

УДК 624.012

## РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ СИСТЕМЫ

канд. техн. наук, доц. В.И. ДРАГАН, д-р техн. наук, проф. В.В. ТУР,  
Н.Л. МОРИЛОВА, А.В. ДМИТРИЕВА  
(Брестский государственный технический университет)

*Демонстрируется расчет надежности металлических структурных конструкций системы «БрГТУ», в частности большепролетных пространственных металлических конструкций покрытий. Рассмотрена задача прямого оценивания надежности сложной пространственной конструктивной системы при использовании DPD-метода, для которого функции влияния, связывающие воздействия и эффекты от воздействий, установлены на основании нелинейных расчетов с использованием метода конечных элементов. Предложена методика исследования параметров надежности структурных конструкций системы «БрГТУ». Проанализированы конструктивные формы большепролетных пространственных конструкций и оценка параметров их надежности.*

**Введение.** Строительная практика XXI века характеризуется смелыми архитектурными решениями: увеличением пролетов, применением новых форм покрытий и новых строительных материалов. Неразрывно с этим тема безопасности, надежности затрагивает актуальный на сегодняшний день, но так и не решенный, вопрос живучести. Изучение свойства «живучести» невозможно решить на примере одной конструкции, фрагмента и даже целого сооружения. Нельзя сказать, что все здания, например со структурными покрытиями, имеют одинаковые показатели надежности (живучести). Данные исследования и расчеты со временем должны стать составляющей любого проекта на уровне с регулярно проводимыми расчетами (для зданий 1-го и 2-го уровней ответственности). Однако сегодня эта проблема пока далека от своего решения: отсутствуют общепринятые методики расчетов; слабая нормативная база по вопросу исследования; методики, изложенные в различных научных статьях, как правило, дают оценку надежности лишь для одного элемента, а не сооружения в целом.

При практическом оценивании надежности сложных конструктивных систем в ряде случаев исходят из простого утверждения: если обеспечены индексы надежности для каждого отдельного элемента системы, то и обеспечена надежность конструктивной системы в целом. При этом не ставится задача определения/нормирования резервов (или запасов) несущей способности. В таком случае для установления функции влияния, связывающей воздействия и эффекты воздействий, достаточно выполнения линейно-упругих статических расчетов. Однако при оценивании реальных запасов несущей способности, а в дальнейшем для корректного решения оптимизационных задач необходимым является выполнение нелинейных расчетов с учетом перераспределения усилий между отдельными элементами системы.

Далее нами будет рассмотрен ряд большепролетных пространственных металлических конструкций покрытий и рассмотрена задача прямого оценивания надежности сложной пространственной конструктивной системы при использовании DPD-метода, для которого функции влияния, связывающие воздействия и эффекты от воздействий, установлены на основании нелинейных расчетов с использованием метода конечных элементов.

Определение надежности как проектируемых зданий, так и существующих связано с тем, что структурные конструкции призваны эксплуатироваться весьма долгий срок, за это время происходят изменения в нормативной базе, изменяются различные нагрузки и воздействия, в конструкции могут происходить различные отказы.

### Постановка задачи

В соответствии с базовым требованием п. 2.1(Р) ТКП EN 1990 [1] строительные конструкции следует проектировать таким образом, чтобы с назначенным уровнем надежности в течение проектного срока эксплуатации и с минимальными экономическими затратами они воспринимали все предлагаемые воздействия и влияния окружающей среды, оставаясь пригодными для использования по назначению.

Представленное требование является, по существу, сконцентрированным выражением подхода к проектированию по методу предельных состояний. В рамках СТБ ISO 2394 [2] и ТКП EN 1990 [1] проверки предельных состояний для обеспечения соответствия назначенному уровню надежности, определенному в приведенных документах, в терминах целевой или допустимой вероятности отказа и связанного с ней индекса надежности ( $P_f = \Phi(-\beta)$ ), следует выполнять с использованием следующих методов:

- метода прямого расчета вероятностей отказа, или так называемого прямого метода расчета надежности (англ. direct probability design method – DPD-method);
- метода частных коэффициентов.

Следует отметить, что практически все нормы, применяемые при традиционном проектировании, базируются на полувероятностном подходе метода частных коэффициентов. При этом, в отличие от существовавшей ранее практики, система коэффициентов метода устанавливается с использованием статических калибровок, опираясь на методы прямого расчета вероятностей отказа.

Теория и аналитические методы расчета конструкционной надежности, базирующиеся на уже ставших классическими подходах [10 – 12], интенсивно развиваемые в последние годы [5 – 8], используются в качестве рациональных инструментов для оценки безопасности сложных статически неопределимых конструктивных систем, в частности стальных пространственных конструкций [5 – 6]. В данном случае прямой вероятностный расчет (DPD) применяют, как правило, для решения задач двух типов, основанных на вычислении вероятностей отказа и соответствующих им индексов надежности:

- вычисление вероятностей отказа для отдельных элементов (или групп элементов), входящих в состав сложных конструкций, и сравнение полученных значений с допустимыми, целевыми, (проверки критериев вида  $P_{fk} \leq P_{f,tag}$  или  $\beta_k \leq \beta_{tag}$ );

- решение оптимизационных задач в вероятностной постановке [6], для которых рассматриваются общие условия.

$$\text{Найти} \quad \min \mathbf{L}^T, \mathbf{A}_0 \quad (1)$$

$$\text{при условии} \quad [\mathbf{A}] \cdot \mathbf{N} = \mu_F, \quad (2)$$

$$\beta(\mathbf{A}_0, \mathbf{N}) \geq \begin{cases} \beta_{0_i}, & N \geq 0; \\ \beta_{0_c}, & N < 0. \end{cases} \quad (3)$$

$$\mathbf{A}_0 \geq \mathbf{A}_{0,min}. \quad (4)$$

В выражениях (1)...(4)  $\mathbf{L}$  – вектор-столбец элементов конструктивной системы;  $\mathbf{A}_0$  – вектор площадей поперечных сечений для элементов пространственных конструкций;  $\beta(\cdot)$  – вектор расчетных индексов надежности для отдельных элементов;  $\beta_{0_i}$ ,  $\beta_{0_c}$  – целевые значения индексов надежности ( $\beta_{tag}$  – по ТКП EN 1990 [1]) для растянутых и сжатых стержней.

В общем случае при решении задач как первого, так и второго типа необходимо установить соответствующие функции распределения вероятностей и для сопротивлений отдельных элементов, и для эффектов от воздействий (внутренних усилий, действующих в элементах), рассматриваемых как случайные величины. Модели сопротивлений отдельных элементов и эффектов воздействий для этих же элементов следует представлять как функции базисных переменных в вероятностной постановке. При оценивании надежности стальных конструкций в модели сопротивления принято, как правило, учитывать следующие базисные переменные: модули упругости ( $E_i$ ), прочность стали, выраженную пределом текучести ( $R_{y,i}$ ), геометрию поперечного сечения элемента, представляемую площадью поперечного сечения ( $A_i$ ) и моментами инерции  $I_i$ . Стохастические модели внутренних усилий, вызванных внешними нагрузками, имеют более сложную форму записи, чем модели сопротивления, в силу того, что в качестве базисных переменных применяются как, собственно, воздействия (главным образом переменные воздействия), вызывающие внутренние усилия, так и функции влияния, описывающие взаимосвязь воздействий и эффектов от воздействий для рассматриваемой конструктивной системы. Если для простых конструкций или отдельных конструктивных элементов (например, балочных или стержневых элементов) такие функции влияния сформулировать достаточно просто, то для сложных статически неопределимых пространственных стержневых систем такие функции могут быть получены только при выполнении определенных статических расчетов с использованием, например, метода конечных элементов (МКЭ). Проблема еще более усложняется в случае выполнения нелинейных расчетов [5].

Следует отметить еще одно важное, на наш взгляд, обстоятельство. Калибровка системы частных коэффициентов, применяемых в нормах проектирования, выполнена с использованием функций влияния, связывающих воздействия и эффекты от воздействий при рассмотрении наиболее простых случаев единичных элементов в условиях отдельных видов напряженно-деформированного состояния (изгиб, растяжение, сжатие). Вместе с тем при выполнении нелинейных статических расчетов сложных статически неопределимых конструктивных систем приходится использовать не расчетные, а средние характеристики свойств материалов. Это связано с тем, что переход к расчетным характеристикам (применение расчетных диаграмм деформирования для материалов) может приводить к искажению значения модуля упругости и некорректному вычислению матрицы жесткостей. В случае стальных конструкций при рассмотрении единичных элементов конструктивной системы в функции предельного состояния  $g[x]$  согласно [5; 6] рекомендовано использовать следующие базисные переменные:

$$X = \{E, R_y, A, I, F\}; X_i \in N(\mu_{x_i}; \sigma_{x_i}^2); i = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

Функция состояния может быть представлена в виде:

$$G_k = q(A_{0,k}, I_k, I_k, R_{y,k}, E_k, N_k); \quad (6)$$

$$g(x) = \begin{cases} A_{0,k} R_{y,k} - N_k, & N_k \geq 0 \\ \bar{\varphi}(E_k, R_{y,k}, I_k, I_k, A_{0,k}) \cdot A_{0,k} \cdot R_{y,k} + N_k, & N_k < 0 \end{cases} \begin{cases} \text{– растянутые элементы;} \\ \text{– сжатые элементы,} \end{cases} \quad (7)$$

где коэффициент  $\bar{\varphi}$  для элемента в условиях центрального сжатия можно записать:

$$\bar{\varphi} = (E, R_y, J, I, A) = \varphi(E, R_y, \lambda(I, J, A)). \quad (8)$$

$$I = \min\{I_y, I_z\}. \quad (9)$$

При практическом оценивании надежности сложных конструктивных систем в ряде случаев [5] исходят из простого утверждения: если обеспечены индексы надежности для каждого отдельного элемента системы, то и обеспечена надежность конструктивной системы в целом. При этом не ставится задача определения резервов (или запасов) несущей способности. В таком случае для установления функции влияния, связывающей воздействия и эффекты воздействий, достаточно выполнения линейно-упругих статических расчетов. Однако при оценивании реальных запасов несущей способности, а в дальнейшем для корректного решения оптимизационных задач необходимым является выполнение нелинейных расчетов с учетом перераспределения усилий между отдельными элементами системы.

Рассмотрим на примере купола здания Национального олимпийского комитета Республики Беларусь задачу прямого оценивания надежности сложной пространственной конструктивной системы при использовании DPD-метода, для которой функции влияния, связывающие воздействия и эффекты от воздействий, установлены на основании нелинейных расчетов с использованием метода конечных элементов.

**Методика исследования параметров надежности структурных конструкций системы «БрГТУ»**

Предложенная методика расчета [1] является системой многоуровневых расчетных схем в различных программных комплексах, начиная от создания модели сооружения до его полного разрушения при запроектных нагрузках. Основой предлагаемых расчетов является расчетная математическая модель, позволяющая исследовать широкий круг вопросов. На базе этой модели можно проследить работу сооружения на всех стадиях его загрузки – от упругой до разрушения. Данная модель способна учесть многие наиболее важные характерные особенности работы сооружения. Естественно, предложенная трехмерная модель не является исчерпывающей, но в настоящее время она способна наиболее полно учесть все особенности реального объекта и, следовательно, может считаться наиболее адекватной.

Рассмотрим иерархию уровней жизненного цикла системы в предложенной методике расчета:

- создание системы – начальный уровень;
- проектный уровень – пошаговое нагружение (как правило, в узлах структурных конструкций) полной проектной нагрузкой. На данном уровне последовательность приложения нагрузки не принципиальна (так, например, для расчетной модели не важна последовательность типа приложения нагрузки: собственный вес, остекление/кровля, вес оборудования, ветровая, снеговая нагрузки и т.п.). Важным показателем данного этапа является процент исчерпания несущей способности каждого элемента сооружения при нагружении полной проектной нагрузкой.

Проектный уровень нагружения характеризуется требуемой (нормируемой) величиной индекса надежности  $\beta$ . Понимаем свойство надежности системы как свойство сохранения во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях эксплуатации, где заданными характеристиками являются ограничения по 1-й и 2-й группам предельных состояний. Выполнение требований строительных норм гарантирует надежность при заданной величине проектной нагрузки, но невозможно гарантировать непревышение данного уровня нагрузки (например, снеговой).

Выход за пределы нормальных условий эксплуатации, главным образом за счет факторов природно-климатического характера и нарушения нормального режима эксплуатации, провоцирует аварию, при наступлении которой степень обрушения здания становится адекватной потенциалу заложенных в него критических дефектов. Предельное состояние системы проиллюстрировано графически (рис. 1).

В качестве внешнего воздействия на систему на проектном уровне были приняты: собственный вес, вес технологического оборудования, вес кровли и остекления, ветровая и снеговая нагрузки; для нелинейного расчета в качестве внешнего воздействия была принята снеговая нагрузка с шагом приложения  $0,1S_n$ . При расчете принципиально не учитывали такие аварийные воздействия, как падение самолета, пожар, теракт и т.п., то есть события, имеющие очень малую вероятность возникновения.

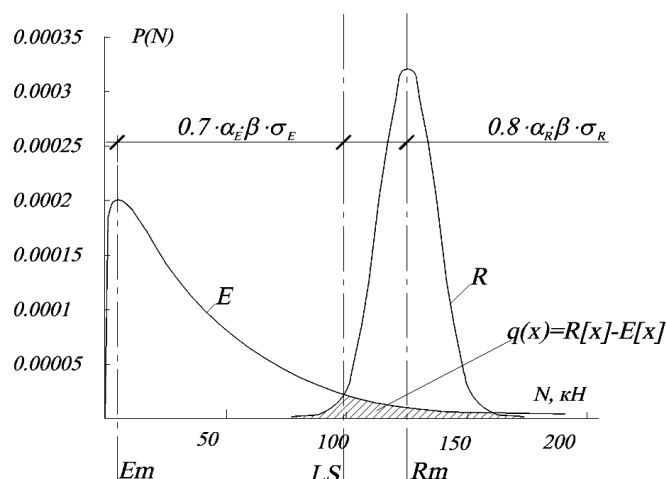


Рис. 1. Предельное состояние системы

Запроектный уровень – нелинейный расчет системы с загрузением до полного ее разрушения. Нагружение пространственной системы осуществляется поэтапно, долями 0,1 от полной расчетной снеговой нагрузки. Данный этап является наиболее важным и ответственным, так как позволяет определить:

- величину разрушающей нагрузки для сооружения;
- число отказавших элементов при любой величине нагрузки;
- скорость возрастания перемещений с увеличением количества отказавших элементов;
- отсутствие/наличие ключевых элементов;
- картину распределения усилий;
- влияние формы покрытия на несущую способность сооружения в целом.

Запроектный уровень работы сложных систем необходимо характеризовать показателем (величиной) живучести. Термин «живучесть» будем определять как характеристику сопротивляемости разрушению конструктивной системы после достижения одним из ее элементов предельного состояния при приложении запроектных внешних воздействий [2]. Поэтому решение задач на запроектном уровне связано с нелинейным поведением сложных систем, предсказание поведения которых при действии запроектной нагрузки пока еще носит постановочный характер. Таким образом, рассматриваемые структурные конструкции покрытий работают в условиях сложных комплексных нагружений, каждое из которых имеет свою природу происхождения, обеспеченность, а следовательно, и вероятность превышения. При составлении расчетной модели в подавляющем большинстве реальных задач можно лишь указать ориентировочный спектр нагрузок и условий работы конструкции. Предсказать действительную картину нагружений для условий эксплуатации сроком около 100 лет практически невозможно. Выбирая в качестве внешнего пошаговое нагружение, была принята во внимание наиболее высокая вероятность превышения ( $5 \cdot 10^{-2}$ ) как среди проектных нагрузок (см. ниже), так и среди нагрузок, имеющих бесконечно малую вероятность возникновения (падение самолета, взрыв, сейсмическая природа воздействия и т.п.).

Таким образом, создавая расчетную модель с вероятностной природой внешнего воздействия, можно оценить надежность одного сооружения, построенного в разных областях республики, примером может быть ледовая арена в Пружанах, ставшая типовым проектом.

Основой для проведения расчетов – создания математической модели – явилось следующее:

- соответствие расчетной модели действительной работе сооружения, подтвержденное на стадии проектного нагружения тарировкой усилий отдельных элементов, испытаниями на отдельных фрагментах различной формы, проведенными натурными испытаниями. Полученная расчетная (математическая) модель удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными;
- создание конструктивных схем, обеспечивающих резервирование надежности, т.е. таких схем, при которых отказ одного или даже нескольких элементов не означает отказ всей конструкции;
- использование унифицированных элементов (определенного разработанного и протарированного сортамента), которые изготавливаются по совершенной технологии и имеют высокий (гарантированный) уровень надежности;
- проектирование узловых соединений с показателями надежности, значительно большими, чем соответствующие показатели стержневого проката.

В основу предлагаемого подхода была положена вероятностная природа нагрузок и предельной прочности элементов системы, что позволяет добиться требуемого уровня надежности и прогнозировать необходимый запас прочности с учетом эксплуатационных ограничений.

### Конструктивные формы большепролетных пространственных конструкций и оценка параметров их надежности

Прежде чем приступать к рассмотрению отдельных видов форм покрытий, необходимо отметить, что все рассмотренные далее структурированные пространственные системы покрытий являются типичными представителями как определенных архитектурных форм (комбинированных систем на основе плоских структурных плит и оболочек, структурных оболочек сложной формы и переменной кривизны, купольных структурированных покрытий), так и систем с безопасным отказом. Такие системы характеризуются большой степенью статической неопределимости, уменьшающейся с момента образования единичного отказа до полного разрушения. Все конструктивные решения соответствуют архитектурно-планировочным решениям. Расчетные схемы соответствуют требованиям действующих нормативных документов, имеют различный уровень ответственности.

#### Купол здания штаб-квартиры НОК Республики Беларусь в Минске

Район строительства – город Минск. Уровень ответственности – I. Назначение – купол покрытия общественного здания. Коэффициент надежности по назначению  $\gamma_n = 1,2$ . Проект выполнен в 2009 году, в соответствии с действующими нормами и учетом уровня ответственности на стадии выполнения строительного проекта был выполнен расчет на устойчивость к прогрессирующему обрушению.

Купол здания Олимпийского комитета (рис. 2) состоит из трех отдельных стальных конструкций, выполненных с использованием стержневой системы «БрГТУ»:

- первая конструкция представляет собой купол, опирающийся шарнирно на отметке 15,470 м на верхнюю полку стального опорного кольца, заделанного в железобетонную плиту покрытия;
- вторая и третья конструкции – фрагменты купола, расположенные между двумя плитами перекрытия, которые опираются шарнирно на отметке +8,000 м на закладные детали нижней плиты перекрытия и прикреплены листовыми шарнирами на отметке +14,804 м к нижней полке стального опорного кольца, заделанного в верхнюю железобетонную плиту перекрытия;
- диаметр купола на отметке 15,470 м составляет 46,19 м, высота первой конструкции купола – 13,12 м.



Рис. 2. Купол здания Национального олимпийского комитета Республики Беларусь

Конструкции запроектированы в виде двухслойной сетчатой оболочки из стержней с расстоянием между слоями 1640 мм. Внутренняя поверхность оболочки образована вращением кривой, состоящей из двух дуг окружностей с радиусами  $R_1 = 7,07$  м,  $R_2 = 33$  м. Стержневая сетчатая оболочка разбита на ячейки в виде равнобедренных трапеций. Основание трапеций до отметки +22,885 м получено делением окружностей на 58 частей. Выше указанной отметки основания трапеций получены делением окружности на 29 частей. Пояса двухслойной оболочки соединены в пространственную систему стержнями решетки и объединены узловыми элементами системы «БрГТУ». Покрытие запроектировано под остекление, прикрепленное к узловым элементам системы «БрГТУ» на болтах М20 и М24 класса 12.9. Стержни цилиндрической оболочки состоят из бесшовных горячекатаных труб ( $\varnothing 60 \times 4$ ,  $\varnothing 70 \times 4$ ,  $\varnothing 89 \times 5$  по ГОСТ 8732), в торцы которых ввариваются круглые гайки с резьбой М20 либо М24.

#### Структурная оболочка ледового катка в Гомеле

Район строительства – город Гомель. Уровень ответственности – II. Назначение – навес. Коэффициент надежности по нагрузке  $\gamma_n = 1,0$ . Данный проект выполнен в 2008 году, уровень ответственности не требовал расчета на прогрессирующее обрушение. Сооружение было испытано нагружением полной нормативной нагрузкой (рис. 3).

Структурное покрытие, в поперечном разрезе близкое по очертанию к синусоиде, представляет собой единую конструкцию, образованную объединением двух цилиндрических оболочек; опирается нижни-



ми узлами на опорные площадки составных ригелей. Каждый из опорных узлов структуры фиксируется в проектном положении с помощью четырех ребер с использованием монтажной сварки. Ригели выполняются из двух труб сечением  $\text{Ø}273 \times 10$  мм, объединяемых в местах опирания узлов структуры диафрагмами и площадками. Покрытие запроектировано из круглых труб, соединенных полыми шаровыми узлами системы «БрГТУ». Структура имеет диагональные верхнюю и нижнюю поясные сетки с ячейками в виде ромбов. Высота структуры 2400 мм, размер сторон ромбов верхней поясной сетки 2861 мм, нижней – 2733...3053 мм. Стержни состоят из бесшовных горячекатаных труб ( $\text{Ø}73 \times 5$ ,  $\text{Ø}89 \times 5$ ,  $\text{Ø}102 \times 8$ ,  $\text{Ø}114 \times 9$  и  $\text{Ø}121 \times 11$  мм по ГОСТ 8732), в торцы которых ввариваются круглые гайки с резьбой под высокопрочные болты М30. В качестве опорных конструкций были применены пространственные колонны из труб  $\text{Ø}219 \times 10$ ,  $\text{Ø}273 \times 10$ ,  $\text{Ø}402 \times 10$  мм.



Рис. 3. Покрытие ледового катка в Гомеле:  
а – общий вид; б – проведение натуральных испытаний

#### Ледовая арена в городе Пружаны

Район строительства – город Пружаны Брестской области. Уровень ответственности – I. Назначение – структурная плита покрытия ледовой арены. Коэффициент надежности по нагрузке  $\gamma_n = 1,2$ . Проект выполнен в 2007 году, без расчетов на прогрессирующее обрушение. Покрытие ледовой арены (рис. 4) было испытано нагружением полной нормативной нагрузкой, полученные результаты близки к результатам расчетной модели на стадии проектирования.

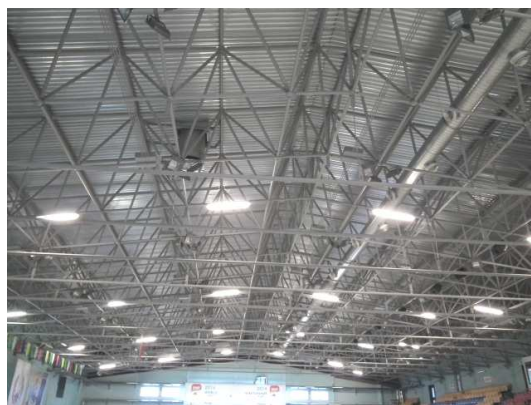


Рис. 4. Покрытие ледовой арены в Пружанах

Данный проект можно назвать типовым, он подтвердил свою надежность, пригодность к эксплуатации и отсутствие ошибок при проектировании. Покрытие с размером в плане 39×63 м запроектировано в виде структурного покрытия из круглых труб, соединенных полыми шаровыми узлами системы «БрГТУ». Структура имеет ортогональную верхнюю и нижнюю поясные сетки. Высота структурной плиты – 3 м, размеры в плане верхней и нижней ячеек поясных сеток – 3×3 м. Стержни несущей пространственной конструкции состоят из бесшовных горячекатаных труб (Ø83×6, Ø108×6, Ø102×10, Ø127×8 мм), в торцы которых свариваются круглые гайки с резьбой для высокопрочных болтов М24, М30 и М36.

**Комплекс спортивно-рекреационного назначения в Москве**

Район строительства – город Москва. Уровень ответственности – Ib. Назначение – комбинированная структурная цилиндрическая оболочка покрытия спортивного комплекса. Коэффициент надежности по ответственности  $\gamma_n = 1,1$ . Проект разработан в 2012 году в соответствии с действующими нормами Российской Федерации с расчетом стойкости к прогрессирующему обрушению (в соответствии с заданием на проектирование).

Покрытие с размерами в плане 65,8×96 м законструировано в виде структурной цилиндрической оболочки с затяжками в опорных узлах; структурная оболочка по крайним продольным осям опирается на монолитные железобетонные балки (рис. 5).

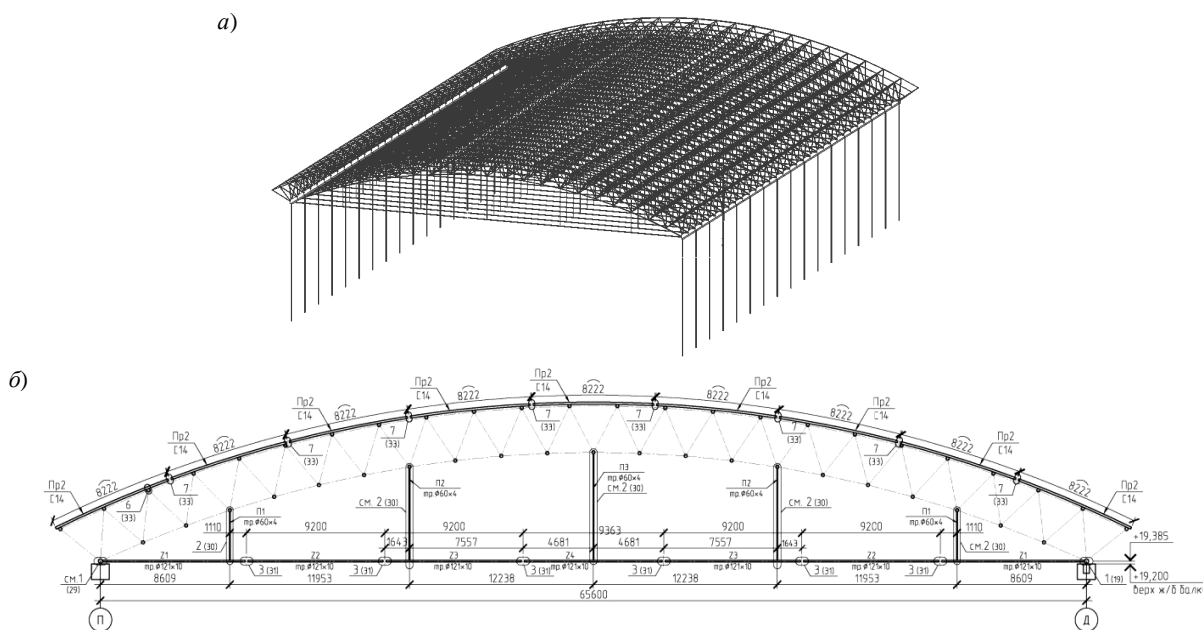


Рис. 5. Расчетная модель (а) спортивного комплекса в Москве, монтажная схема элементов покрытия (б)

Структурная конструкция имеет четырехугольную сетку верхнего и нижнего поясов. Размеры ячеек верхней и нижней поясных сеток составляют 3,185×3,0 и 3,071×3,0 м соответственно. Высота конструкции по осям поясов – 3,0 м. Стержневые элементы структурной оболочки законструированы из бесшовных горячекатаных труб круглого сечения (Ø60×4, Ø83×4, Ø95×4, Ø102×5, Ø127×8, Ø133×10, Ø159×10 мм). В структурной оболочке применены два типа узловых элементов системы «БрГТУ» – с шарами Ø212×16 и Ø280×20 мм, которые соединяются со стержнями болтами М24, М30 и М36. Для восприятия усилий распора в каждый опорный узел структурной оболочки введена затяжка (шаг затяжек – 3,0 м). Затяжки выполнены из бесшовных труб Ø121×10. В пролете затяжка поддерживается пятью подвесками из круглых труб сечением Ø60×4 мм.

**Оценка надежности**

Оценка надежности представленных систем была проведена по методике, апробированной на куполе здания НОК в Минске, цель данного исследования – сравнение характеристик надежности различных конструктивных форм покрытий. Результаты процесса вычисления основных характеристик для удобства сравнения сведены в таблицу. Представляют интерес такие важные показатели, как индексы надежности и вероятности отказа.

Оценивая надежность на стадии проектного нагружения как свойство неповрежденной системы до образования пластических шарниров, показатели на стадии разрушения можно считать показателями живучести с определенным числом накопленных повреждений.

## Результаты расчета основных характеристик

Показатели	Спорткомплекс в Москве	Ледовая арена в Пружанах	Навес катка в Гомеле	Купол НОК в Минске
	Тип покрытия			
	цилиндрическая оболочка с затяжкой	структурная плита с затяжками	изогнутая оболочка	двухслойный сетчатый купол
Уровень ответственности	Иб	I	II	I
Размер покрытия в плане, м	69×96	43×63	49,09×52,6	D = 46,19; h = 13,12
Площадь структурного покрытия, м <sup>2</sup>	6624	2709	3000	6020
Размер ячейки, м	3×3	3×3	3×3	1,48 м <sup>2</sup>
Общее количество стержней	6008	2420	2835	4499
Полная проектная нагрузка, кг/м <sup>2</sup>	423,23	276,7	256	246,8
Проектная снеговая нагрузка, кг/м <sup>2</sup>	1,7	2,1	2,0	3,6
Разрушающая нагрузка, кг/м <sup>2</sup>	568,28	408,7	375	571,8
Коэффициент превышения снего- вой нагрузки при разрушении	k <sub>сн</sub> = 2,1	k <sub>сн</sub> = 2,0	k <sub>сн</sub> = 2,0	k <sub>сн</sub> = 3,6
Количество шарниров при разру- шении (% от общего количества стержней в конструкции)	448 (7,46 %)	188 (7,76 %)	37 (1,3 %)	498 (11,07 %)
Перемещения (проектные/разрушающие), мм	145/214	68/213	66,23/116	22,38/79,42
P <sub>f</sub> – вероятность отказа (нормированные/проектные /разрушающие)	10 <sup>-4</sup> /5,186·10 <sup>-12</sup> / /7,93·10 <sup>-15</sup>	10 <sup>-4</sup> /2,6·10 <sup>-5</sup> / /2,466·10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-4</sup> /1,85·10 <sup>-11</sup> / /1,243·10 <sup>-16</sup>	10 <sup>-4</sup> /2,53·10 <sup>-5</sup> / /7,69·10 <sup>-9</sup>
β – индекс надежности (нормированный/проектный/ разрушающий)	4,3/6,80/7,78	3,8/3,9/4,56	3,8/6,615/8,209	3,8/4,06/5,673
Коэффициент конструктивной безопасности C <sub>к</sub>	1,454	1,478	1,445	2,479
Расход стали кг/м <sup>2</sup>	57,23	40,87	42,02	14,8

С использованием построенной (деформационной) модели рассмотрено силовое сопротивление системы пространственных стержневых конструкций в запроектных состояниях, которые могут быть вызваны внезапным разрушением отдельных элементов системы при превышении прогнозируемого уровня нагружения. По результатам численного расчета построены диаграммы деформирования структурных покрытий в координатах «нагрузка – перемещение» (рис. 6). На диаграммах обозначены области проектного и запроектного нагружения конструкций: ОА – область проектного нагружения; АВ – область запроектного нагружения до появления первого пластического шарнира в стержне структуры; область ВС – накопление пластических шарниров вплоть до момента превращения расчетной модели в изменяемую систему (чаще это происходит при образовании механизмов в отдельных узлах).

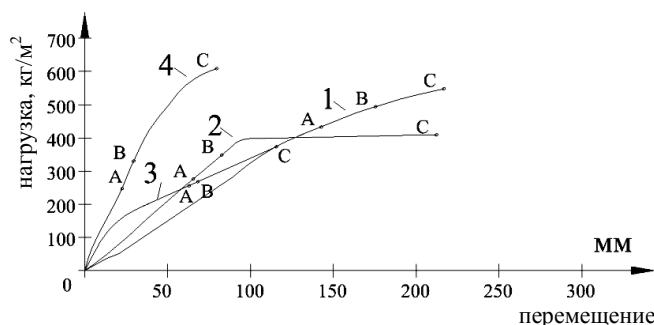


Рис. 6. Деформирование сооружений в координатах «нагрузка – перемещение»:  
1 – спорткомплекс в Москве; 2 – ледовая арена в Пружанах; 3 – навес катка в Гомеле;  
4 – купол здания Национального олимпийского комитета в Минске

Из графика (рис. 6) видно, что все исследуемые системы обладают достаточной жесткостью и даже при превращении таких систем в механизм перемещения удовлетворяют требованиям норм по деформациям. Если проводить сравнение относительных прогибов, то наиболее выгодными/жесткими являются купол (поз. 4) и цилиндрическая оболочка (поз. 1).

Представленная на рисунке 6 диаграмма – процесс накопления повреждений, выраженный ростом перемещений при увеличении скорости образования пластических шарниров. Судя по отсутствию скачков



это деформирование не имеет динамических догрузений за счет потери устойчивости сжатых стержней конструкции. Проведенные исследования показали, что остановка роста нагрузки (не снятие – остановка) обусловлена остановкой роста шарниров, т.е. остановкой накопления повреждений. Интерес представляет промежуток от момента превышения проектной нагрузки (точка А) до момента образования первых пластических шарниров (точка В), составляющий от  $1,1S_n$  до  $1,5S_n$ . Данный график является весьма показательным, одновременно характеризующим и общее число образовавшихся шарниров, и скорость их образования при приложении нагрузки в зависимости от конструктивной формы покрытия.

Анализ накопления повреждений свидетельствует о том, что наибольшая скорость накопления повреждений имеет место в оболочке катка в Гомеле. Покрытие катка имеет сложную форму, по очертанию близкую к синусоиде (см. рис. 3). При такой геометрии накопление повреждений происходит в элементах, находящихся в верхней части. Это происходит вследствие приложения больших снеговых нагрузок в нижней части покрытия, при действии которых ярче проявляется работа структурных конструкций. В остальных же формах покрытий распределение повреждений происходит относительно равномерно (рис. 7), что говорит об отсутствии ключевых элементов.

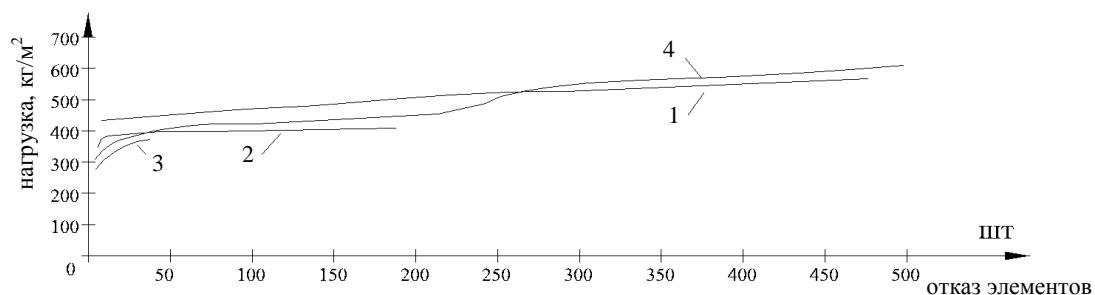


Рис. 7. Скорости отказа элементов (сводный график)

в координатах «узловая нагрузка – число отказавших элементов»:

1 – спорткомплекс в Москве; 2 – ледовая арена в Пружанах; 3 – навес катка в Гомеле; 4 – купол НОК в Минске

#### Общие положения по определению живучести

В статически неопределимых пространственных конструкциях в дополнение к основным положениям расчета по предельным состояниям целесообразно проведение расчета по наиболее вероятным вариантам запроектных воздействий. В качестве такого воздействия принималась снеговая нагрузка, следствием приложения которой было поочередное выключение групп элементов, приводящее к вырождению статической неопределимости. По результатам такого расчета и анализа простейших схем разрушения выявляются элементы и узлы, в наибольшей степени влияющие на живучесть всей конструктивной системы. Исходя из этого предусматриваются конкретные конструктивные мероприятия по резервированию прочности для отдельных, наиболее ответственных за живучесть элементов конструктивной системы. Наиболее точная оценка коэффициента конструктивной безопасности системы при рассмотренных воздействиях может быть достигнута при учете конструктивной нелинейности, связанной с нелинейным деформированием.

Количественная оценка конструктивной безопасности системы при запроектных воздействиях определялась с помощью коэффициента конструктивной безопасности  $C_k$ . Его значение определялось как отношение предельной разрушающей нагрузки (с учетом пластических шарниров и превращения системы в механизм) к полной проектной нагрузке. Важный показатель конструктивной безопасности как фактор влияния конструктивной формы покрытия – это количество накопленных повреждений. Для структурных конструкций этой мерой является число отказавших элементов, чем больше процент стержней, отказавших до полного разрушения, тем дольше будет длиться процесс накопления повреждений с перераспределением усилий.

В составленной расчетной модели посредством превышения снеговой нагрузки определялись стержни, выключившиеся из работы, что обусловило процесс вырождения степени статической неопределимости при превышении нагрузки. Снеговая нагрузка – это лишь наиболее вероятный вариант развития событий. Важно было вскрыть резервы несущей способности, определить ее запасы, дать количественную оценку повреждениям системы.

#### Выводы:

- разработана методика прямого расчета надежности металлических структурных конструкций системы «БрГТУ», основанная на нелинейном расчете элементов вплоть до потери устойчивости сжатых стержней и разрывов растянутых стержней и перераспределения усилий в системе;

- построенная диаграмма деформирования структурных конструкций системы «БрГТУ» дает возможность описать процесс накопления повреждений сооружений и определить уровни запаса несущей способности для всех этапов их проектного и особого нагружения;

- разработана методика прямого расчета вероятности отказа и определения индекса надежности, которая устанавливает критерии живучести структурных конструкций системы «БрГТУ», подвергаемых прогнозируемым воздействиям, и позволяет выполнять оптимизацию элементов конструкции;
- построены графики деформирования системы при действии запроектных нагрузок и скорости выключения стержневых элементов;
- реализация предложенного метода и алгоритма расчета при решении задач проектирования и реконструкции сложных конструктивных структурированных систем покрытий с применением узлового соединения системы «БрГТУ» позволяет вполне обоснованно принимать решения по их защите от прогрессирующего обрушения в предельных состояниях;
- в дополнение к методу расчета конструкций по предельным состояниям I и II групп представляется целесообразным включение раздела, посвященного расчету живучести и обоснованию проектного уровня надежности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Основы проектирования конструкций: ТКП EN 1990. – Минск: Типпроект, 2011. – 137 с.
2. Общие принципы обеспечения надежности строительных конструкций: СТБ ISO2394. – Минск: Типпроект, 2008. – 142 с.
3. Нормы проектирования. Нагрузки и воздействия: СНиП 2.01.07-85 / Госстрой СССР. – М.: ЦНИИП Госстроя СССР, 1986. – 36 с.
4. Общие воздействия. Снеговые нагрузки: ТКП EN 1991-1-4. – Минск: Типпроект, 2009.
5. Manjuinath, K. Reliability based Analysis of Steel Truss Member / K. Manjuinath, S. Kumar // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. – Vol. 2, issue 11, November, 2012. – P. 569 – 572.
6. Jankovski, V. MATLAB implementation in direct probability design of optimal steel trusses / V. Jankovski, J. Atkociunas // МЕХАНИКА, 2008, № 6(74). – P. 30 – 37.
7. Moghads, R. Reliability assement of structure by Monte-Carlo Simulation and neural networks / R. Moghads, M. Fadee // Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing). – 2012. – Vol. 13, № 1. – P. 79 – 88.
8. Borkovski, A. On reliability analysis and optimization of plastic plane frames / A. Borkovski, K. Sikorski // Rozprawy Inzynierskie. – 1985, 33. – P. 311 – 312.
9. Пичугин, С.Ф. Надежность стальных конструкций производственных зданий: моногр. / С.Ф. Пичугин. – М.: Изд-во АСВ, 2011. – 456 с.
10. Аугусти, Г. Вероятностные методы в строительном проектировании / Г. Аугусти, А. Баратта, Ф. Каштиани; пер. с англ. Ю.Д. Сухова. – М.: Стройиздат, 1988. – 584 с.
11. Лычев, А.С. Надежность строительных конструкций: учеб. пособие / А.С. Лычев. – М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2008. – 184 с.
12. Дереченник, С.С. Автоматизация картографирования в задачах долгосрочного климатического прогнозирования / С.С. Дереченник, А.В. Дмитриева // Вестн. БрГТУ. – 2010. – № 5(65): Физика, математика, информатика. – С. 44 – 48.

Поступила 17.06.2013

#### CALCULATION OF RELIABILITY OF METAL STRUCTURAL CONSTRUCTION OF A SYSTEM

V. DRAGAN, V. TUR, N. MORILOVA, A. DMITRIEVA

*Calculation of reliability of metal structural construction of a system is shown, particularly of large-span spatial metal constructions of coverage. The task of direct evaluation of reliability of a complex spatial construction system when using DPD-method is considered, for which the functions of influence, connecting actions and their effects, are set on the basis of non-linear calculations with the usage of the method of finite elements. The methodology of research of the reliability parameters of structural constructions of “BSTU” system is proposed. Constructional forms of large-span spatial constructions and evaluation of the parameters of their reliability are analyzed.*