

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ КРУГЛЫХ ДВУХПОЯСНЫХ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ ВИСЯЧИХ ПОКРЫТИЙ

Раззаков С.Р., Ахмадияров У.С., Раззаков Н.С.

Самаркандский государственный архитектурно-строительный
институт
г. Самарканд, Узбекистан

АННОТАЦИЯ: Приводяться методика і результати експериментального дослідження двохпоясного круглого попередньо напруженого висячого покриття діаметром 120 м, з даними про зусилля і деформації вант, опорних контурів і порівнянні їх з теоретичними даними.

АННОТАЦИЯ: Приводятся методика и результаты экспериментального исследования двухпоясного круглого преднапряженного висячего покрытия диаметром 120 м, с данными об усилиях и деформациях вант, опорных контуров, и сравнением их с теоретическими данными.

ABSTRACT: The paper presents the method and results of experimental research of two-belted circular prestressed suspended roofs with the diameter of 120 m, with the data of forces and deformations of guys, supporting contours and comparison them with the theoretical data.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: экспериментальные исследования, круглые, двухпоясные, предварительно напряженные, висячие покрытия.

Научно-производственной лабораторией «Пространственные конструкции и сейсмостойкость зданий и сооружений» разработаны новые уникальные конструкции висячих покрытий типа круглых преднапряженных двухпоясных систем пролетом 120 м и с проемом диаметром 60 м для общественных зданий. Экспериментальная модель такой конструкции показана на рис. 1.

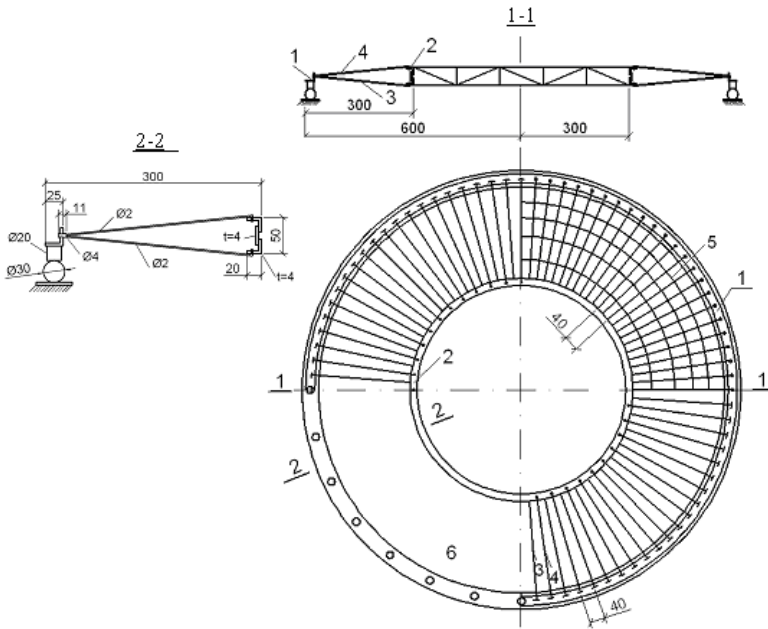


Рис. 1. Конструкция модели преднапряженного висячего покрытия

Исследования проводились на экспериментальных моделях в масштабе 1:100 к натуре с последующим испытанием элементов, несущих конструкций висячих систем и их фрагментов на различные сочетания статических и динамических нагрузок. Величины нагрузок принимались из экспериментальных условий работы натуральных конструкций.

Модели висячих большепролетных покрытий выполнялись с соблюдением требований теории моделирования физического подобия. Нагрузки на исследуемую модель и натурную конструкцию в соответствии с рекомендациями по моделированию определялись с учетом прочностных характеристик материалов:

$$q_m = \frac{q_n}{\alpha_R}; q_{ml} = \frac{q_{nl}}{\alpha_m \alpha_R}; F_m = \frac{F_n}{\alpha_m^2 \alpha_R}, \quad (1)$$

где q_m , q_{ml} , F_m – соответственно, равномерно-распределенная по площади, распределенная по длине и сосредоточенная нагрузки на модель;

q_n , q_{nl} , F_n – соответственно, на натурные конструкции;

$\alpha_m = l_H / l_M$ - коэффициент масштаба геометрического подобия;

$\alpha_R = R_H / R_M$ - коэффициент масштаба прочности материалов;

$\alpha_E = E_H / E_M$ - коэффициент масштаба модулей упругости.

В выражении (1) нагрузка на ванты моделей висячих покрытий принимается состоящей из суммы [1]:

$$q(x) = q = g + p + v + q_s, \quad (2)$$

где g – постоянная нагрузка;

p - временная нагрузка;

v – нагрузка предварительного напряжения при расчетном нагружении, равная 10...15% от $g + p$;

q_s – сейсмическая составляющая нагрузки.

В модели масштабом М 1:100 наружное опорное кольцо диаметром 1200 мм изготавливалось из уголка сечением 25x4 мм. Круглая форма кольца осуществлялась вальцовкой, точность кривизны проверялась кривизномером. Испытательный стенд и опоры наружных колец соединялись шарнирно. Центральное двухпоясное решетчатое кольцо диаметром 600 мм и высотой 50 мм изготовлено из равнобоких уголков сечением 20x4 мм.

Ванты изготавливались из стальной проволоки диаметром 2 мм. Предварительное напряжение осуществлялось натяжением диаметрально расположенных вант. Идентичность величины напряжения всех вант контролировалась прибором ИНА-6. Прочностные и деформативные характеристики испытанных образцов вант и моделей вантовых ферм при различных свойствах стали и схемах загрузки приведены в табл. 1.

Результаты проведенных испытаний образцов вант показали, что при растяжении разрывное усилие термически обработанной (отожженной) стали ниже, а деформативные характеристики больше, чем у термически необработанных образцов вант. При изгибе для термически обработанных образцов вант разрушающие усилия и деформации были больше по сравнению с термически необработанными образцами. Для испытанных моделей вантовых ферм, изготовленных из термически обработанных вант, разрушающие усилия и деформации также были больше по сравнению с моделями ферм, изготовленных из термически необработанных образцов. При статических испытаниях измерялись усилия в вантах, прогибы покрытия, горизонтальное перемещение и кручение центрального и наружного опорного контура.

Экспериментальные исследования начинались проверкой применимости в расчетах закона независимости действия сил.

В первом варианте исследования модели висячего покрытия загружалась 16 ступенями, из них 10 симметричных равномерно распределенных и 6 односторонних (загружалась половина пролета модели). Модели загружались полной нагрузкой 1,49 кН или 1,73 кН/м². Во втором варианте исследования полная нагрузка на модель висячего покрытия составила

2,76 кН или 3,19 кН/м²; В третьем варианте исследования модели полная нагрузка на висячее покрытие составила 2,99 кН или 3,46 кН/м². На завершающем, четвертом варианте исследований полная нагрузка на модель составила 3,69 кН или 4,27 кН/м².

Таблица 1

Механические и деформативные характеристики элементов и конструкций модели

Исследуемые конструкции, образцы	Вид испытания	Размер, мм	$\frac{P_u, \text{кН}}{\sigma_u, \text{МПа}}$	$\varepsilon_s, \%$
Образцы вант	Растяжение	295	$\frac{1,76}{560}$	0,978
Образцы вант термически обработанные	Растяжение	295	$\frac{1,63}{520}$	6,39
Образцы вант	Изгиб	295	$\frac{0,833}{265}$	0,88
Образцы вант термически обработанные	Изгиб	295	$\frac{0,96}{305}$	3,29
Наружное опорное кольцо	Растяжение	25×25×4×200	$\frac{8,8}{440}$	18
Центральное опорное кольцо	Растяжение	20×20×4×200	$\frac{7,09}{483}$	17
Фрагмент модели висячего покрытия (фермы двухпоясные)	Равномерно распределенная нагрузка	R=600 мм r=300 мм	$\frac{1,37}{218}$	0,42 2,5
Фрагмент модели висячего покрытия (фермы двухпоясные, ванты термически обработанные)	Равномерно распределенная нагрузка	R=600 мм r=300 мм	$\frac{2,32}{369}$	0,84 4,9
Фрагмент модели висячего покрытия (фермы двухпоясные)	Сосредоточенное нагружение центрального кольца	R=600 мм r=300 мм	$\frac{1,08}{172}$	0,42 2,5
Фрагмент модели висячего покрытия (фермы двухпоясные, ванты термически обработанные)	Сосредоточенное нагружение центрального кольца	R=600 мм r=300 мм	$\frac{1,37}{218}$	0,84 5,2

Испытание модели выполнялось на специальном стенде (рис. 2).

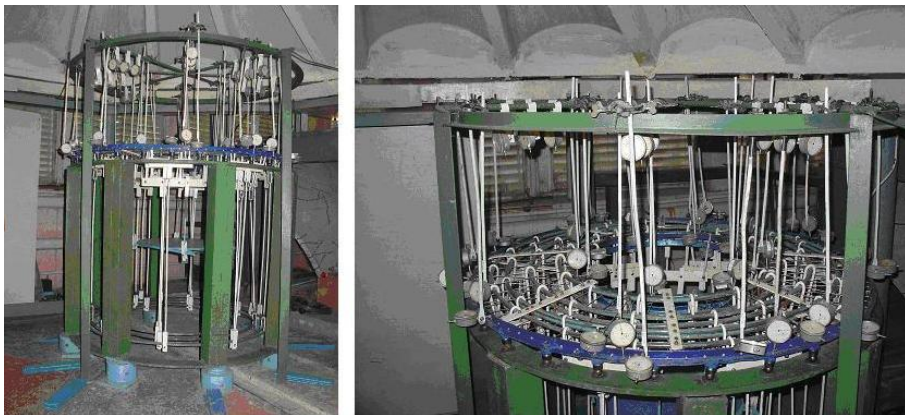


Рис. 2. Исследуемая модель покрытия на стенде в процессе испытания

Рассмотрим напряженно-деформированное состояние модели при действии равномерно-распределенной симметричной нагрузки. Здесь и далее начальная поверхность покрытия принята за плоскость. Модель покрытия загружалась равномерно-распределенной нагрузкой 1584 Н/м^2 ; 3169 Н/м^2 и 3664 Н/м^2 и полосовой нагрузкой $79,6 \text{ Н/м}$; $159,2 \text{ Н/м}$ и 183 Н/м . При таких загрузках наиболее деформативной зоной покрытия являлся кольцевой участок, расположенный на расстоянии примерно $1/5$ диаметра модели от наружного кольца. Максимальный прогиб вант верхнего пояса на 3 ступени загрузки (3664 Н/м^2 распределенной, 183 Н/м – полосовой) составил для прогибомера П9 – $5,61 \text{ мм}$, или $1/214$ пролета модели; для противоположного симметрично расположенного прогибомера П21 составил $4,79 \text{ мм}$, или $1/250$ пролета. Максимальный прогиб внутреннего опорного кольца для прогибомера П27 составил $3,23 \text{ мм}$ или $1/372$ пролета.

Здесь следует отметить, что максимальный прогиб вант на участках крепления к внутреннему кольцу значительно меньше по сравнению с максимальным прогибом вант (в $1,73$ раза). Это объясняется тем, что от деформации вант возникают вертикальные реактивные силы для внутреннего подвешенного к вантам опорного кольца, поскольку жесткость этого кольца на изгиб в сотни раз больше по сравнению с вантами исследуемой модели покрытия.

Наружное опорное кольцо от вертикальной реакции вант работало как кольцевая неразрезная балка, опорами которой являются колонны в натуральных конструкциях. Максимальные прогибы кольца выявлены в сере-

дине пролета между шарнирными опорами модели покрытия (между колоннами в натуральных конструкциях) и составили для прогибомера П67 – 0 мм, для прогибомера П68 – 0,1 мм. Здесь необходимо отметить, что наружное опорное кольцо в вертикальной плоскости работало как неразрезная конструкция, имеющая повышенную жесткость. В связи с этим прогибы в вертикальном направлении были минимальными.

Результаты экспериментального исследования модели висячего покрытия на равномерно распределенные нагрузки показали, что с увеличением нагрузки выявилась геометрическая нелинейность деформирования практических во всех вантах модели. Это явление также наблюдается для приконтурных участков внутреннего опорного кольца, хотя здесь все ванты этих участков работали практически в одинаковых условиях, и опорные кольца перемещались равномерно. После разгрузки прогибы вант полностью восстановились, остаточные перемещения не наблюдались, модель покрытия по-прежнему оставалась предварительно напряженной.

Подробный анализ результатов проведенных исследований при симметричных и односторонних статических нагружениях показал существенные положительные эффекты в круглых предварительно напряженных двухпоясных висячих системах по сравнению с другими видами конструктивных решений пространственных систем. Основываясь на экспериментально установленном законе о характере изменения сил взаимодействия в зависимости от распределения временной нагрузки, выполнено уточнение разработанной расчетной методики. Теоретические значения прогибов и распоров были близки к экспериментальным. Отклонения в наших исследованиях составили 6...14%.

С применением разработанной методики и алгоритма динамического расчета выполнено сравнение экспериментально исследованной модели предварительно напряженного круглого двухпоясного висячего покрытия. Оценена работа модели пролетом 1,2 м и натурной конструкции пролетом 120 м на стадиях предварительного натяжения и статического и динамического нагружения. С использованием результатов испытания модели висячего покрытия оценена работа натурной конструкции в различных стадиях работы на динамические воздействия.

Результаты испытания модели показали, что величины прогибов, полученных экспериментально, достаточно хорошо согласуются с теоретическими. Осредненные значения экспериментальных прогибов отличались от теоретических для верхнего пояса вант при симметричном нагружении не более чем на 6,9%, при одностороннем нагружении на 6,3%. Для нижнего пояса вант при симметричном нагружении не более чем на 7,2%, при одностороннем нагружении на 0,5%.

Для наружного кольца расхождение составило при симметричном нагружении не более 14,7%, для нижнего и верхнего пояса внутреннего

кольца не более 5,3%. При одностороннем загрузении для наружного кольца расхождение составило не более 5%, для верхнего и нижнего пояса внутреннего кольца не более 2,9%.

Аналогичным образом выполнен сравнительный анализ прогибов для натуральных конструкций висячих покрытий пролетом 120 м (табл. 2).

Таблица 2

Сравнение экспериментальных и расчетных данных

Исследуемые параметры	Ванты		Опорные кольцо		
	Нижний пояс	Верхний пояс	Наружные	Внутренние	
				Нижний пояс	Верхний пояс
При равномерно-распределенном загрузении					
Предварительное напряжение Р, кН	281	242	-2101 +1892	+2101	-1892
Усилия N, кН	<u>1010</u> 1049	<u>-989</u> -945,1	<u>±6854</u> ±7468	<u>7329</u> 7468	<u>-7240</u> -7468
Вертикальные перемещения W, мм	<u>728,5</u> 692	<u>1010</u> 841	<u>17,8</u> 23,3	<u>728,5</u> 692	<u>728,5</u> 692
Горизонтальные перемещения U, мм			<u>±57,8</u> ±60,7	<u>47,6</u> 50,8	<u>-56,2</u> -67,5
При одностороннем загрузении					
Усилия N, кН	<u>893</u>	<u>926</u>	<u>±7515</u>	<u>7025</u>	<u>-7025</u>
Усилия N, кН	1003	1127	±8430	8430	-8430
Вертикальные перемещения, W, мм	<u>542</u> 434	<u>473</u> 487	<u>100</u> 120	<u>481</u> 434	<u>481</u> 434
Горизонтальные перемещения U, мм	<u>35,1</u> 36,9	<u>35,1</u> 36,8	<u>20,0</u> 19,1	<u>44,7</u> 43,5	<u>-44,7</u> -46,5
Примечание: в числителе приведены экспериментальные, в знаменателе расчетные данные «←» сжатие, «+» растяжение.					

Результаты модельных испытаний переведены к натурным с помощью коэффициентов подобия. При симметричном и одностороннем загрузениях для нижних и верхних поясов вант, наружных и внутренних опорных колец опытные прогибы отличались от расчетных на 5,2...20%.

Расхождения между экспериментальными и теоретическими значениями горизонтальных перемещений в наружных и внутренних опорных кольцах при симметричном загрузении составили соответственно 6,7 и

20,1%. То же при одностороннем нагружении соответственно 2,7 и 4,7%.

Экспериментальные и теоретические значения продольных усилий при симметричном и одностороннем нагружениях для верхних и нижних поясах вант, в наружном и внутреннем опорных кольцах, приведены в табл. 2. Для натуральных конструкций экспериментальные и расчетные усилия, вычисленные с применением условия подобия при моделировании для верхних и нижних поясов вант составили соответственно –989 кН и 1010 кН, а их расчетные значения соответственно – 945,1 кН и 1049,1 кН. При этом расхождение усилия составило соответственно 4,6 и 3,9%.

В наружном кольце экспериментальное и расчетное значения для натуральных конструкций составили соответственно ± 6854 и ± 7468 кН, расхождение 8,2%. Во внутренних опорных кольцах экспериментальное и расчетное значения усилия составили соответственно: для верхнего пояса –7240 и –7468 кН, расхождение 3,1%, и для нижнего пояса 7329 и 7468 кН, расхождение 1,9%.

Анализ поведения исследованных натуральных конструкций при различных наиболее невыгодных схемах нагружения показал, что их можно рекомендовать для применения в качестве покрытий общественных зданий как одно из наиболее эффективных решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рекомендации по проектированию висячих конструкций. - М., 1974.
2. Шимановский В.Н. Висячие системы / Шимановский В.Н. – К.: Будівельник, 1984. - 208 с.
3. Раззаков С.Р. О проблеме сейсмостойкости большепролётных пространственных конструкций / Раззаков С.Р. // Промышленное и гражданское строительство в современных условиях. - М.: МГСУ, 2011. - С. 16-19.

Статья поступила в редакцию 12.02.2013 г.