(7')	8/(8')	9/(9')	10/(10')
2 опорные точки	0.6/(0.6)	5.6/(5.3)	6.7/(6.8)	5.2/(5.1)	0.4/(0.4)
1 опорная точка	1.2/1.2	10.1/10.1	18.5/18.5	25.4/25.4	13.3/13.3

Характер вертикальных перемещений свода $L=12\text{м}$, с закреплением опорных балок от горизонтальных смещений по краям и по середине, показан на рис. 7 и 8 соответственно.

Таблица 6 – Горизонтальные перемещения свода $MIC-120$ при $L=12\text{м}$ и $EI_{on} \neq 0$

Условия закрепления опорных балок	Перемещения в характерных точках модели, мм				
	10	1.1	5	1.2	10'
2 опорные точки	0.0	5.8	8.6	6.9	0.0
1 опорная точка	5.3	3.3	0.0	3.2	5.3

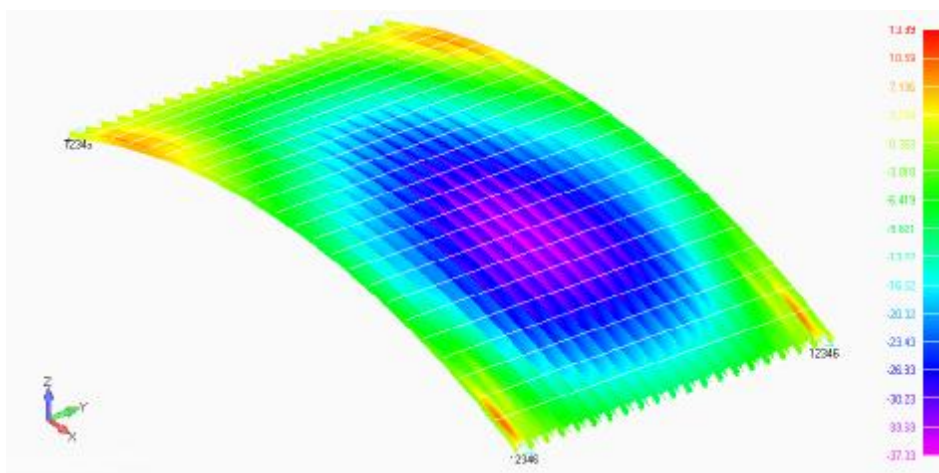


Рисунок 7 – Изополя вертикальных перемещений свода $L=12\text{м}$, с закреплением опорных балок по краям

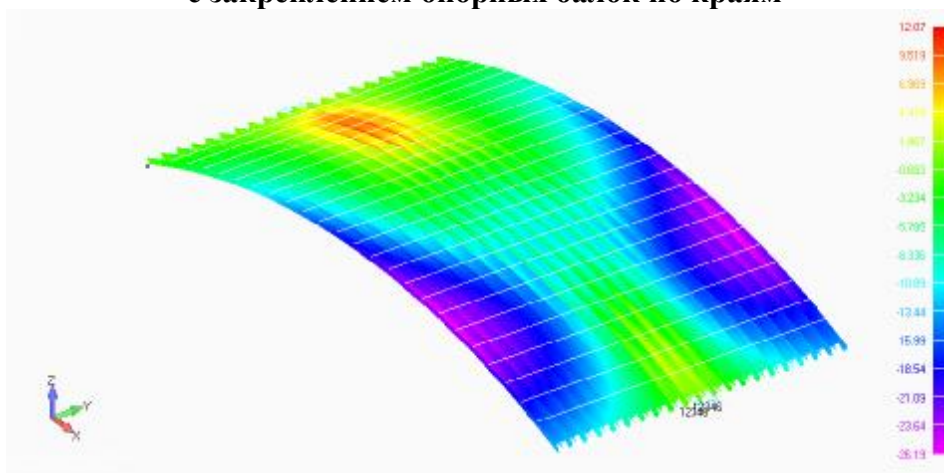


Рисунок 8 – Изополя вертикальных перемещений свода $L=12\text{м}$, с закреплением опорных балок в середине

Эффективность расчета свода-оболочки пролетом $L=18\text{м}$ по пространственной модели в *NASTRAN* и по стержневой модели *STARS* подтверждена сравнительными результатами расчетов, представленными в табл. 7.

Таблица 7 – Сравнительная оценка точности расчета свода в перемещениях

Программный комплекс	Перемещения в характерных точках модели, мм				
	1	2	3	4	5
<i>STARS</i> (стержневая модель)	0.0	22.2	1.2	-33.3	0.0
<i>NASTRAN</i> (модель свод-оболочка)	0.2	22.9	0.3	-29.4	-0.4

Заключение. Результаты численных исследований, изложенные в данной работе, позволяют сделать следующие выводы:

1. При использовании в качестве покрытия зданий пологого арочного свода-оболочки из стального холодногнутого арочного профиля типа *МІС* целесообразно учитывать его сдвиговую жесткость. Это позволяет увеличить расстояние между точками передачи распора свода до 6 м. При этом свод-оболочка толщиной профиля $t=1.0$ мм способна надежно перекрывать пролеты зданий $L \leq 18.0$ м с пологостью арочного свода покрытия $f/l \leq 1/10$ (для г. Бреста).

2. Применение *нелинейной стержневой модели* [3] позволяет не только снизить трудоемкость расчета по сравнению с *пространственной моделью свода-оболочки*, но и надежно спрогнозировать поведение арочного свода под снеговыми и ветровыми воздействиями в процессе эксплуатации, в том числе – прочность, общую устойчивость равновесия и местную устойчивость элементов поперечного сечения, полученных в деформированной схеме равновесия [2], [3], [4]. При этом вопрос учета сдвиговой жесткости покрытия при расчете стержневой модели требует более детального изучения.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Айрумян, Э.Л. Эффективные холодногнутые профили из оцинкованной стали – в массовое строительство / Э.Л. Айрумян, В.Ф. Беляев // Монтажные и специальные работы в строительстве. – 2005. – № 11. – С. 10–17.

2. Уласевич, В.П. Особенности напряженно-деформированного состояния гибких пологих арок из стальных тонкостенных гнутых профилей / В.П. Уласевич, Д.А. Жданов // Вестник БрГТУ. – 2012 – № 1(73): Строительство и архитектура – С. 104–110.

3. Уласевич, В.П. Деформационный расчет бескаркасных арочных покрытий из стальных тонкостенных холодногнутых профилей / В.П. Уласевич, Д.А. Жданов // Вестник БрГТУ. – 2015. – № 1(91): Строительство и архитектура – С. 66–72.

4. Жданов, Д.А. Бескаркасные арочные покрытия из стальных тонкостенных профилей: История, современное состояние и перспективы применения в Республике Беларусь / Д.А. Жданов, В.П. Уласевич // Вестник БрГТУ. – 2016. – № 1(97): Строительство и архитектура – С. 30–34.