

**ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ  
МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ПОКРЫТИЯ СПОРТКОМПЛЕКСА  
ПРИ ЗАПРОЕКТНЫХ НАГРУЗКАХ**

**Грибанов Ярослав Игоревич**

*ООО Научно-проектная фирма «Надежность»*

**Быков Антон Алексеевич**

*Аспирант ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет»*

**Калугин Александр Васильевич**

*Доцент, заведующий кафедрой «Строительные конструкции»  
ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,  
кандидат экономических наук*

Обеспечение безопасной эксплуатации зданий и сооружений с массовым пребыванием людей является первостепенной задачей технических служб собственников объектов.

Нередко в процессе строительства таких сложных объектов подрядными организациями вносятся существенные изменения в конструктивные решения, которые не согласовываются с проектной организацией и не отражаются в исполнительной технической документации.

За продолжительный период от проекта до сдачи объекта в эксплуатацию (из-за перерывов в строительстве по финансовым и др. причинам) меняются нормы проектирования, что приводит к появлению запроектных нагрузок на основные несущие конструкции объекта.

В процессе эксплуатации на конструкции объекта воздействует ряд неблагоприятных факторов, например, агрессивность среды эксплуатации, что зачастую не в полной мере учитывается при разработке проекта.

В таких случаях важную роль в обеспечении нормальной безопасной эксплуатации зданий и сооружений играет система мониторинга технического состояния объекта, которая позволяет в режиме реального времени оценивать текущее состояние основных несущих конструкций объекта, принимать своевременные решения по предупреждению аварийных ситуаций.

Рассматриваемый объект – спортивный комплекс в г.Перми, состоящий из четырех заблокированных зданий различного функционального назначения (рис. 1). Строительство объекта велось с 1992 по 2005 гг. (с перерывом в строительстве с 1995 по 2002 гг.) сначала югославской фирмой с участием зарубежных и российских субподрядчиков, а на заключительном этапе – только российскими строителями. На рассматриваемом объекте присутствуют все негативные факторы, отмеченные выше:

– был период приостановки строительства без консервации объекта, когда несущие конструкции подвергались неблагоприятным воздействиям (атмосферные осадки, конденсат, перепады температур);

- в ходе строительства неоднократно менялись объемно-планировочные и конструктивные решения, причем без согласования с генпроектировщиком, контракт с которым (югославской фирмой) к тому моменту уже был прерван, эти изменения в исполнительную техническую документацию не вносились;
- к моменту ввода объекта в эксплуатацию изменились многие нормативные документы, в частности, нормы по нагрузкам и воздействиям, нормы по тепловой защите зданий и др.

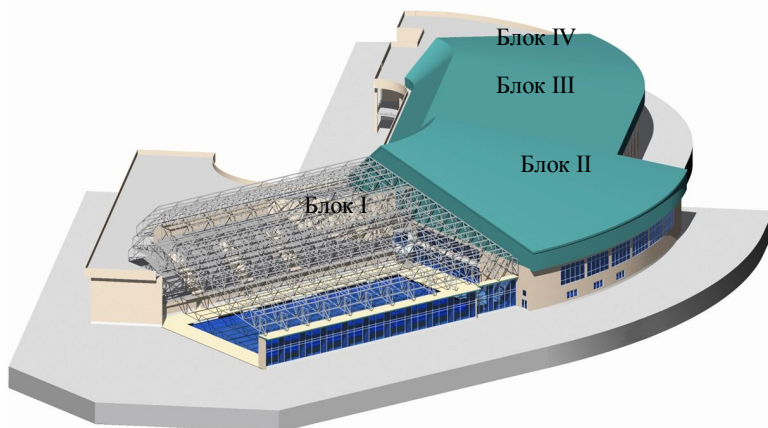


Рис. 1. Общий вид спортивного комплекса

Учитывая сложность объекта и отмеченные выше негативные факторы, перед его вводом в эксплуатацию были проведены работы по обследованию технического состояния строительных конструкций. На основе анализа материалов проведенных обследований можно сформулировать основные проблемы объекта:

- недостаточная несущая способность стропильных ферм блока I в зоне примыкания к блоку II от расчетного сочетания нагрузок, в связи с изменением в ходе строительства высоты примыкающего блока II (перепад высот возрос с 1,40 до 3,40 м) и, соответственно, увеличением снеговой нагрузки на нижележащие стропильные фермы (в зоне снегового мешка);
- несоответствие принятой в проекте конструкции кровли новым нормативным теплотехническим требованиям. Необходимость замены кровли с увеличением толщины утеплителя до требуемых параметров привело к возрастанию постоянных нагрузок на фермы покрытия от новой более тяжелой кровли;
- при изготовлении стропильных ферм заводом-изготовителем металлоконструкций была допущена замена марок (классов) стали в поясах

## Предотвращение аварий зданий и сооружений

- стропильных ферм без согласования с проектной организацией (вместо низколегированной стали С345 по проекту фактически применена сталь С285);
- за период длительного (более 5 лет) нахождения объекта в стадии незавершенного строительства без консервации объекта во внутренних полостях элементов коробчатого сечения ферм накопилась конденсационная влага, что вызвало развитие коррозионных процессов внутри замкнутых полостей элементов ферм (сечение элементов ферм коробчатое из двух швеллеров);
  - в монтажных узлах стропильных ферм вместо предусмотренных проектом высокопрочных болтов были поставлены болты нормальной прочности;
  - фактическая работа опорных узлов несущих конструкций покрытия отличается от проектной, в частности, шарнирно-подвижная опора под стропильной фермы уперлась в стену по оси «53», шарнирно-подвижные опоры стропильных ферм по оси «И» оказались закрепленными от горизонтального перемещения кирпичной стеной и бетонным полом;
  - система связей по покрытию не соответствовала российским нормам и была изменена по сравнению с первоначальным проектом;
  - узлы крепления прогонов подвесного потолка (от самого подвесного потолка отказались на завершающем этапе строительства) к нижним поясам стропильных ферм, изменили проектную схему примыкания нижних поясов стропильных ферм к подстропильной ферме.

Основываясь на результатах обследования, был выполнен сравнительный анализ проектных и фактических нагрузок (табл. 1), который свидетельствует о возрастании нагрузок.

Таблица 1

Анализ проектных и фактических нагрузок

Наименование нагрузки	Значение нормативных нагрузок, кН/м <sup>2</sup>		Разница, %	Примечание
	по проекту	по факту		
<b>Постоянные</b>				
Собственный вес элементов покрытия	0,49	0,54	<b>10</b>	Добавился вес элементов усиления ферм и дополнительных связей
Собственный вес кровли	0,23	0,68	<b>67</b>	Изменился состав кровли в связи с новыми нормами по теплотехнике
<b>Временная</b>				
Снеговая нагрузка в зоне примыкания к блоку II	4,7	9,6	<b>51</b>	Изменился СНиП «Нагрузки и воздействия». Изменился перепад высот между блоками I, II с 1,4 до 3,4 м

Современные методы обследования несущих конструкций и сооружений в целом позволяют дать объективную оценку их состояния, выявить дефекты, причины их возникновения и способы устранения, установить экономическую целесообразность ремонта, усиления, замены дефектных конструкций или сделать заключение о необходимости реконструкции или демонтажа сооружения.

Учитывая уникальность и ответственность объекта, собственником объекта в соответствии с новыми нормами было принято решение организовать мониторинг технического состояния металлоконструкций покрытия блока I, в котором находится большой плавательный бассейн с ванной 50×25 м и трибунами на 1000 зрителей и вспомогательные помещения.

Система мониторинга металлоконструкций покрытия была выстроена в соответствии с конструктивными особенностями исследуемых конструкций и включает в себя:

- систематическое визуальное освидетельствование конструкций и узлов металлоконструкций покрытия;
- геодезические измерения вертикальных перемещений контрольных точек металлоконструкций покрытия относительно опорных реперов в зимний период в зависимости от фактической нагрузки на покрытие (при этом ведется измерение толщины снежного покрова на кровле и определение плотности снега);
- тензометрию деформаций стержней металлоконструкций покрытия в режиме реального времени;
- измерение толщины стенок замкнутых профилей элементов металлоконструкций покрытия два раза в год, из-за попадания вовнутрь коробчатых сечений элементов воды и возможного развития коррозионных процессов стальных элементов в среднеагрессивной среде бассейна.

Основной задачей мониторинга является оценка работоспособности несущих металлоконструкций покрытия здания. В качестве критериев работоспособности приняты показатели прогибов стальных стропильных ферм и подстропильной фермы, а также уровень нормальных напряжений в элементах металлоконструкций в различные периоды года (при наличии и отсутствии снеговой нагрузки на кровле объекта).

Для оценки деформаций несущих стальных конструкций принят метод тензометрирования. В качестве источников первичной информации использованы фольговые тензодатчики электрического сопротивления 2ФКПА-20-200-А.

Датчики деформаций были наклеены на наиболее нагруженные элементы по результатам проверочных расчетов. Все датчики ориентированы параллельно продольным осям стержней для измерения продольных деформаций в них. Компенсационные датчики наклеены на стальные пластины, которые закреплены рядом с рабочими датчиками одной стороной.

## Предотвращение аварий зданий и сооружений

Для наклейки тензодатчиков на стержни стропильных ферм использован однокомпонентный моментальный клей на основе этилцианакрилата.

Регистрация показаний датчиков ведется с помощью измерительной системы «Терем-4». Универсальный измеритель-регистратор «Терем-4» является представителем нового поколения техники измерения параметров разных физических и производственных процессов. Основой регистратора является микропроцессорное центральное устройство, к которому по трехпроводной линии подключаются адаптеры связи с датчиками.

Адаптеры изготавливаются индивидуально и могут обслуживать до восьми датчиков одного или различного видов. Между центральным устройством и адаптером информация передается в цифровом виде и хранится энергонезависимой flash-памятью при выключении питания прибора. Интерфейс связи с компьютером позволяет передавать сохраненные данные из прибора в персональный компьютер. Переданные данные хранятся в компьютере в формате Excel и могут быть представлены с помощью индивидуальных программ в виде таблиц, графиков, диаграмм и т.д. На рис. 2 представлен график показаний одного из датчиков деформаций посредством программы «Терем-4».

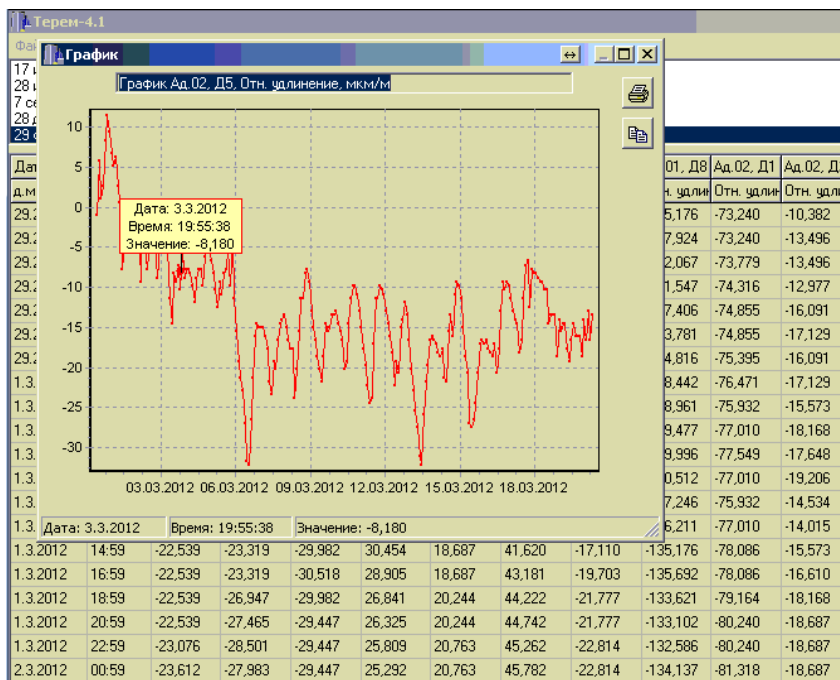


Рис. 2. Пример построения графиков показаний датчиков деформаций в программе «Терем-4»

После монтажа датчиков деформаций они были соединены с адаптером, который в свою очередь был подключен к персональному компьютеру (рис. 3). Для удобства и оперативности считывания данных ПК был подключен к сети Интернет через 3G-модем. С помощью специальных программных средств была отлажена система автоматического сбора информации с регистрирующих устройств и ее отправка на мониторы специалистов. Считывание и отправка данных происходят каждые 12 часов. Данный временной интервал наиболее оптимален по информативности данных и ее объему.



Рис. 3. Подключение регистрирующего прибора «Терем-4» к ПК

Как отмечалось выше, в ходе работ по обследованию металлоконструкций покрытия была обнаружена вода в замкнутых полостях элементов коробчатого сечения (прогонах, элементах стропильных ферм). Механизм попадания воды во внутренние полости элементов коробчатого сечения не вполне ясен, вероятно, произошло проникновение атмосферной влаги вовнутрь элементов через дефекты сварных соединений в процессе строительства и последующий период приостановки строительства. Еще одной возможной причиной попадания воды в замкнутые полости элементов, является конденсат.

Для выпуска воды было проведено сплошное сверление отверстий в нижней зоне во всех элементах замкнутого сечения. Вода была обнаружена примерно в 400 элементах. Количество воды в элементах различно: от нескольких миллилитров до 50 литров. Цвет воды, выпущенной из элементов, также различный: от прозрачного до мутно-коричневого цвета, что свидетельствует о наличии коррозионных процессов внутри элементов замкнутого сечения. Ряд элементов (прогоны покрытия, отдельные элементы нижних поясов ферм) из-за расширения воды при замерза-

нии в зимнее время в период приостановки строительства приобрели «бочкообразную» форму и были заменены или усилены.

С целью контроля скорости коррозионных процессов внутри элементов, была налажена система выборочного контроля толщин стенок замкнутых профилей. Для определения фактических геометрических характеристик сечений стропильных конструкций и для учета коррозионных процессов, протекающих в замкнутых полостях стержней элементов, проводилось измерение толщины стенок замкнутых профилей элементов с помощью ультразвукового прибора «Взлёт-УТ» (точность измерений прибора 0,01 мм).

Общее количество точек контроля 100, месторасположение точек контроля определялось таким образом, чтобы обеспечить выявление зон, в которых процессы коррозии протекают наиболее интенсивно. Специально для этого был взят под контроль нижний пояс одной из стропильных ферм, в котором точки контроля располагаются с интервалом в 1 м, начиная с ее опорной части. По контуру сечения точки контроля расположены на ровной поверхности (стенка швеллера, стенка квадратной трубы, стенка двутавра). При выполнении замеров соблюдались все требования инструкции по пользованию прибором (точка контроля зачищалась с помощью инструментов и наждачной бумаги до зеркального блеска металла, наносился тонкий слой литола для лучшего контакта датчика с поверхностью металла и защиты последнего от возможной в дальнейшем поверхностной коррозии и др.).

Основное внимание было обращено на растянутые стержни. Также были проведены замеры для стержней, в которых воды не обнаружено. При освидетельствовании состояния стальных конструкций покрытия для проверки наличия воды в замкнутых полостях сечений снимались заглушки, герметизирующие просверленные отверстия. Отсутствие воды под заглушками дает основание полагать, что при существующих условиях эксплуатации конденсат во внутренних полостях стержней не образуется. Дополнительно были просверлены отверстия в замкнутых полостях стержней подстропильной фермы для выявления и выпуска попавшей туда воды. По результатам сверления вода в стержнях подстропильной фермы не обнаружена, что можно объяснить высоким качеством сварных швов, которые по проекту подлежали повышенному контролю с использованием физических методов.

Анализ результатов замеров позволяет сделать вывод, что в целом наблюдается динамика уменьшения толщины стенок прокатных швеллеров. Так уменьшение толщины стенок стержней стропильных ферм, состоящих из двух спаренных швеллеров №14 составило 0,15 мм за все время наблюдения, то же для №12 – 0,3 мм, для №16 – 0,42 мм, для №10 – 0,25 мм.

Результаты замеров позволили сделать вывод, что коррозионное повреждение элементов на участках, расположенных выше границы двух

сред (вода – воздух), больше, чем на участках, находящихся долгое время под слоем воды. Однако скорость протекания процессов коррозии на всех участках примерно одинакова.

Для объективной оценки технического состояния объекта необходимо также иметь адекватную расчетную модель объекта, позволяющую выполнять прочностные расчеты конструкций с учетом влияния различных факторов. Металлоконструкции покрытия блока I представляют собой сложную систему ферм, связей, балок подвесного потолка и т.д., состоящую из более 3000 элементов (рис. 4). В данной работе моделирование несущих конструкций покрытия было выполнено в программном пакете ANSYS, а для учета изменения геометрических характеристик сечений элементов с учетом коррозионных процессов был разработан модуль, написанный в среде MathCAD.

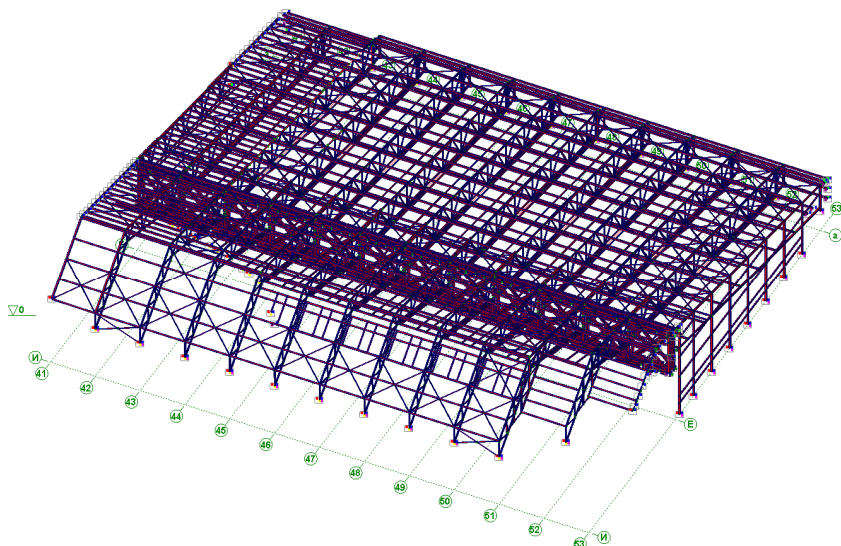


Рис. 4. Расчетная схема покрытия спортивного сооружения

Расчетный модуль в MathCAD позволяет учесть все особенности поперечных сечений элементов в характеристиках жесткости, автоматизировать расчет геометрических характеристик стержневых элементов покрытия, учесть изменение геометрических размеров сечения на величину, равную уменьшению толщины сечения стенки элементов ферм с внутренней стороны, которое происходит в результате коррозии стали. В качестве исходных данных для расчета программа использует геометрические размеры поперечных сечений прокатных профилей, приведенных в соответствующих ГОСТах. Необходимо отметить, что анализ геомет-



рических характеристик при численном интегрировании для сечений стандартных прокатных профилей швеллеров по ГОСТ 8240-89 показал их неполное совпадение с данными сортамента. Основные геометрические характеристики для рассмотренных сечений отличаются от данных, приведенных в сортаментах в среднем на 5%. Аналогичные результаты для геометрических характеристик неослабленных сечений получены при расчетах с помощью модуля «Конструктор сечений» программы SCAD Office.

Результаты окончательного расчета характеристик жесткости стержней размещаются в текстовом файле, который переносится в программу статического расчета покрытия в среде ANSYS.

Для оценки адекватности расчетной модели был поставлен натуральный эксперимент, при котором замерялись прогибы и относительные деформации существующего покрытия от воздействия снеговой нагрузки. В качестве контрольной нагрузки для покрытия служил вес снега, величина которого определялась прямым взвешиванием одновременно с проведением измерений перемещений контрольных точек (рис. 5).

Отличительной особенностью результатов геодезических измерений спортивного комплекса является возможность выделения перемещений контрольных точек от действия только снеговой нагрузки и сравнения их с результатами, полученными при расчете модели покрытия от действия той же нагрузки (рис. 6).

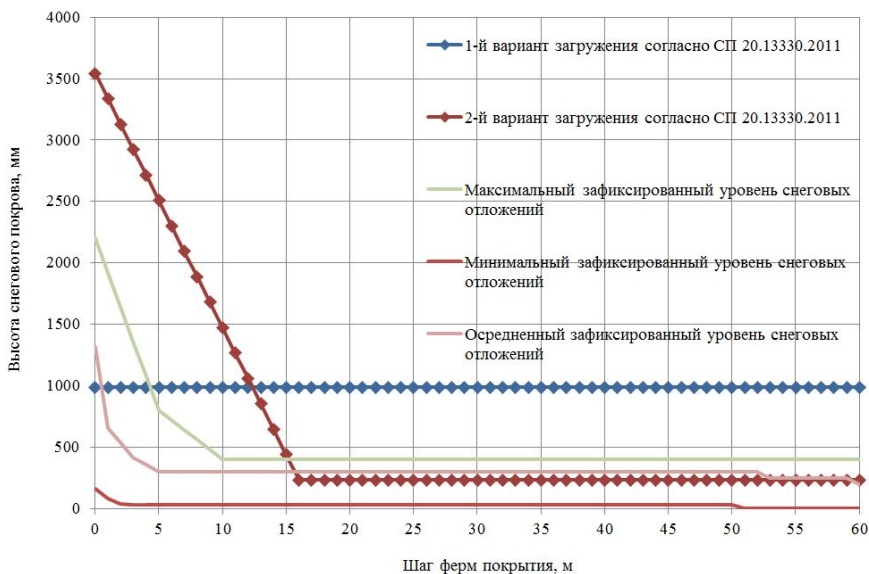


Рис. 5. График снеговых отложений на покрытии спорткомплекса

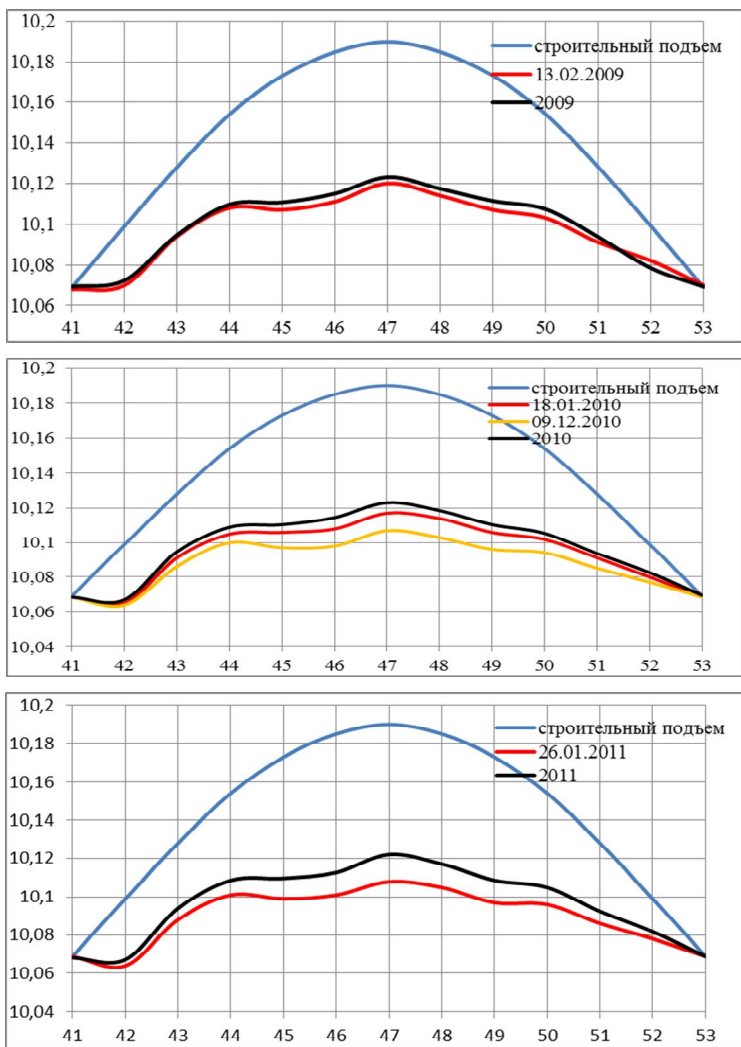


Рис. 6. Диаграммы высотных отметок контрольных точек подстропильной фермы:

- кривая строительного подъема фермы;
- кривые высотных отметок контрольных точек, зафиксированных при снеговых отложениях на покрытии на конкретную дату;
- кривая высотных отметок контрольных точек, зафиксированных при отсутствии снеговых отложений на покрытии, построенная по средним в течение года значениям

Прогиб стропильных ферм зависит от прогиба подстропильной фермы (рис. 7). Так стропильная ферма имеет прогиб  $f$  в середине пролета от действия постоянной и длительной нагрузки. Под действием снеговой нагрузки опорные узлы нижнего пояса по оси «Е» стропильных ферм перемещаются на величину  $a$ , то есть практически на величину вертикальных перемещений контрольных точек, зафиксированных на нижнем поясе подстропильной фермы. Перемещение опорных узлов стропильных ферм на величину  $a$  вызывает перемещение контрольных точек в середине пролета на величину  $b$ , прямо пропорциональную величине  $a$ , при этом действие снеговой нагрузки дополнительно вызывает перемещение контрольных точек на величину  $f'$ . Таким образом, разность высотных отметок контрольных точек без снеговой нагрузки и со снеговой нагрузкой (величина  $c$ ) не равна прогибу стропильных ферм при действии снеговой нагрузки, в отличие от подстропильной фермы.

Проведенный эксперимент показал хорошую сходимость натуральных измерений прогибов с результатами теоретического расчета сооружения.

После того как была выполнена оценка адекватности расчетной модели, был разработан алгоритм расчета с учетом коррозионных процессов, протекающих в конструкциях покрытия и как следствие изменений геометрических характеристик сечений элементов (рис. 8).

Результаты статического расчета стержневой конструкции покрытия в виде текстового файла из программы ANSYS транспортируются в модуль программы MathCAD и используются для расчета напряженного состояния стержней несущих элементов. Этот расчет составляет третий этап работы и выполняется с целью проведения оценки работоспособности покрытия по критериям первой и второй групп предельных состояний: прочности и устойчивости. Расчет значений компонентов тензора напряженно-деформированного состояния в стержнях несущих элементов покрытия с учетом коррозии внутренней поверхности полого сечения так же выполняется в MathCAD.

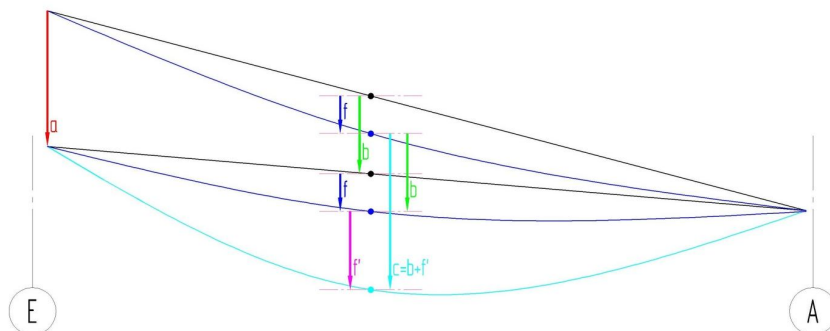


Рис. 7. Схема к определению прогиба стропильной фермы

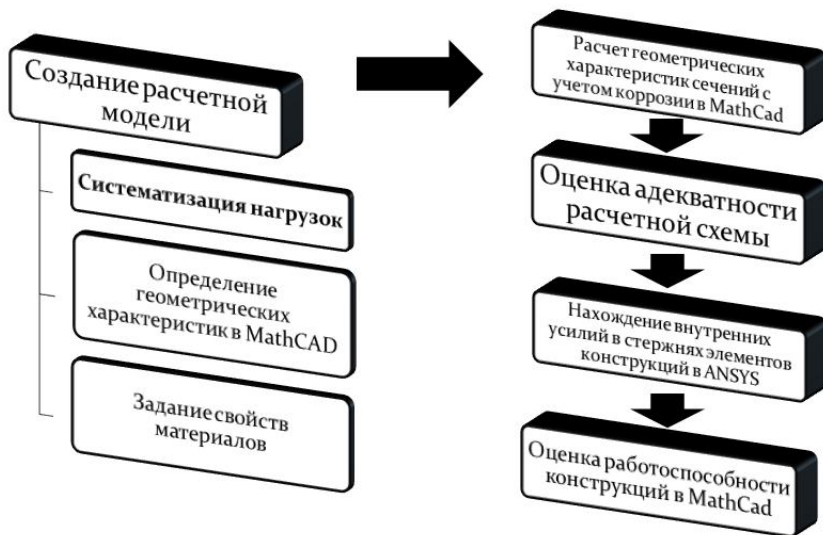


Рис. 8. Алгоритм расчетного комплекса по анализу напряженно-деформированного состояния несущих конструкций покрытия с учетом коррозионных процессов

На рис. 9 представлена пространственная деформированная модель покрытия объекта.

Вычислительный комплекс ANSYS и разработанный расчетный модуль в MathCAD позволяют оценивать влияние коррозионных процессов, протекающих в замкнутых полостях несущих элементов покрытия, а также выполнять автоматический пересчет покрытия по группам предельных состояний.

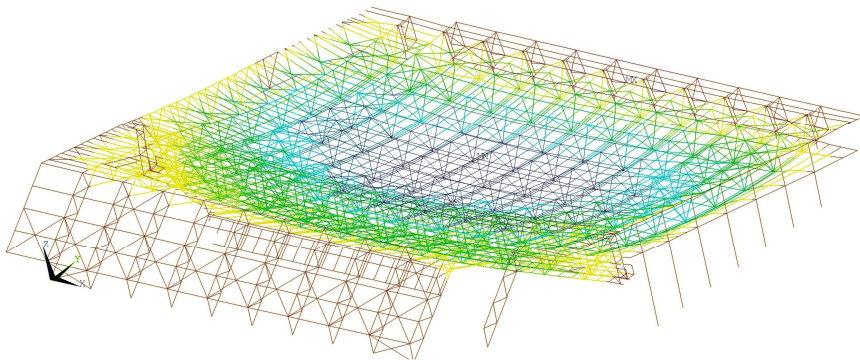


Рис. 9. Пространственная деформированная модель покрытия объекта

Для оценки влияния на напряженно-деформированное состояние покрытия различных факторов был выполнен ряд расчетов по компьютерной модели с использованием методов планирования эксперимента. В данной работе методы планирования эксперимента использовались для оценки влияния варьируемых факторов и выбора оптимальных условий закрепления опорных узлов подстропильной фермы (ПФ) и стропильных ферм (СФ).

Ниже приведены допущения для граничных условий опорных узлов и условий сопряжения стержней ПФ и СФ, справедливость которых оценивалась с помощью методов планирования эксперимента:

- плита балансира опорного узла ПФ по оси «53» уперта в вертикальную плоскость железобетонной балки кровли на отм. +10,000 м по оси «54», что позволяет считать, что горизонтальное перемещение нижнего узла фермы по оси «53» в сторону оси «54» запрещено;
- при устройстве монолитной железобетонной стены по оси «53» консоль верхнего пояса ПФ оказалась в бетоне на глубину 286 мм, что позволяет считать, что перемещения верхнего узла фермы запрещены;
- узлы опирания СФ на железобетонные конструкции каркаса по осям «А» и «И» запроектированы в виде плиточных шарниров, однако остались не срезанными установочные болты, что позволяет считать, что их поворот и перемещения запрещены;
- свободному ходу листовых шарниров в узлах крепления нижних поясов стропильной фермы к подстропильной мешают прогоны подвесного потолка;
- сопряжения стержней СФ выполнены на сварке через фланцы, сопряжение стержней ПФ выполнено на болтах, что позволяет считать, что существует определенная податливость данных соединений.

Из других факторов, влияющих на НДС металлоконструкций покрытия, были рассмотрены следующие:

- изменение геометрических характеристик сечений элементов за счет усиления отдельных элементов, включение в работу элементов усиления;
- изменение расчетной схемы подстропильной фермы и стропильных ферм за счет изменения характера закреплений опорных узлов.

Выяснилось также, что на НДС металлоконструкций покрытия большое влияние оказывает включение в работу вспомогательных элементов покрытия: прогонов кровли, прогонов подвесного потолка, связей и даже конструкций ходовых мостиков по нижним поясам ферм.

Проведенные расчеты показали, что несущая способность основных несущих конструкций покрытия объекта от фактически действующих нагрузок и воздействий, обеспечена, напряжения в наиболее нагруженных элементах и узлах не превышают 70% от расчетных.

## Предотвращение аварий зданий и сооружений

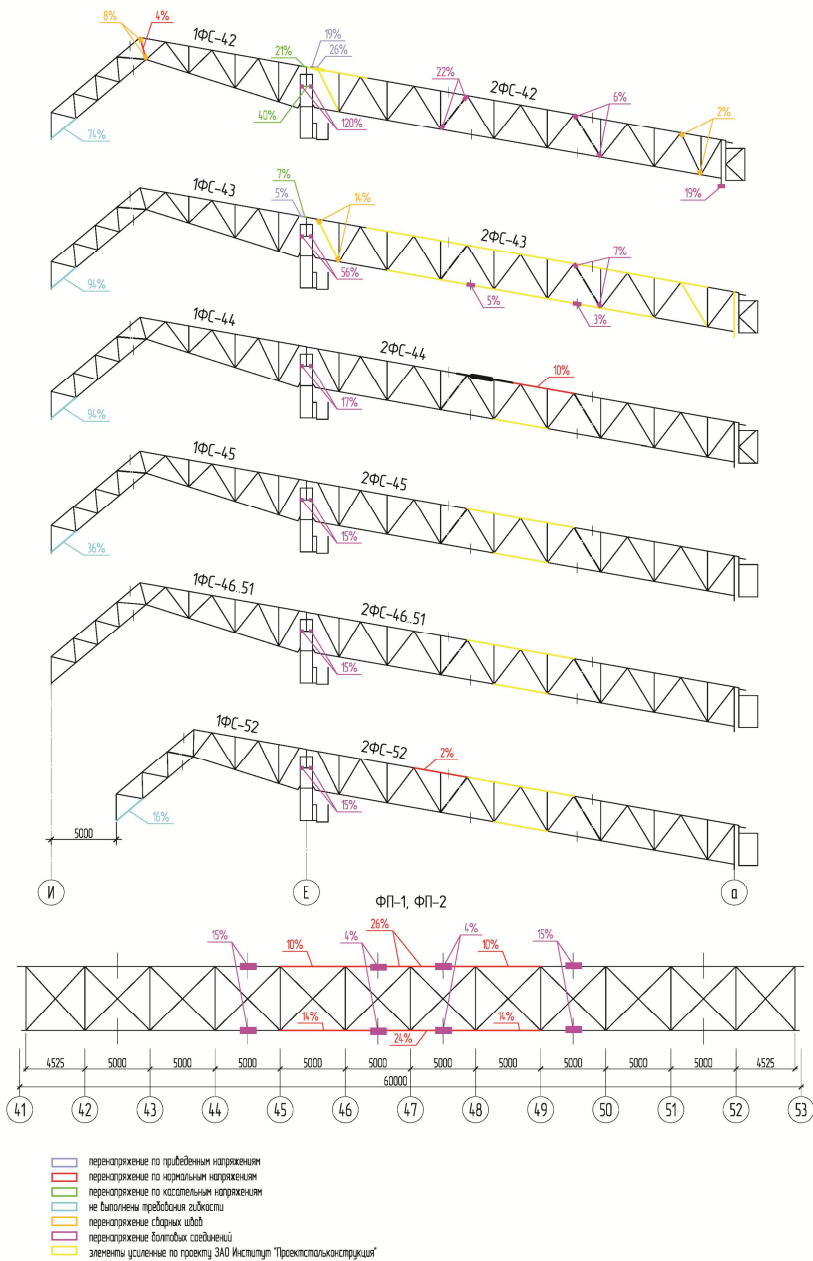


Рис. 10. Схемы ферм с указанием элементов и узлов, несущая способность которых не обеспечена от воздействия полных расчетных нагрузок

Однако, при сочетании ряда неблагоприятных факторов от расчетного сочетания нагрузок (с учетом максимального снега по СНиП) возможно появление элементов с перенапряжениями от 4 до 24% (рис. 10).

Общая оценка технического состояния металлоконструкций покрытия объекта – ограниченно работоспособное. Дальнейшая безопасная эксплуатация объекта возможна только при постоянном мониторинге технического состояния и ограничении снеговой нагрузки в зоне возможного образования снегового мешка (на участке примыкания к блоку II, где есть перепад высот).

### Выводы

1. Разработанная методика мониторинга технического состояния объекта с помощью методов тензометрирования и прямого измерения прогибов конструкций позволяет вести контроль за состоянием металлоконструкций покрытия в режиме реального времени и может быть применена на подобных объектах с похожими проблемами.
2. Создание пространственной математической модели объекта с проверкой адекватности расчетной модели прямым натурным экспериментом позволили установить закономерности деформационных процессов в несущих конструкциях покрытия.
3. С помощью разработанной методики оценки НДС несущих конструкций объекта появилась возможность своевременно устанавливать необходимость проведения текущих ремонтных мероприятий по поддержанию или восстановлению нормативного технического состояния конструкций, предупреждать появление внештатных ситуаций.

### Библиографический список

1. Грибанов Я.И., Калугин А.В., Быков А.А. Организация мониторинга технического состояния стальных несущих конструкций покрытия спортивного комплекса // Промышленное и гражданское строительство – 2011. - №7(2). – С.6-8.
2. Оценка адекватности компьютерной модели несущих конструкций покрытия спортивного комплекса на основе анализа действия снеговой нагрузки / Я.И. Грибанов, А.В. Калугин, А.А. Балакирев, А.А. Быков // Промышленное и гражданское строительство. – 2011. - №7(2). – С.9-11.
3. Грибанов Я.И., Калугин А.В. Мониторинг технического состояния металлоконструкций покрытия спортивного комплекса // Вестник ПГТУ «Строительство и архитектура». – 2010. - №1. Тематический выпуск «Теория и практика инженерного обследования строительных конструкций зданий и сооружений».

4. Грибанов Я.И., Балакирев А.А., Калугин А.В. Расчет геометрических характеристик прокатных профилей // Сборник материалов международной научной студенческой конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам «Научному прогрессу – творчество молодых». В 3-х частях. – 2009. – Ч.3. – С.129.
5. Грибанов Я.И., Быков А.А., Калугин А.В. Система измерений перемещений и деформаций несущих металлоконструкций спортивного комплекса // Теоритические и прикладные проблемы науки и образования в 21 веке: сборник научных трудов по материалам Международной заочной научно-практической конференции 31 января 2012 г. В 10 частях. Часть 2; Мин. Образования и науки Рос. Федерации. – Тамбов: Изд-во ТРОО «Бизнес-Наука-Общество», 2012. – С.44-46.