

Теория расчета строительных конструкций

УДК 624.014.001.2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ ПОКРЫТИЯ ЛЕДОВОГО ДВОРЦА В г. ЧЕЛЯБИНСКЕ

В. Ф. Сабуров, Ю. А. Ивашенко, Н. Б. Козьмин, Н. В. Гусева

В статье приведены методика и результаты экспериментального исследования модели, изготовленной в масштабе 1:10 реальной конструкции покрытия ледового дворца.

Крытый ледовый дворец «Уральская молния» представляет собой одноэтажное здание длиной 198 м, пролетом 84 м с консолями по 4,3 м. Его несущая конструкция - поперечная рама, образованная двухветвевыми колоннами и ригелем в виде пологого криволинейного бруса (арки), подкрепленного шпренгелем ломаного очертания. Арка покрытия состоит из прямолинейных сегментов длиной 8,4 м, соединенных между собой фланцами на высокопрочных болтах. Пролет арки $L_H = 83,4$ м; радиус нейтральной линии $R_H = 206\ 700$ мм; стрела подъема арки $f = 4250$ мм. Общий вид конструкции покрытия с указанием сечения конструктивных элементов показан на рис. 1.

Данное конструктивное решение покрытий большепролетных зданий редко применяется в практике строительства. В России известны два объекта: покрытие малой спортивной арены в Лужниках пролетом 72 м [1]; покрытие Гостиного Двора с максимальным пролетом 80,74 м [2]. Из этого следует, что конструкция в виде пологой арки, подкрепленной ломаным шпренгелем, при всей простоте конструктивной формы является мало исследованной. Поскольку в технической литературе отсутствует методика расчета криволинейного бруса со шпренгелем как единой систе-

мы, а также не достаточно освещен вопрос о влиянии податливости болтовых соединений на прочность и устойчивость конструкции в целом, то для выявления действительной работы конструкции и оценки её пригодности к эксплуатации потребовалось провести экспериментальное исследование её модели.

Моделирование сечений арки и шпренгеля выполнено по методу приближенного геометрического подобия [3]. При моделировании принято, что коэффициент Пуассона и модуль упругости материала модели и натурной конструкции равны, перемещения модели и натуре идентичны, а относительные деформации в несущих элементах модели и натурной конструкции при упругой работе материала одинаковы. Фланцевые болтовые соединения при моделировании не учитывались. Масштаб геометрического подобия принят равным $m = 0,1$.

Таким образом, в соответствии с предпосылками, имеем индикаторы подобия:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon_M}{\varepsilon_H} = 1; \quad \mu_r = \frac{\mu_M}{\mu_H} = 1; \quad E_r = \frac{E_M}{E_H} = 1.$$

Для определения относительной деформации ε_H выполнен расчет поперечного сечения арки натурной конструкции. Из условия прочности сечения

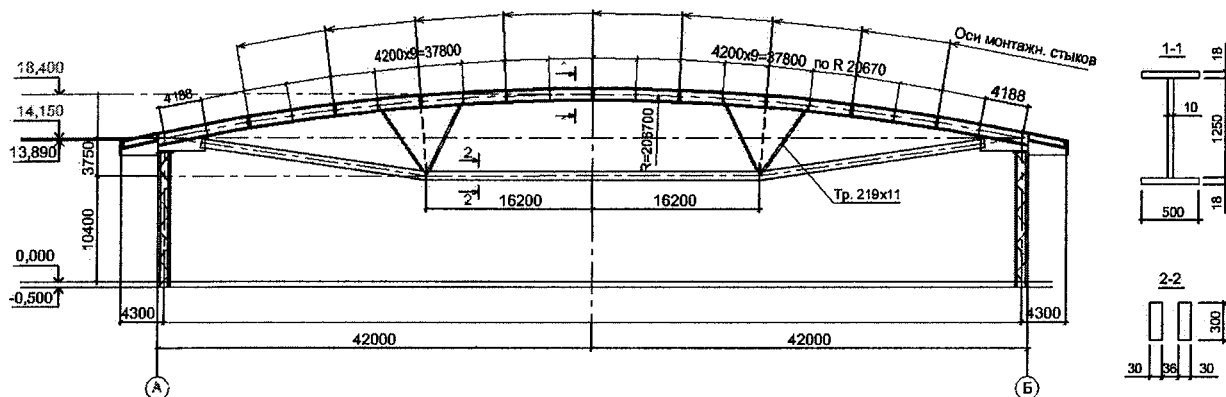


Рис. 1. Схема поперечной рамы крытого ледового дворца

арки, устойчивости дуги арки между V-образными раскосами, а также из условия прочности шпренгеля относительные деформации составили $\varepsilon_n = 0,0012$. С учетом разницы расчетных сопротивлений материалов природы и модели равенство относительных деформаций имеет вид:

$$\varepsilon_n R_{ум} = \varepsilon_m R_{ун},$$

и, следовательно,

$$\sigma_m = \varepsilon_m E = \frac{\varepsilon_n R_{ум}}{R_{ун}} E.$$

Из расчета модели покрытия при узловой нагрузке на арку 100 кг наибольшее усилие в шпренгеле составило $N_m = 2512$ кг, наибольшее усилие в арке $N = -2561$ кг, $M = 57$ кгм. Требуемая площадь поперечного сечения шпренгеля составила

$$A_m = \frac{N_m R_{ун}}{\varepsilon_n R_{ум} E} = \frac{2512 \cdot 3050}{0,0012 \cdot 2,1 \cdot 10^6 \cdot 2450} = 1,24 \text{ см}^2.$$

По конструктивным соображениям площадь поперечного сечения шпренгеля принята равной 4 см^2 (полоса $8 \times 0,5$ см). При данной площади сечения шпренгеля для равенства деформаций нагрузка на узел должна составлять 320 кг, а усилие в шпренгеле при этом равно $N_m = 8$ т. Относительная деформация шпренгеля

$$\varepsilon_m = 8000 / 2,1 \cdot 10^6 \cdot 4 = 0,001.$$

При узловой нагрузке $P = 320$ кг усилия в арке составили

$N_m = -2,561 \cdot 3,2 = -8,2$ т, $M_m = 0,057 \cdot 3,2 = 0,184$ тм, где $3,2 = 4/1,24$ – отношение фактической площади шпренгеля к требуемой при $P = 100$ кг. Исходя из данных усилий подобрано сечение арки в виде двутавра с толщиной полок 3 мм (рис. 2). Из условия местной устойчивости сжатого свеса полки определена ширина пояса, равная 60 мм. Момент инерции сечения $J_x = 108 \text{ см}^4$, момент сопротивления $W_x = 20,4 \text{ см}^3$, площадь сечения $A_m = 5,1 \text{ см}^2$.

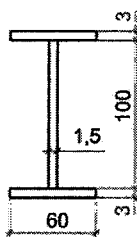


Рис. 2. Сечение модели арки

Напряжение

$$\sigma_m = \frac{N_m}{A_m} + \frac{M_m}{W_x} = \frac{8200}{5,1} + \frac{18400}{20,4} = 1608 + 902 = 2510 \text{ кг/см}^2,$$

откуда $\varepsilon_m = 0,0012 = \varepsilon_n$.

Сечение V-образных раскосов принято из труб 22×2 мм.

Таким образом, модель конструкции покрытия разработана с соблюдением следующих принципов: основные габаритные размеры (длина, высота, стрела подъема арки) геометрически подобны в масштабе 1:10 натурной конструкции; сечения арки и шпренгеля назначены из условия равенства относительных деформаций модели и натурной конструкции.

Изготовлены две модели арки, сегменты которых длиной 840 мм соединены на фланцах болтами диаметром 10 мм класса прочности 5.8, поставленными в отверстия такого же размера. Каждая арка соединена со шпренгелем телескопическими раскосами с резьбовыми упорами, позволяющими менять их длину. Для обеспечения устойчивости арок из плоскости собран и испытан блок из двух арок, соединенных прогонами, горизонтальными связями по верхним поясам и вертикальными – в зоне установки раскосов (как в реальной конструкции).

Предварительно для оценки общей жесткости конструкции было произведено смещение кривого бруса относительно шпренгеля с помощью телескопических соединений раскосов; при этом измеряли продольную деформацию верхней полки арки в зоне сплошного сечения и в зоне фланца (рис. 3). Измерение деформаций проводили с помощью тензометров Аистова с базой 50 мм. Получены следующие значения приращений деформаций (усредненные по результатам нескольких испытаний): по показаниям Т-1 $\Delta \varepsilon = 18$, по показаниям Т-2 $\Delta \varepsilon = 2$. Расстояние между тензометрами Т-1 и Т-2 составляет 100 мм.

Для изгибаемых элементов угол поворота сечения

$$\theta = M/B,$$

где M – изгибающий момент, B – погонная изгибная жесткость.

В месте расположения тензометров Т-1 и Т-2 принимаем, что $M = \text{const}$, и тогда отношение жест-

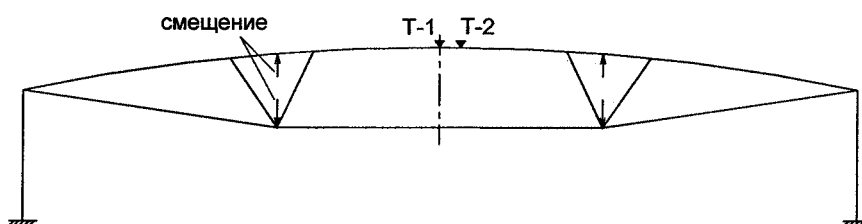


Рис. 3. Схема размещения приборов при создании смещения арки и шпренгеля

костей сплошного сечения и фланцевого соединения равно

$$B_c/B_\phi = \theta_\phi/\theta_c.$$

Анализ деформативности системы кривой брус-шпренгель показал, что угол поворота для сплошного сечения составил (рис. 4, а):

$$\theta_c \cong \text{tg} \theta_c = \frac{\Delta c}{2 \cdot 0,5h} = \frac{2}{2 \cdot 0,5 \cdot 106} = 0,019,$$

а для фланцевого соединения при условии, что поворот происходит по оси нижнего болта (рис. 4, б), равен

$$\theta_\phi \cong \text{tg} \theta_\phi = 18/(2 \cdot 78) = 0,115.$$

Отношение

$$B_c/B_\phi = 0,115/0,019 = 6,05,$$

следовательно, жесткость фланцевого соединения в коньке в 6 раз меньше, чем целого сечения.

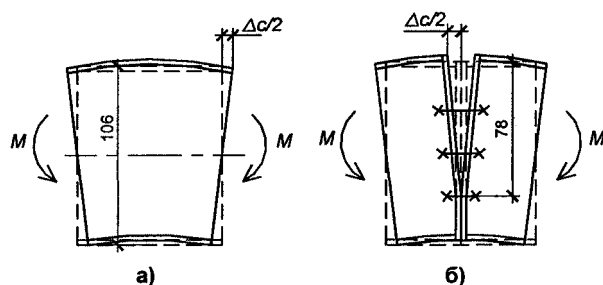


Рис. 4. Поворот сечения при изгибе: а – сплошного сечения; б – болтового соединения

В программе «Лира-9.2» выполнен расчет модели покрытия на симметричную и несимметричную вертикальную нагрузки. На рис. 5 показана схема нагружения конструкции равномерной нагрузкой, приведены эпюры продольных сил и изгибающих моментов. В таблице даны значения внутренних усилий для натурной конструкции и для модели при расчетных равномерных нагрузках. В соответствии с данными эпюрами выполнена расстановка приборов в сечениях модели, где возникают наибольшие внутренние усилия (рис. 7).

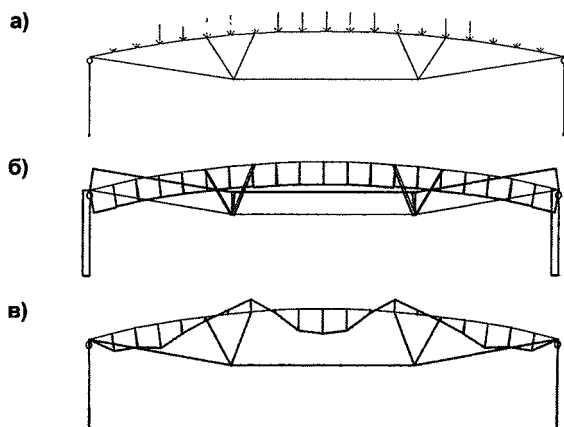


Рис. 5. Нагружение симметричной нагрузкой: а – схема нагружения; б – эпюра продольных сил; в – эпюра изгибающих моментов

Таблица

| Зона | Натурная конструкция | | Модель | |
|-------------|----------------------|--------|--------|-------|
| | N, т | M, тм | N, т | M, тм |
| Сеч. 1; 7 | -474,7 | 60,95 | -7,37 | 0,19 |
| Сеч. 2; 6 | -474,7 | 14,26 | -7,30 | 0,05 |
| Сеч. 3; 5 | -488,2 | -41,54 | -7,45 | -0,07 |
| Сеч. 4; 4* | -486,8 | 48,40 | -7,42 | 0,17 |
| Сеч. 8; 11 | -21,2 | – | -0,39 | – |
| Сеч. 9; 10 | -54,1 | – | -0,83 | – |
| Сеч. 12; 14 | 480,6 | – | 7,35 | – |
| Сеч. 13 | 488,6 | – | 7,41 | – |

Примечание. Расположение сечений с приборами показано на рис. 7, а.

Для проведения эксперимента была разработана оснастка (рис. 6), которая позволила произвести нагружение, соответствующее нагружению натурной конструкции.

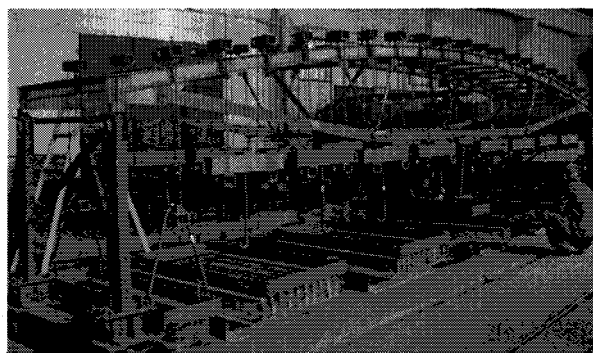


Рис. 6. Блок арок с оснасткой при испытании

Перемещения кривого бруса измерялись прогибомерами на базе индикатора часового типа с ценой деления 0,1 мм (рис. 7, б), а деформации – тензодатчиками Аистова с базой 50 мм и проволочными тензорезисторами с базой 20 мм (рис. 7, в, г). Регистрация показаний тензодатчиков осуществлялась тензометрическим комплексом СИИТ-3.

Вертикальная нагрузка прикладывалась по кривому брусу в 19 сечениях в местах расположения прогонов. Нагрузка создавалась путем укладки гирь средним весом 20,44 кг на платформы и через распределительные элементы передавалась в узлы. Для центровки в местах передачи нагрузки на кривой брус были установлены шаровые опоры (рис. 7, б, г).

Загружение конструкции производилось в 12 этапов: на первых 9 этапах создавалось симметричное нагружение равномерной нагрузкой с приращением нагрузки в узел арки на 30 кг, на 10, 11, 12-м этапах – несимметричное нагружение. Разрушение модели произошло на 12-м этапе.

Для анализа результатов испытаний рассмотрены следующие сечения: на арке – сечение 2 и 3 в зоне узлов примыкания раскосов к арке, сечение 4а в коньковом узле, где возникают максимальные перемещения арки, сечение 7 в опорной зоне арки

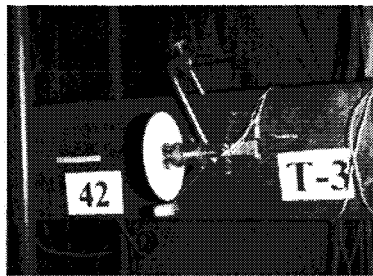
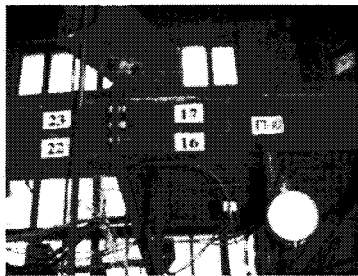
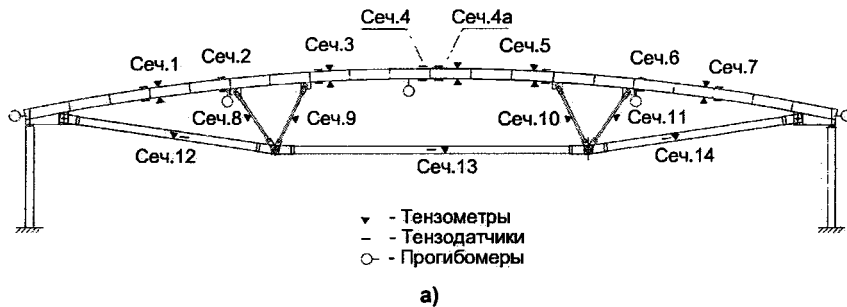


Рис. 7. Расстановка измерительных приборов: а - схема; б - тензодатчики и прогибомер на арке; в - тензодатчики и тензометр на шпренгеле; г - тензодатчики и тензометр на арке

с наибольшим положительным моментом; на шпренгеле - сечение 13; на раскосах - сечение 11. Для этих сечений построены зависимости на-

пряжений от нагрузки. В качестве примера на рис. 8 приведены зависимости для некоторых из перечисленных сечений. Из этих зависимостей видно

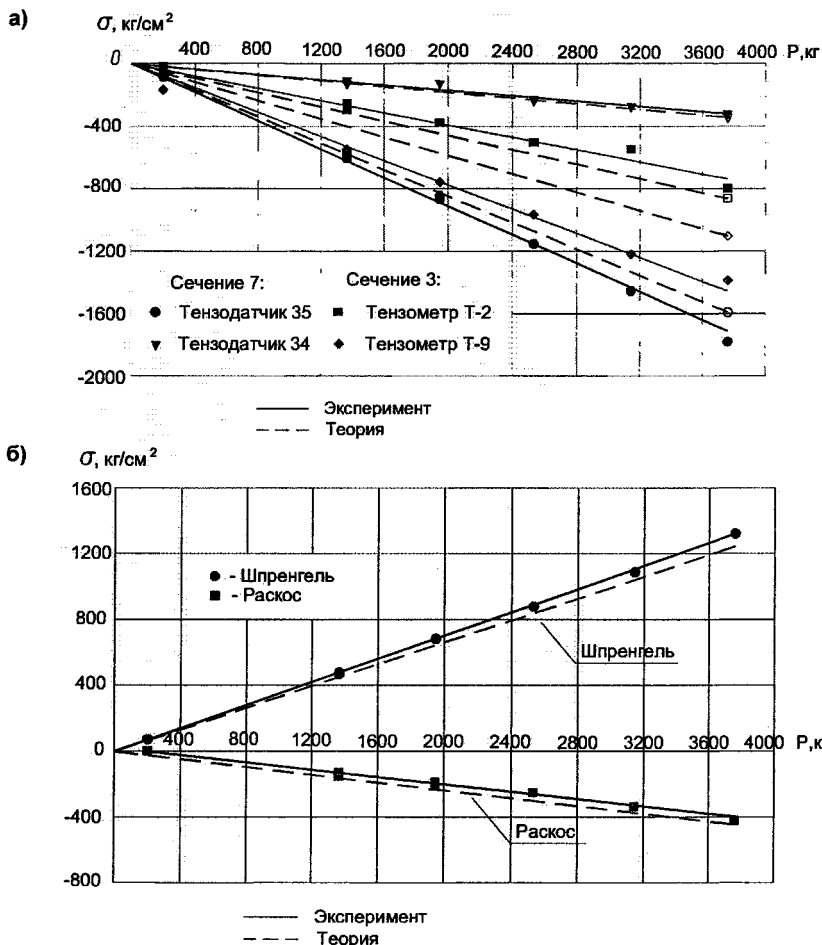


Рис. 8. Зависимости напряжений от нагрузки: а - для сечений на арке; б - для сечений на шпренгеле и раскосах

(рис. 8, а), что на всех этапах нагружения рост напряжений в сечениях арки происходит пропорционально увеличению нагрузки, что свидетельствует об упругой работе модели. Однако для отдельных сечений наблюдается увеличение напряжений по сравнению с теоретическими, причем разница между теорией и экспериментом растет с каждым этапом нагружения и составляет от 3-10 % на начальных этапах до 7-48 % на 9-м этапе. В элементах, испытывающих осевые усилия (шпренгель и раскосы) и не имеющих фланцевых соединений, расхождение между экспериментом и теорией незначительно и составляет не более 5 % (рис. 8, б). Это свидетельствует о влиянии податливости флан-

цевого соединения модели на ее напряженное состояние.

На рис. 9 приведены эпюры напряжений по сечениям арки при наибольшей симметричной нагрузке (9 этап) и при нагружении несимметричной нагрузкой (12 этап). Здесь же даны конструктивные поправки, равные отношению экспериментальных напряжений к теоретическим. Видно, что наблюдается непропорциональное увеличение напряжений в кривом брус. Особенно сильная непропорциональность проявилась в зонах примыкания раскосов в сечениях 2 и 3 на 12-м этапе нагружения.

На рис. 10 представлена зависимость перемещений сечений 2 и 4 от симметричной нагрузки.

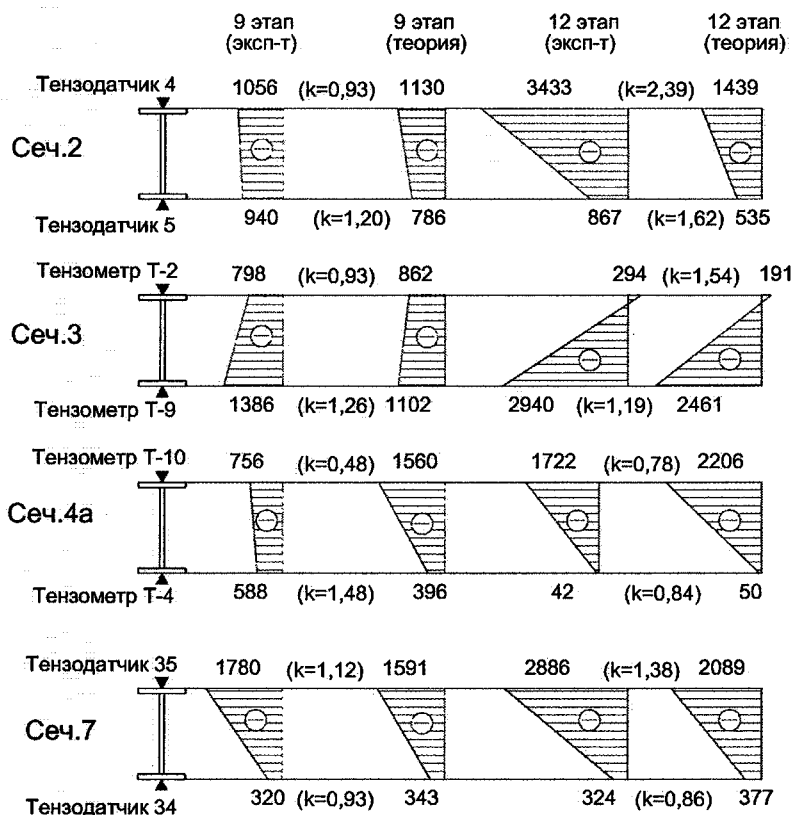


Рис. 9. Эпюры напряжений по сечениям арки, кг/см

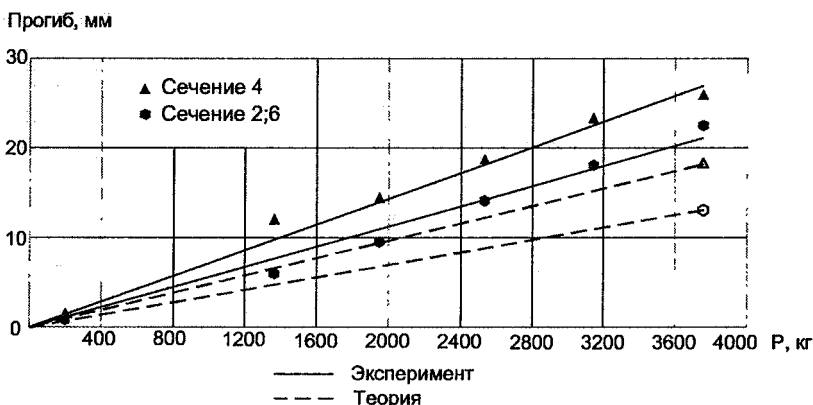


Рис. 10. Зависимости перемещений арки от нагрузки

Из рисунка видно, что экспериментальные прогибы арки превышают теоретическое значение от 11 % на начальном этапе до 72 % на последнем этапе приложения равномерной нагрузки. Это расхождение может быть вызвано податливостью фланцевых соединений сегментов арки.

По результатам эксперимента можно сделать вывод о снижении жесткости кривого бруса модели при действии вертикальной нагрузки из-за наличия фланцевых соединений его сегментов.

Литература

1. Дыховичный, Ю.А. *Большепролетные конструкции сооружений Олимпиады-80 в Москве / Ю.А. Дыховичный. -М.: Стройиздат, 1982.*
2. Еремеев, П.Г. *Большепролетное светопрозрачное покрытие Гостиного Двора в Москве / П.Г. Еремеев, Н.В. Канчели // Архитектура и строительство Москвы. - 1999. -№ 3.-С. 32-37.*
3. Веников, В.А. *Теория подобия и моделирования/ В.А. Веников. -М.: Высш. шк., 1976.*