

УДК 624.014.271(476.7)

Вячеслав Игнатьевич Драган,
кандидат технических наук,
профессор, первый проректор
Брестского государственного
технического университета (БГТУ)

Андрей Брониславович Шурин,
ассистент кафедры
строительных конструкций
Брестского государственного
технического университета (БГТУ)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ БОЛЬШЕПРОЛЕТНОГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ ЗДАНИЯ УНИВЕРСАЛЬНОГО СПОРТИВНОГО КОМПЛЕКСА В Г. БРЕСТЕ

**EXPERIMENTAL STUDY
OF THE BEARING CAPACITY
OF THE LARGE-SPAN
METAL COVERING FOR
THE UNIVERSAL SPORTS
COMPLEX IN BREST**

Приведены результаты экспериментального исследования работы металлических арок и структурной плиты покрытия универсального спортивного комплекса в г. Бресте. Дано описание металлических конструкций покрытия и выводы об их действительном напряженно-деформированном состоянии.

The experimental results of the behaviour of the metal arches and structural slab of the covering for the universal sports complex in Brest are presented. The descriptions of the metal covering constructions are given and the conclusions of their actual stress-strain condition are made.

ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальное исследование работы большепролетного металлического покрытия здания универсального спортивного комплекса является задачей первоочередной важности с точки зрения изучения действительной работы этой сложной строительной системы, обеспечения его безопасной и безотказной работы на все возможные нагрузки и воздействия, а также позволяет проводить дальнейшее совершенствование конструктивных форм сооружений подобного типа.

Испытания металлических конструкций покрытия позволило доказать отсутствие каких-либо ошибок при проектировании, изготовлении и строительстве, убедительно показало абсолютную надежность всех конструкций покрытия; полностью исключили вероятность аварии здания техногенного характера или от природных катаклизмов.

КОНСТРУКЦИИ ПОКРЫТИЯ И ЕГО ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ

Покрытие здания универсального спортивного комплекса может претендовать на уникальное по размерам перекрываемого внутреннего пространства, по принимаемым несущим конструкциям, состоящим из двух арок и металлической структурной плиты, по обеспечению совместной работы всех конструкций покрытия, по возможности регулирования усилий и деформаций покрытия в процессе монтажа и эксплуатации здания.

Покрытие главной спортивной арены г. Бреста площадью более 5 тыс. м² запроектировано в виде квадратной ломаной по диагонали структурной плиты, образующей две треугольные плиты с размерами 66х66х93 м, соединенные в коньке и создающие два ската с уклонами 15°. Структурная плита поддерживается в средней части двумя металлическими арками, каждая пролетом 80,62 м, и опирается по контуру на сталежелезобетонные колонны с шагом 6 м и четыре диафрагмы жесткости. По верхним узлам структурной плиты покрытия установлены прогоны из швеллеров, на которые уложены профилированный настил и элементы кровли (рис. 1).



Рис. 1. Фасад здания универсального спортивного комплекса в г. Бресте

Основными несущими конструкциями покрытия являются две металлические арки пролетом 80,62 м, установленные вдоль диагонали покрытия на расстоянии 11,2 м друг от друга, соединенные связевыми фермами и преднапряженными крестовыми связями для обеспечения их пространственной устойчивости.

Каждая арка — это стержневая система из круглых труб, состоящая из двух типов опорочных марок: опорных (верхний пояс из трубы сечением 325x14 мм, нижний пояс из трубы сечением 426x14 мм, раскосы из труб сечением 140x6 мм) и промежуточных (верхний и нижний пояса из труб сечением 426x14 мм с раскосами из труб 140x6 мм). Соединения стержней опорочных марок сварные, между собой опорочные марки сопрягаются при помощи фланцевых соединений на высокопрочных болтах из стали марки 40Х "Селект" диаметром 24 мм. В арочную конструкцию включена затяжка (труба 325x14 мм) и 8 подвесок (труба 127x6 мм). Во всех подвесках установлены фаркопы, позволяющие производить натяжение затяжки, создавать предварительный выгиб вверх, тем самым уменьшая прогиб опирающейся на нее структуры (рис. 2).

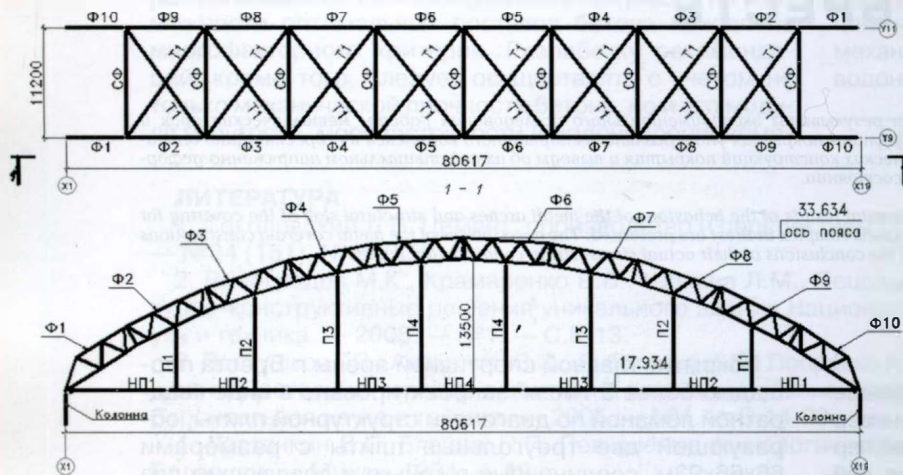


Рис. 2. Конструктивная схема арок покрытия

Опорный узел арки передает реакцию на опору колонны через три цилиндрических катка диаметром 120 мм, изготовленные из стали 35ГС. Такая опорная конструкция исключает передачу распорных усилий арки на колонны от нагрузки и изменения температуры арок.

Структурная плита опирается узлами нижнего пояса на затяжку арок с шагом 4,24 м. Узлы сопряжения узлов структуры с затяжкой жесткие, выполнены сваркой.

Структурная плита изготовлена из трубчатых стержневых элементов, соединенных в узлах, разработанных в ОАО "Брестпроект", и представляют собой конструкцию, образованную из системы перекрестных ферм. Количество перекрывающихся в одном узле ферм в данном случае равно двум, фермы образуют многократно повторяющийся объемный элемент — кристалл в виде четырехгранной пирамиды. При длине стержня 3,0 м высота пирамиды в осях составляет 2,12 м. Стержни изготовлены из круглых труб сечением для растянутых элементов 50x3,5 мм, 60x4 мм,

63,5x4 мм, для сжатых элементов — 89x4 мм, 114x4 мм, 146x5 мм. К концам труб привариваются фасонки с отверстиями под болты для их сопряжения в узлах (рис. 3).

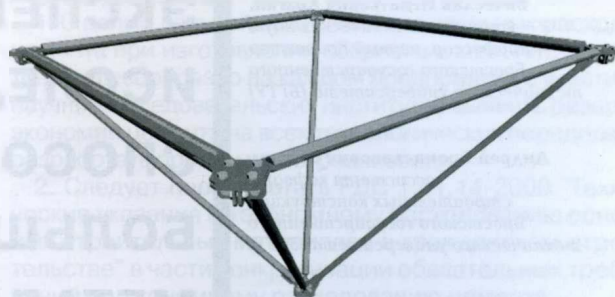


Рис. 3. Вид кристалла структуры покрытия

Узловой элемент запроектирован по принципу двухсрезного болтового соединения и состоит из четырех уголков, приваренных к плите. Расстояние между уголками равняется толщине фасонки раскоса, соединение стержней поясов обеспечивается применением узловых накладок с отверстиями. Несущая способность узла определяется по прочности на срез болтов или на смятие болтовых соединений узлов. Сварные соединения узлов при этом всегда имеют значительный запас прочности. Несущая способность большинства узлов обеспечивается применением одного болта класса прочности 8.8 диаметром 24 мм, при применении для деталей узла стали С345. Наиболее нагруженные узлы структуры в зоне диафрагм жесткости запроектированы с двумя болтами класса прочности 8.8 диаметром 30 мм для крепления стержней структуры.

Особенностью покрытия здания является обеспечение конструкции совместной работы арок и структурной плиты. Эта совместность обеспечивается тем, что затяжки арок являются одновременно нижним поясом структуры и тем самым увеличивают изгибную жесткость структуры вдоль диагонали квадрата. Структурная плита жестко связана с затяжкой и с опорными узлами арок и включается в работу на восприятие распора арок. Предварительный выгиб затяжки при помощи фаркопов подвесок с максимальной величиной 60 мм посередине исключил влияние податливости узловых соединений структуры на вертикальные перемещения и уменьшил прогиб покрытия.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ПОКРЫТИЯ

Натурные испытания покрытия здания представляют собой комплекс экспериментально-теоретических исследований, включающих оценку прочности и деформативности как отдельных узлов и элементов, так и всей конструкции здания.

Отдельные наиболее нагруженные и ответственные узлы испытывались на стадии изготовления конструкций, а все покрытие — после завершения монтажа профилированного настила.

Проведены лабораторные исследования действительной работы следующих узлов и деталей арки:

- узлы крепления подвески к нижнему поясу арки и к затяжкам;
- монтажные и заводские стыки затяжки;
- фаркопы подвесок;
- фаркопы связей.

Для проведения лабораторных испытаний одновременно с изготовлением на заводе арок изготавливались узлы в натуральную величину из того же самого сортамента, той же стали и сварочных материалов. Работу выполняли те же сварщики, которые выполняли сборку и сварку отправочных марок арок. Все заводские и монтажные сварные стыки прошли физический контроль качества сварки.

Испытание крепления подвески к нижнему поясу арки и затяжки проводилось на узлах, представляющих крестообразную конструкцию, составленную из круглых труб с заглушками и траверсами для приложения нагрузки (рис. 4). Нагружение узлов производилось в два этапа: на испытательной машине УММ-100 с приложением нагрузки 1000 кН и построением диаграммы деформирования в координатах нагрузка-удлинение, на испытательном стенде с нагружением домкратами до разрушения узлов.



Рис. 4. Испытание узла крепления подвески к затяжке

Испытание узлов заводских и монтажных стыков затяжек арок производилось на испытательном стенде нагружением до 4000 кН.

Натурные испытания покрытия производились нагрузками, которые включали собственный вес смонтированных конструкций и испытательную нагрузку. К ним относится собственный вес арок и связей по аркам, вес структурной плиты, вес прогонов и профилированного настила, вес технологического оборудования, испытательная нагрузка.

Испытательная нагрузка назначалась по нормативным значениям веса утеплителя, пароизоляции, гидроизоляционного ковра, снеговой нагрузки для снегового района 1Б величиной $S_0=80 \text{ кг/м}^2$ в соответствии с [2].



Рис. 5. Общий вид покрытия с испытательной нагрузкой

Испытательная нагрузка на покрытие составила $95,5 \text{ кг/м}^2$, испытательная нагрузка на фонарь покрытия — $54,4 \text{ кг/м}^2$. В зоне действия монтажных кранов нагружение осуществлялось бетонными блоками в соответствии со схемой нагружения, которые укладывались на настил из досок, установленный на профилированный настил покрытия. На участках структуры, не доступных для монтажных кранов, нагружение осуществлялось пакетами кровельного материала, укладываемого на настил из досок. Испытательная нагрузка располагалась на покрытии таким образом, чтобы узлы структуры нагружались силой 895,9 кг (рис. 5).

Загружение конструкции фонаря производилось по сплошному деревянному настилу пакетами утеплителя, создавая равномерно распределенную нагрузку $54,4 \text{ кг/м}^2$. Суммарная испытательная нагрузка на покрытие составила 389,15 т.

Испытательная нагрузка прикладывалась в пролетной части покрытия. Консоли структуры загружались только ее собственным весом, прогонами и профилированным настилом. Такое нагружение является наиболее невыгодным для структурной плиты и арок, так как уменьшается разгружающий эффект от нагрузок на консольных свесах покрытия.

Измерение перемещений узлов арок и структурной плиты, а также усилий в отдельных стержнях этих конструкций осуществлялось как на этапе их возведения, так и при нагружении испытательной нагрузкой.

Измерение деформаций арок и структурной плиты покрытия производили с использованием электронного тахеометра ЗТa5P, версия 02 ТУ 4433-009-07439541-97, который позволял измерить перемещения с точностью $\pm 5 \text{ мм}$ и углы поворота с точностью 5".

Для измерения перемещений на узлы нижнего пояса арки устанавливались марки. Геодезические измерения арок производили в несколько этапов: после монтажа арок до их снятия с временных опор, после снятия арок с временных опор и включения затяжки в работу натяжением фаркопов, после монтажа структурной плиты покрытия, после загрузки структурной плиты покрытия статической нагрузкой.

Определение перемещений структурной плиты выполнилось при помощи нивелирования поверхности покрытия по профилированному настилу при помощи электронного тахеометра ЗТa5P до и после приложения испытательных нагрузок.

Для определения усилий в элементах арок и структурной плиты покрытия применялись механические тензометры с использованием индикаторов часового типа с ценой деления 1 мкм. Тензометры устанавливали на подвесках арок, на затяжках, на нижнем поясе арок, на стержнях структуры (рис. 6). Определение усилий производилось по формуле

$$N = \frac{\Delta l}{l} \cdot A \cdot E \quad (1)$$

где Δl — абсолютная продольная деформация, измеренная тензометром;
 l — база тензометра;
 E — модуль упругости стали (принимался $2,06 \cdot 10^5$ МПа);
 A — площадь поперечного сечения стержня.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ БОЛЬШЕПРОЛЕТНОГО ПОКРЫТИЯ СПОРТИВНОГО КОМПЛЕКСА

При разработке проекта покрытия, изготовления конструкций и строительстве особое внимание уделялось обеспечению его абсолютной надежности. Для этого на всех стадиях проводилось большое научное сопровождение этой уникальной разработки.

Статические расчеты арок и структурной плиты покрытия выполнены с использованием метода конечных элементов при помощи программного комплекса "Lira Windows", версия 9.2. Контрольные расчеты проводились при помощи программного комплекса "SCAD". На различных этапах расчета анализировались несколько расчетных схем. На заключительном этапе рассматривалась конечноэлементная модель, в которой учитывалась совместная работа структурной плиты покрытия, арок и связевых конструкций, колонн и диафрагм жесткости.

Элементы структурной плиты моделировались конечными элементами пространственных ферм с тремя степенями свободы в узлах, что позволило учесть их шарнирное сопряжение. Расчеты с применением элементов с жестким сопряжением в узлах показали меньшие продольные усилия в них и большую жесткость покрытия в целом. Элементы арок, колонн моделировались универсальными пространственными конечными элементами с шестью степенями свободы в узлах. Диафрагмы жесткости моделировались универсальными четырех- и трехузловыми элементами оболочек с шестью степенями свободы в узлах. Катковые опоры арок моделировались связями конечной жесткости.

Граничные условия представлены закреплением от смещений и поворотов нижних узлов колонн и диафрагм. Сечения и жесткости элементов корректировались

в соответствии с принятым по прочностным расчетам на каждом этапе (рис. 7).

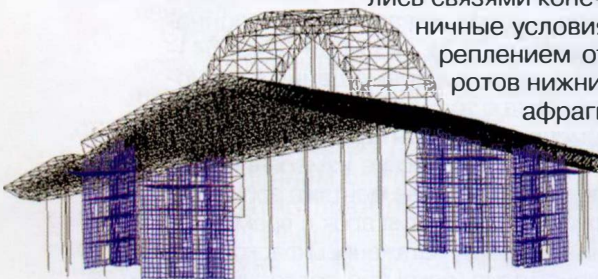


Рис. 7. Расчетная схема конструкции покрытия



а



б



в

Рис. 6. Измерение усилий в подвесках (а), в нижнем поясе арки (б) и стержне структуры (в)

Величина расчетных значений усилий от проектных нагрузок и воздействий в арке составила для нижнего пояса в крайней отправочной марке 1046,59 кН, для верхнего пояса в средней части арки — 1026 кН (несущая способность стержней 3314,5 кН). Для наиболее нагруженных раскосов расчетное усилие 142,7 кН (несущая способность составляет 569,2 кН). Подвески закреплены по концам шарнирно и работают на растяжение с усилием 107,72 кН (несущая способность — 569,2 кН). Усилие в затяжке арки имеет значение 910,78 кН (несущая способность — 3076,2 кН).

Сварные узлы арок выполнены безраскосными и имеют 5-кратный запас несущей способности.

Максимальные напряжения в сварных швах фланцевых соединений отправочных марок равняются 123,2 МПа, при расчетном сопротивлении стали шва 215 МПа. Несущая способность сварных швов соединения подвесок с затяжками и узлами нижних поясов арок составляет 631,9 кН, при расчетном значении усилия в подвеске — 107,7 кН.

При рассмотрении структурной плиты нужно отметить, что максимальные сжимающие напряжения возникают в стержнях нижнего пояса величиной 255,3 кН в элементах, опирающихся на диафрагмы жесткости. В направлении, параллельном контуру, продольные усилия в стержнях нижнего пояса заметно меньше, чем в перпендикулярном направлении, и изменяются от 47,9 кН в центре структуры на затяжке арки до 114,2 кН на диафрагмах жесткости. Диафрагмы жесткости воспринимают распор и стержни, перпендикулярные им, нагружены больше, чем другие. Эпюры усилий верхнего пояса повторяют эпюры нижнего пояса с изменением знака на противоположный.

В раскосах усилия в зонах диафрагм достигают 350 кН, эти усилия, в основном, сжимающие. В остальных раскосах структуры усилия остаются сравнительно малыми. Запас несущей способности для сжатых стержней структуры составляет не менее 30%, для растянутых — не менее 29%. Запас несущей способности узлов по расчетам на срез и смятие болтовых соединений составил не менее 39%.

Максимальный расчетный прогиб структуры в коньке покрытия составил 70,8 мм, что значительно меньше допустимого по [3] и равного 297,0 мм.

Лабораторные испытания узлов подтвердили безотказную работу наиболее нагруженных элементов и наличие значительного дополнительного запаса их несущей способности, если сравнивать расчетные допустимые усилия и разрушающие их нагрузки.

Стыки узлов подвесок с затяжками показали упругую работу стали при приложении растягивающего усилия до 800 кН, при расчетном усилии в подвесках 109,9 кН. Разрушающие усилия в партии из трех испытанных узлов колебались в пределах от 1161 кН до 1322 кН (рис.8а). Разрушение всех узлов произошло в результате образования трещины в околосшовной зоне сварного стыка труб подвесок и затяжки (рис.8б).

Монтажные и заводские соединения затяжек выполнены встык со скосом одной кромки на цилиндрической подкладке по типу С10 по ГОСТ 16037-80. Испытания трех узлов стыков затяжки на стенде показали упругую работу стали в пределах нагружения до 4000 кН. Дальнейшее нагружение и доведение до разрушения узлов не производилось из-за недостаточной мощности испытательного стенда. Превыше-

ние испытательной нагрузки над расчетным усилием составило 4 раза.

Все заводские и монтажные стыки затяжек были подвергнуты физическому контролю и отвечают требуемому качеству. Кроме того, учитывая особую ответственность этого узла арки, было запроектировано его усиление двумя симметричными накладками из труб, способными воспринимать расчетное усилие в затяжке. Измерение деформаций и усилий в арках проводилось в течение всего периода возведения конструкций покрытия. Первое измерение было выполнено после завершения укрупнительной сборки арок, установки связей, включения в работу затяжки путем натяжения фаркопов в подвесках. Седьмое измерение было выполнено перед началом испытаний, восьмое измерение — после приложения испытательной нагрузки. Измеренные усилия и деформации арок соответствуют приложению полной нормативной нагрузки.

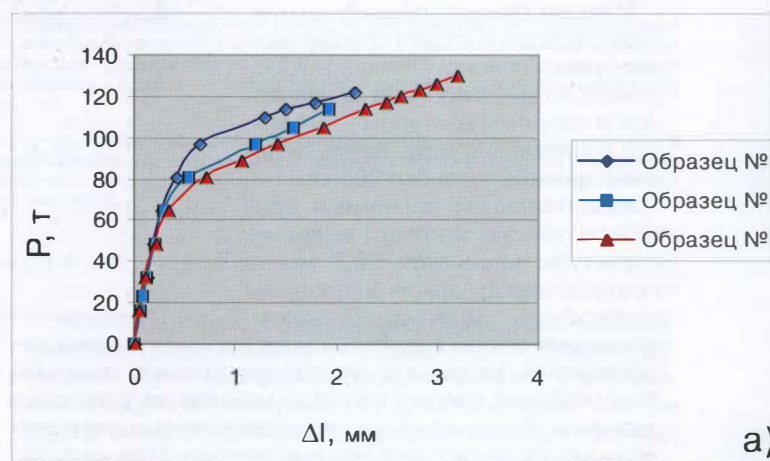


Рис. 8. Диаграммы деформирования узлов крепления подвесок к затяжкам арок (а) и характер их разрушения при растяжении узла (б).

Максимальные значения вертикальных перемещений верхних узлов арок составили для арки по оси Y11 68 мм, для арки по оси Y9 — 50 мм. Максимальное расчетное значение вертикальных перемещений арок составляет 69,3 мм.

Усилие в затяжках составило 1005,1 кН, величина достигнутых напряжений равняется 73,52 МПа. Наибольшее сжимающее усилие в поясах арок составило 921 кН, что соответствует достигнутому напряжению 51,7 МПа. Величина достигнутых напряжений в элементах арок составляет 23-33% от расчетного сопротивления труб из стали 20, равного 255 МПа.

Максимальный прогиб структурной плиты от испытательной нагрузки по коньку покрытия составил 45 мм, в пролете между аркой и опорным контуром — 64 мм, что значительно меньше предельного прогиба, равного 300 мм.

Максимальный расчетный прогиб от той же нагрузки в коньке структуры равняется 58,7 мм, в пролете между аркой и опорным контуром — 58,8 мм. В целом, сравнивая эпюры расчетных и экспериментальных перемещений, видно, что экспериментальные величины перемещений узлов структуры меньше их расчетных значений. Различие между экспериментальными и расчетными данными колеблется в пределах 50% (рис. 9).

Измеренные усилия в наиболее нагруженных стержнях структуры от полной нормативной нагрузки для растянутых стержней верхнего пояса равняются 264,3 кН, что соответствует напряжению величиной 43,6 МПа, для сжатых стержней нижнего пояса — 148,6 кН, что соответствует напряжению 80,5 МПа, для сжатых раскосов — 203,6 кН, что соответствует напряжению 37,3 МПа. Стержни и узлы структуры испытывают напряжения от нормативного значения полной нагрузки, не превышающие 17-36% от расчетного сопротивления стали. Это означает, что при действии расчетных нагрузок все элементы и узлы конструкции покрытия работают упруго, без накопления каких-либо остаточных деформаций и повреждений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Натурные испытания конструкций покрытия показали, что все параметры напряженно-деформируемого состояния могут в полной мере оцениваться методикой действующих норм. Экспериментальные

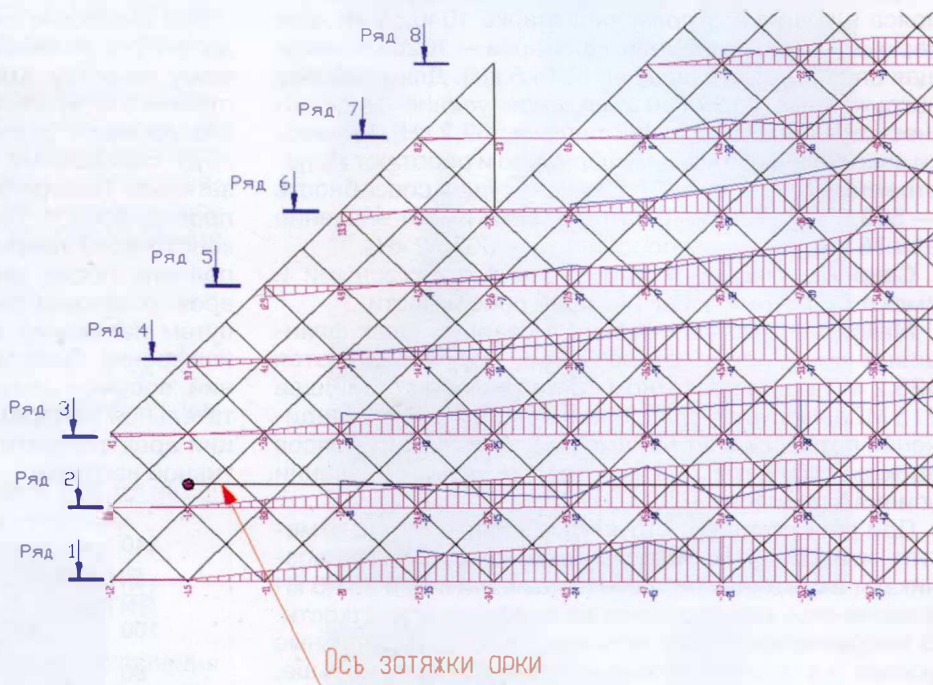


Рис. 9. Расчетные (красный цвет) и экспериментальные (синий цвет) эпюры вертикальных перемещений структурной плиты покрытия

данные усилий и перемещений не превышают расчетных значений. Отличие расчетных значений перемещений от экспериментальных в арке составляет 14,5-20%, отличие расчетных и экспериментальных усилий — 10-30,5%.

Для структурной плиты расчетные перемещения отличаются от экспериментальных на величину до 50%, отличие расчетных усилий в стержнях структуры от экспериментальных составляет 23,1-40,3%.

Результаты проведенных натурных испытаний металлических конструкций покрытия зафиксированы в акте испытаний государственной комиссией с участием представителя заказчика, генерального подрядчика, департамента Госстройнадзора, генерального проектировщика. Комиссией сделано заключение, что несущая способность металлических арок и структурной плиты покрытия обеспечена, все элементы покрытия работают в упругой стадии. Действительная работа конструкций покрытия согласуется с основными положениями расчета. При обследовании конструкций после снятия испытательной нагрузки каких-либо повреждений, прогибов, искривлений, разрушений конструктивных элементов и узлов не обнаружено. Металлические конструкции покрытия полностью обеспечивают конструкционную безопасность здания.

ЛИТЕРАТУРА

1. СНиП 2.01.07-85. Нормы проектирования. Нагрузки и воздействия / Госстрой СССР. — М.: ЦНИТП Госстроя СССР, 1986. — 36 с.
2. Изменение №1 к СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия. Приказ Министерства архитектуры и строительства Республики Беларусь от 18 июня 2004г. №166.
3. СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия (Дополнения. Раз. 10. Прогибы и перемещения) / Госстрой СССР. - М.: ЦНИТП Госстроя СССР, 1989. — 8 с.