

Таблица 1

Лазерное сканирование		Фото сканирование	
Наименование оборудования и программного обеспечения	Стоимость, бел. руб.	Наименование оборудования и программного обеспечения	Стоимость, бел. руб.
Лазерный сканер	115000000 ÷345000000	Фотоаппарат	807500 ÷4250000
Программное обеспечение	114750÷32350000	Программное обеспечение	0÷29750000
Фотоаппарат	2250000÷18232800	Видеокарта с поддержкой технологии CUDA*	2175000 ÷8700000

* - данный пункт можно не учитывать, но при наличии такового, скорость расчетов можно сократить от 100 до нескольких тысяч раз

Последним нашим результатом стало получение фрагмента угла здания в размере – 122 000 000 полигонов, что спровоцировало перезагрузку драйвера видеокарты компьютера. Это был лишь один небольшой фрагмент. Метод оптимизации, который заключается в пересчете геометрии путем уменьшения числа полученных полигонов, не подходит ввиду стилизации геометрии и потери точности, ради которой и велись все работы по ее получению.

Было решено отказаться от процесса полигонизации, как физически устаревшем и аппаратно невозможным для таких массивов данных, даже для мощных серверных станций. Сейчас идут работы над накоплением графического материала в виде облаков точек и сохранения их для будущего, когда станет возможно их прочитать в единую геометрию и посадить их на игровой движок, как этого и требовала задача. Идет интенсивная работа по сканированию памятников архитектуры, парков, руин и т.д., а также архивация сооружений и значимых местностей, упорядочивание их и создание архитектурных каталогов, которые в недалеком будущем обретут свой объем и предстанут перед научной общественностью, а также для всего общества в целом. Представление трехмерной информации в таких облаках насчитывает миллиарды точек, планируется увеличить их в разы. На данный момент храним записи в обычном текстовом файле в виде шести параметров: трех координатных (x, y, z) и трех цветовых (RGB), следовательно, считать информацию будет очень легко. Подтверждением может послужить уже написанный нами модуль для UNITY, позволяющий беспрепятственно считывать всю информацию с наших файлов в свою среду.

Альтернатива полигональной системы, отображения архитектурных объемов заключается в воксельном представлении. Именно с помощью вокселей, а не полигонов логичнее представить наш

проект. Так как с точки зрения воксельной компьютерной графики воксел – это минимальный объемный элемент трехмерного компьютерного изображения. Проще говоря, воксел – это и есть точка, ровно как и в природе все состоит из атомов. Кроме того, воксельная система безгранична и не имеет лимита по объемам геометрии. Воксельный движок может оптимизироваться и, в отличие от полигонального, не отображает один пиксель размером в миллионы полигонов, как это решено в полигональных движках, а один пиксель – это и есть всего лишь одна точка. Написав воксельный оптимизатор в виде восьмеричного дерева, в котором можно будет хранить нашу геометрию, мы сможем скомпрессировать наш файл. Осталось создать конвертор для перевода нашего облака точек в воксельный формат. На сегодняшний день это последнее препятствие, которое, в скором времени, ровно как и все остальные, тоже решится. Вся работа основана на апостериори.

Заключение. Предстоит проделать еще немало работы для завершения проекта. Но сам проект предполагает открытый ресурс нового источника информации, который будет нести в себе как архивно-инвентаризационный характер, так и научно-публицистический. Предполагается сделать проект доступным онлайн, тем самым создать виртуальный туризм, расширить всеобщий культурный кругозор. Фиксация не только памятников архитектуры, но и паркового ландшафта или мест археологических раскопок, позволят расширить количество наук изучающих данное направление. А сравнение сканов различных временных интервалов позволит вести мониторинг изучаемых объектов и, следовательно, по результатам изменений производить те или иные выводы, а также принимать меры по сохранению.

Материал поступил в редакцию 09.04.12

MALKOV I.G. KONYAEV P.N. Development of advanced monitoring architecture monuments

The essence of the problem is to track metamorphosing the face of the building in the context of both first-time as well as change its functions, which caused the first and covered the approaches and related technologies. With the possibility of a detailed study in the future of each item. The work done in the future will serve as a basic material for future scientific research, discovery and dissertations of many scientists.

It was decided to abandon the process of polygonization physically obsolete hardware and impossible for such data sets, even for powerful server stations.

Alternative polygonal system, display of architectural volumes is the voxel representation. It is by means of voxels instead of polygons logical to present our project.

There is still not enough work to complete the project. But the open source project includes a new source of information, which will carry both archival - inventory nature and science – a publicist. Supposed to make the project available online, thereby creating virtual tourism, expand universal cultural experience. Commit not only monuments but also park landscape or archaeological sites, will expand the number of science students this direction. A comparison of scans of different time intervals, allowing for the monitoring of the object under study, and therefore, the results of the changes to make certain conclusions, as well as for the conservation.

УДК 624.014.27

Драган В.И., Тур В.В., Морилова Н.Л., Дмитриева А.В.

ОЦЕНИВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ СИСТЕМЫ «БРГТУ» НА СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МЕТОДОМ ПРЯМОГО РАСЧЕТА ВЕРОЯТНОСТИ ОТКАЗА

1. Постановка задачи. В соответствии с базовым требованием п.2.1(Р) ТКП EN1990 [1] строительные конструкции следует проекти-

Драган Вячеслав Игнатьевич, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры строительных конструкций Брестского государственного технического университета.

Тур Виктор Владимирович, профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой технологий бетона и строительных материалов Брестского государственного технического университета.

Морилова Наталья Леонидовна, преподаватель кафедры строительных конструкций Брестского государственного технического университета.

Дмитриева Анна Владимировна, аспирант кафедры «ЭВМ и системы» Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

Строительство и архитектура

ровать 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, сконцентрированными выражением подхода к проектированию по методу предельных состояний. В рамках СТБ ISO2394[2] и ТКП EN1990 [1] проверки предельных состояний для обеспечения соответствия назначенному уровню надежности, определенному в приведенных выше документах, в терминах целевой или допустимой вероятности отказа и связанного с ней индекса надежности ($P_F = \Phi(-\beta)$), следует выполнять с использованием:

- 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 полувероятном 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 оценивания безопасности сложных статически неопределимых конструктивных систем, в частности стальных пространственных конструкций [5–6]. При этом прямой вероятностный расчет (DPD) применяют, как правило, для решения задач двух типов, основных 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 следующие общие условия:

$$\text{найти } \min L^T, A_0 \tag{1}$$

$$\text{при условии: } [A] \cdot N = \mu_F \tag{2}$$

$$\beta(A_0 N) \geq \begin{cases} \beta_{O_r} & N \geq 0 \\ \beta_{O_c} & N < 0 \end{cases} \tag{3}$$

$$A_0 \geq A_{0,min} \tag{4}$$

В выражениях (1)–(4):

L – вектор-столбец элементов конструктивной системы;

A_0 – вектор площадей поперечных сечений для элементов пространственных конструкций;

$\beta(\cdot)$ – вектор расчетных индексов надежности для отдельных элементов;

β_{O_r}, β_{O_c} – целевые значения индексов надежности (β_{tag} по ТКП EN1990 [1]) для растянутых и сжатых стержней.

В общем случае при решении задач, как первого, так и второго типа, необходимо установить соответствующие функции распределения вероятностей, как для сопротивлений отдельных элементов, так 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), прочность стали, выраженную пределом текучести ($R_{y,i}$), геометрию поперечного сечения элемента, представляемую площадью поперечного сечения (A) и моментами инерции I_i . Стоха-

стические 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:

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

Функция состояния может быть представлена в виде:

$$G_k = q(A_{O,K}, I_K, I_K, R_{y,k}, E_k, N_k) = \tag{6}$$

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

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

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

$$I = \min\{J_y, J_z\} \tag{9}$$

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.

В настоящей статье на примере купола покрытия НОК РБ рассматривается задача 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.

2. Оценивание надежности конструкции купола покрытия Национального олимпийского комитета (НОК) Республики Беларусь в г. Минске

2.1. Этапы моделирования. Прямая вероятностная оценка надежности пространственной конструкции была выполнена на примере купольного покрытия штаб-квартиры НОК РБ в г. Минске.

Конструкция запроектирована в виде двухслойной сетчатой оболочки из структурной системы «БрГТУ» с расстояниями между поясами 1640 мм. Внутренняя поверхность оболочки образована вращением кривой, состоящей из двух дуг окружностей с радиусами $R_1=7,07$ м, $R_2=33$ м. Купол НОК является покрытием офисного здания, соответствующего классу надежности RC2 [1].

При проектировании в соответствии с [3] применяли следующие нагрузки:

1. Постоянные:

- собственный вес элементов оболочки купола;
- вес остекления;
- вес технологического оборудования.

2. Переменные:

- снеговая нагрузка для двух схем нагружения, в соответствии с [4] (см. рис. 1).

При выполнении нелинейных расчетов конструктивной системы переменная снеговая нагрузка моделировалась пошаговым нагружением с величиной этапа, равной $k=0,1q$ (от достижения проектного значения нагрузки от снега до момента достижения системой предельного состояния несущей способности).

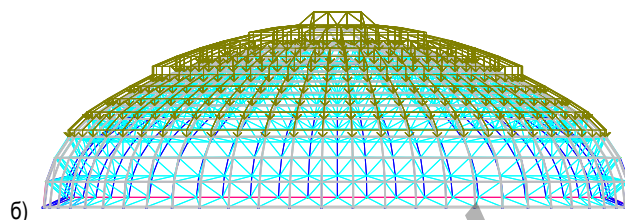
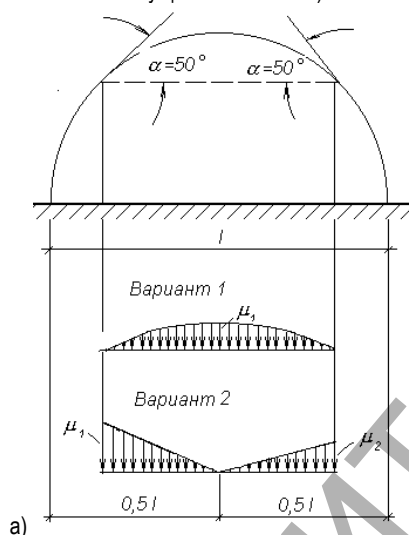


Рис. 1. Загружение купола снеговой нагрузкой

В процессе приложения нагрузок при проведении линейного расчета с заданной величиной расчетной нагрузки наиболее важным является величина и характер приложения, нежели длительность ее приложения и ее природа.

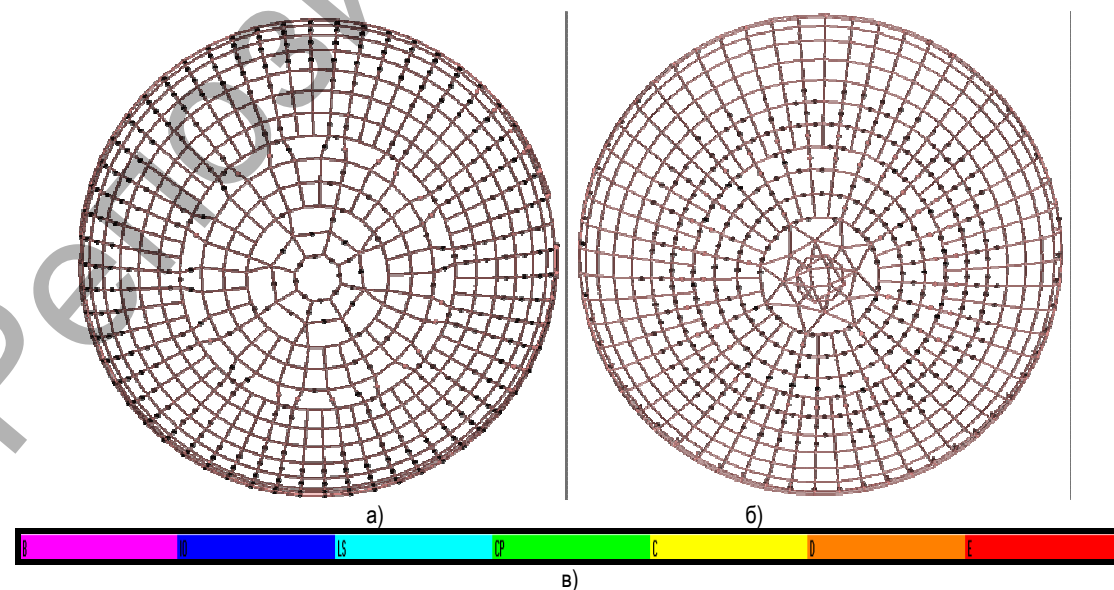
Проверка надежности конструктивной системы включала следующие основные этапы:

Этап 1. Выполнение линейного статического расчета с использованием конечно – элементного комплекса при действии проектных нагрузок и их сочетаний, проверка / подбор сечений отдельных конструктивных элементов;

Этап 2. Выполнение нелинейного расчета конструктивной системы при пошаговом увеличении переменной нагрузки. Для выполнения нелинейных расчетов в конструктивные элементы производили врезку пластических шарниров. Пластические шарниры обеспечивали возможность расчета всех элементов структурной конструкции в физически и геометрически нелинейной постановке. Для моделирования пластических шарниров задавали полные диаграммы деформирования стали и зависимости, устанавливающие взаимосвязь между усилиями в стержнях и линейными перемещениями, описывающими сближение или удаление концов элемента при сжатии или при растяжении соответственно.

Результаты нелинейных расчетов приведены в таблице 1. Этап 3. Выполнение нелинейных расчетов при повторном нагружении – разгрузении системы. Зная величину предельной нагрузки, найденную на этапе 2, можно создать «историю нагружения», снимая нагрузку с любого шага и разгружая систему до собственного веса, при необходимости нагружая ее повторно. Этот этап является весьма важным, т.к. он дает ответы на многие вопросы, которые не удалось решить ранее:

- до какого шага нагружения можно снять нагрузку так, чтобы система работала упруго, и при каких нагрузках в стержнях образуются шарниры;
- какова величина остаточных деформаций для любого шага нагружения;



а) повреждения элементов верхнего пояса купола, б) повреждения элементов нижнего пояса купола, в) цветовая шкала степени развития шарнира в исследуемом элементе 1

Рис. 2. Образование пластических шарниров в стержнях купола при узловой нагрузке – 8,88 кН

Таблица 1

№ шага нагружения	Тип нагрузки	Величина нагрузки на текущем этапе, кН/уз	Общая величина нагрузки, кН/уз	Кол-во пластических шарниров в.п. (на данном шаге/общее)	Кол-во пластических шарниров в.п. (на данном шаге/общее)	Общее число шарниров	Перемещения в.п. мм
1	Обр. системы	-	-	-	-	-	-
2	С.вес	Программно 0,40	0,40				-2,277
3	Остекление	0,72	1,12				-7,683
4	Оборудование	0,60	1,72				-12,24
5	Снег-проектная	1,86	3,58				-22,38
6	0,1·снег	0,186	3,766				-23,39
7	0,1·снег	0,186	3,952				-24,41
8	0,1·снег	0,186	4,138				-25,42
9	0,1·снег	0,186	4,324				-25,67
10	0,1·снег	0,186	4,510	4/4	-	4	-27,45
11	0,1·снег	0,186	4,696	1/5	-	5	-28,57
12	0,1·снег	0,186	4,882	3/8	-	8	-29,75
13	0,1·снег	0,186	5,068	-/8	3/3	11	-30,95
14	0,1·снег	0,186	5,254	-/8	-/3	11	-32,17
15	0,1·снег	0,186	5,440	1/9	-/3	12	-33,39
16	0,1·снег	0,186	5,626	9/18	7/10	28	-34,61
17	0,1·снег	0,186	5,741	7/25	7/17	42	-35,87
18	0,1·снег	0,186	5,898	3/28	20/37	65	-37,20
19	0,1·снег	0,186	6,084	5/33	33/70	103	-38,70
20	0,1·снег	0,186	6,270	7/40	15/85	125	-40,39
21	0,1·снег	0,186	6,456	11/51	39/124	175	-42,17
22	0,1·снег	0,186	6,642	7/58	50/174	232	-44,09
23	0,1·снег	0,186	6,828	2/60	1/175	235	-46,13
24	0,1·снег	0,186	7,014	2/62	2/177	239	-48,17
25	0,1·снег	0,186	7,200	5/67	2/179	246	-50,22
26	0,1·снег	0,186	7,386	5/72	-/179	251	-52,29
27	0,1·снег	0,186	7,572	5/77	2/181	258	-54,37
28	0,1·снег	0,186	7,758	8/85	8/189	274	-56,11
29	0,1·снег	0,186	7,944	14/99	23/212	311	-58,78
30	0,1·снег	0,186	8,130	16/115	15/227	342	-61,41
31	0,1·снег	0,186	8,316	19/134	21/248	382	-64,30
32	0,1·снег	0,186	8,502	15/149	5/253	402	-67,74
33	0,1·снег	0,186	8,688	31/180	5/258	438	-72,20
34	0,1·снег	0,186	8,874	41/221	17/275	496/498*	-79,42

* - общее число шарниров, включая шарниры в раскосах
 Исследование производилось в пределах «ремонтпригодности» системы, т.е. до тех пор, пока вертикальные перемещения не превысят предельно допустимые согласно [3]

- величину разрушающей нагрузки при повторных нагружениях (она может отличаться от величины, найденной на этапе 2).

Этап 4. Прямой расчет величины вероятностей отказа и индексов надежности для отдельных элементов и системы в целом.

Как показали результаты нелинейных расчетов, наиболее важными являются шаги в начале образования шарниров и при достижении предельного состояния системы (см. рис. 2). Можно отметить, что скорость образования пластических шарниров в элементах верхнего пояса при увеличении нагрузки возрастает, а нижнего пояса – замедляется, при этом в раскосах образуется всего по два пластических шарнира в районе дверных проемов купола. Предельное состояние системы достигается при превращении ее в механизм: система становится геометрически изменяемой при превышении снеговой нагрузки почти в 3,9 раза выше общей проектной.

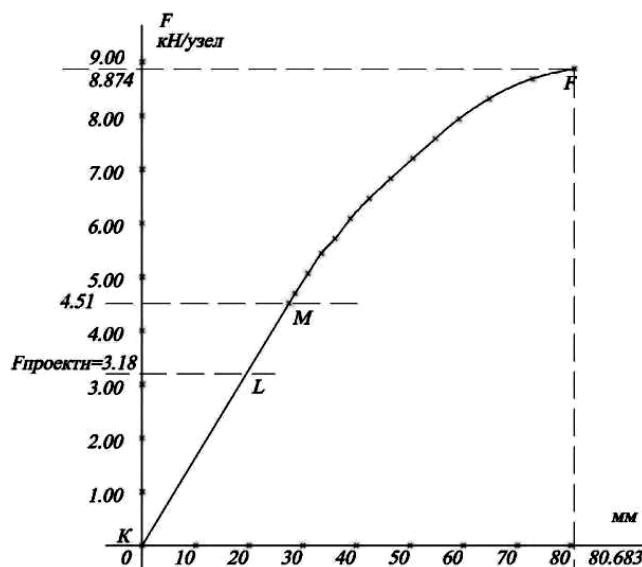


Рис. 3. Зависимость «узловая нагрузка на узел – перемещение центральных узлов купола» по результатам нелинейного расчета

По результатам численного эксперимента была построена диаграмма деформирования купола покрытия здания НОК в координатах «нагрузка на узел – максимальные перемещения центральных узлов купола» (рис. 3).

Анализируя полученный график, можно установить следующие участки деформирования сооружения. Участок диаграммы KL- работа конструктивных элементов купола в области проектных нагрузок, участок LM- работа конструкций до начала образования первых пластических шарниров в стержнях системы (как видно из графика, показанного на рис. 3, начало образования пластических шарниров было достигнуто при превышении полной проектной нагрузки в 1,41 раза). Участок MF иллюстрирует процесс накопления повреждений в результате искривления сжатых стержней и пластического деформирования растянутых стержней, что приводит к появлению остаточных деформаций в куполе.

Как показали расчеты, для исследуемой системы, состоящей из 4949 стержневых элементов, при достижении предельного состояния исчерпали несущую способность 498 стержней. При этом предельная узловaя нагрузка составила 8,88 кН, по сравнению с проектной – 3,18 кН.

Как видно из результатов расчета (таблица 1), на шаге 10 первые шарниры образуются в стержнях верхнего пояса, т.е. после шага 10 рассматривается поврежденная система.

2.2. Определение величины вероятности отказа и индекса надежности структурной конструкции купола НОКа. Прямой расчет вероятностей отказа и индексов надежности можно, в свою очередь, подразделить на следующие характерные этапы (см. раздел 1):

- составление функции сопротивления для элементов конструктивной системы;
- установление функции влияния, связывающей эффекты от воздействий со значениями воздействий;
- нахождение прямым расчетом вероятностей отказа и индексов надежности.

Как видно по ряду работ, величина отказа системы напрямую зависит от величины отказа каждого из отдельных элементов. Под отказом в данной конкретной задаче понимают образование в конкретном элементе пластического шарнира, что характеризует наступление предельного состояния несущей способности с последующим выключением его из расчетной схемы при снижении в нем усилия до нуля.

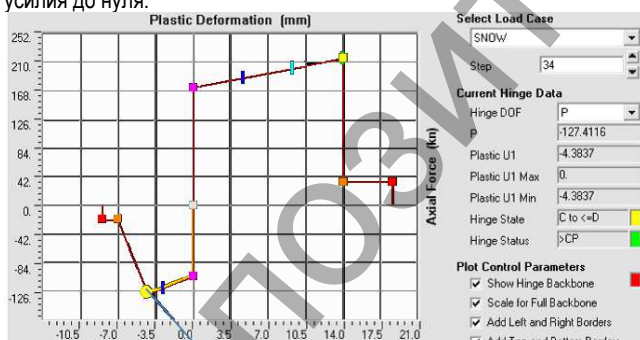


Рис. 4. Диаграмма деформирования элемента в момент исчерпания его несущей способности, точка 1 соответствует напряженно-деформированному состоянию стержня в момент потери устойчивости

В качестве исследуемого элемента был принят элемент пояса с образовавшимся пластическим шарниром (см. рис. 2, поз. 1) со следующими характеристиками: $l=2\text{м}$, $\varnothing 60\text{мм}$, $\bar{\sigma}=4\text{мм}$.

Введем некоторые обозначения для дальнейшего удобства в описании расчетов:

$R_y(x)$ – расчетное сопротивление стали;

$N_{cr}(x)$ – критическое (предельное) усилие, которое может принять элемент;

$N_{действ}(x)$ – действующее усилие в элементе в процессе загрузки от действия узловой нагрузки;

$Q_{действ}(x)$ – действующая узловaя нагрузка в процессе загрузки;

P_i – вероятность наступления какого-либо события (в нашем случае под событием понимаем внешнее воздействие на систему – снеговая нагрузка).

На начальном этапе вычисляются так называемые «входные» параметры системы.

Наиболее значимой составляющей, оказывающей влияние на несущую способность элемента, является расчетное сопротивление стали.

Функцию сопротивления, описывающую несущую способность сжатого стержня $R[x]=N$, при $N = \gamma \cdot \varphi \cdot A \cdot R_y$. В качестве основной базисной переменной будем рассматривать предел текучести стали R_y , остальные параметры расчетной модели сопротивления считаем детерминированными. Представляем предел текучести стали нормальным законом распределения со средним значением $R_{y,m}=260$ МПа и стандартным отклонением $\sigma_{R_y}=20$ МПа. $R_y \in N(260\text{МПа}; 20)$.

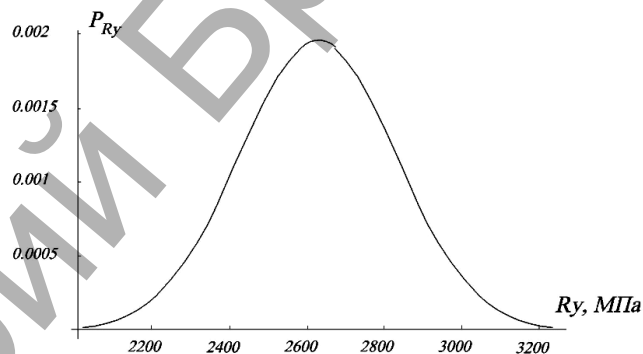


Рис. 5. Нормальное распределение сопротивления стали 20 по ГОСТ 8731-87*

При необходимости аналогичным образом дополнительно можно учесть вариации значений других базисных переменных, принятых в функции сопротивления для определения критической силы.

Закон распределения прочности стали

$$P[R_y] = \frac{1}{200\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(2600 + R_y)^2}{80000}\right]. \quad (10)$$

Это распределение (нормальное) наиболее часто используется для описания распределений прочности материалов и конструкций.

Получив функцию распределения расчетного сопротивления стали и ее график, с максимумом в середине подставляем ее для нахождения максимальной критической силы, которую может воспринять исследуемый элемент.

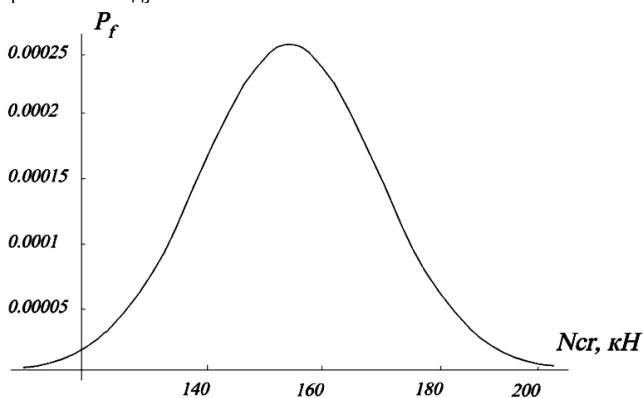


Рис. 6. Функция распределения плотности вероятности для сопротивления (критической силы) в сжатом стержне

Выходными параметрами являются $N_{cr}=141,29$ кН, стандартное отклонение $\sigma_{N_{cr}}=9,54$ кН и функция $y(x)$ с распределением:

$$P[N_{cr}] = \frac{1}{N_{cr}} 4,11 \exp[-53,09(-9,64 + \text{Log}N_{cr})^2] \quad (11)$$

Законы распределения сопротивления стали и распределения предельного усилия являются параметрами (функциями) самой системы. Далее находим параметры воздействия на систему.

Данная модель была рассчитана на несколько вариантов сочетаний нагрузок, точнее на этапе 1 было составлено несколько расчетных моделей.

Для исследования сооружения была использована модель с сочетанием снеговой нагрузки, приложенной по схеме варианта 1 (рис. 1).

Каждая из нагрузок была представлена случайными величинами с совместным рассмотрением максимумов. При этом принято допущение, что все прикладываемые расчетные нагрузки обладают равной обеспеченностью.

Доминирующей среди внешних воздействий была принята снеговая нагрузка, определяемая для периода повторяемости 50 лет.

На территории Беларуси встречаются три различных типа вероятностных распределений снеговой нагрузки Гумбеля (тип I), Фреше (тип II) и Вейбулла (тип III)[4, 12]. Были проведены расчеты для всех областных центров. В статье показан расчет на примере г. Минска.

Учитывая расположение исследуемого объекта (г. Минск), строим диаграмму вероятности распределения снеговой нагрузки для исследуемого региона.

$Wf[q] = a \cdot b \cdot q^{b-1} \cdot \text{Exp}[-a \cdot q^b]$ Для Минска $a=0,000287$, $b=1,7999$

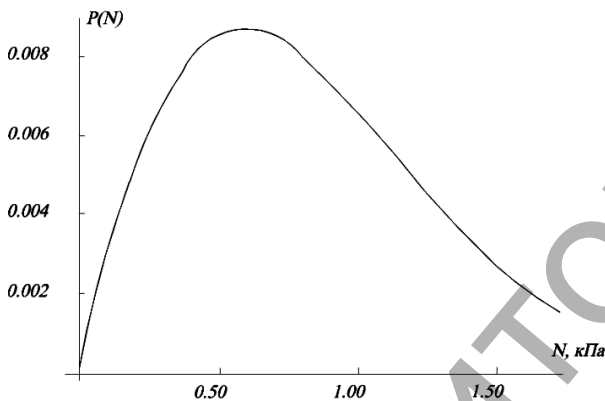


Рис. 7. Реализация распределения величины нормативной снеговой нагрузки за базовый период (T=50 лет)

Результатом исследования функции влияния, представляющей связь внешних нагрузок и внутренних усилий параметров системы, является определение вероятности распределения усилия в элементе от внешнего воздействия.

Функция влияния, связывающая величину усилия в анализируемом элементе и величину узловой нагрузки (см. рис. 8), по результатам расчета купола получена в виде:

$$N(Q_{действ}) = 2990 + 20 \cdot Q_{действ} \quad (12)$$

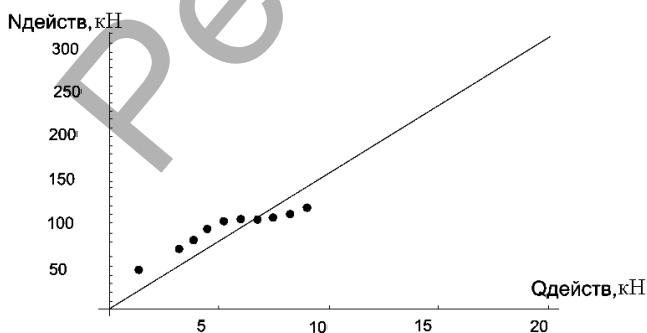


Рис. 8. Расчетные значения усилия, выраженного через внешнее воздействие

Из графика, показанного на рис.8, видно, что полученная зависимость не является линейной на всем протяжении графика. Если полученный набор точек сопоставить с графиком на рис. 3, можно предположить, что нелинейные свойства системы (нелинейная или непропорциональная связь между усилиями и перемещениями) проявляется на конечных этапах нагружения.

Вероятность отказа элемента определяем как вероятность одновременного наступления двух событий: вероятность того, что возникнет определенная величина внешнего воздействия и вероятность того, что усилие в исследуемом элементе от этого внешнего воздействия окажется разрушающим (рис. 8) $P(x) = P_E \cdot P_R$.

На рис. 9 показаны функции распределения для сопротивления элемента и соответствующего эффекта воздействия, полученные по результатам статического моделирования. На левой части графика (см. рис. 9) показана вероятность возникновения усилия в элементе (в составе системы) от внешней нагрузки, как следствие, распределенная по Гумбелю. Правая часть графика (см. рис. 9) – функция распределения сопротивления (несущей способности) элемента.

По результатам анализа графика предельного состояния была построена зависимость (рис. 10) индекса надежности / вероятности отказа.

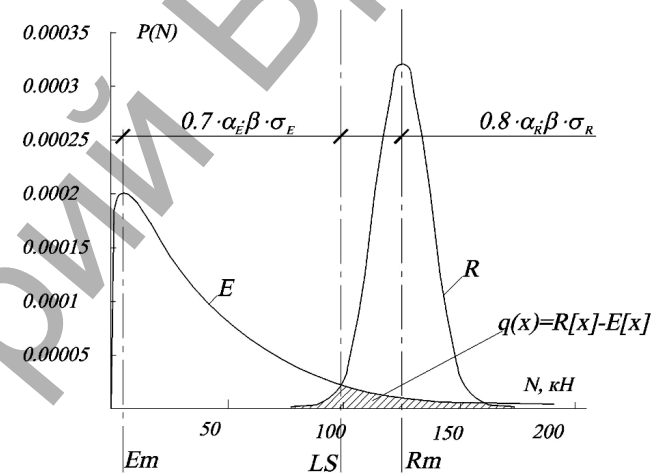


Рис. 9. График предельного состояния системы (LS – LimiteState – предельное состояние системы)

Вероятность отказа элемента 1 и индекс надежности удобно представлять как в виде графика (рис. 9), так и на отдельных этапах по (табл. 2).

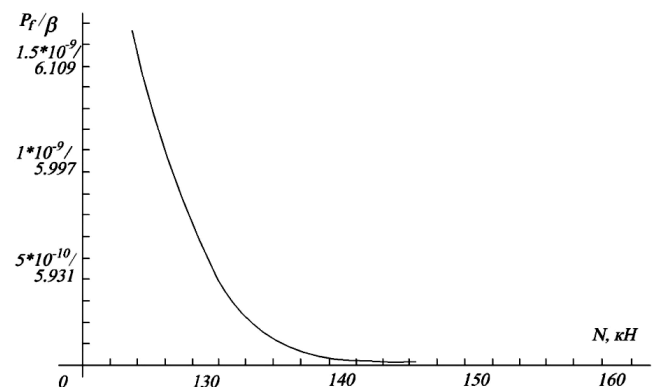


Рис. 10. Зависимость вероятности отказа и индекса надежности от усилия, возникаемого в элементе 1 от внешнего воздействия

Значения индекса надежности и вероятности отказа на различных этапах нагружения

Таблица 2

β	P_f	Этап нагружения
7,560	$2,00255 \cdot 10^{-14}$	Проектная нагрузка
6,065	$6,5696 \cdot 10^{-10}$	образование шарнира
5,967	$1,204 \cdot 10^{-9}$	потеря устойчивости стержня
3,8	10^{-4}	Нормируемые значения*

* - значения, принятые для класса RC2, в соответствии с [1]

Необходимо отметить, что показатели β и P_f рассчитаны для уже поврежденной системы (системы с образованием шарниров), на таких этапах нельзя говорить только о надежности системы, необходимо рассматривать еще и живучесть.

График на рисунке 10 представляет изменение индекса надежности / вероятности отказа в зависимости от величины усилия в отдельном элементе системы. Дальнейшее исследование искомых величин зависит от геометрии системы (количества и типа соединяемых элементов, формы покрытия, количества отказавших элементов).

2.3 Определение величины отказа системы НОК и индекса надежности. Как следует из результатов расчета, отказ в работе одного элемента совсем не означает, что система неработоспособна, что она вошла в состояние отказа. Однако количество отказавших элементов в любой системе, даже такой, как рассматриваемый купол, не может быть неограниченным. В связи с этим в таких системах за меру отказа удобно принимать количество элементов, находящихся в состоянии отказа. Причем это количество для каждого здания будет разным и довольно легко может быть установлено по конкретной расчетной схеме.

Поэтому при определении количества отказов системы в целом важное значение имеет количество параллельно и последовательно соединенных элементов. Более выгодным является параллельное. Класс структурированных пространственных конструкций относится к отдельному, еще более выгодному типу, это системы с так называемым «безопасным» отказом, где в системе отсутствуют ключевые элементы и отказ даже нескольких стержней не является критическим для всего сооружения.

Все вышесказанное дает право говорить об отсутствии ключевых элементов и возможности нахождения индекса надежности не для отдельного элемента, а для системы в целом.

Согласно [1], купол НОК относится к системам «с безопасным отказом». В конструкциях такого типа, при реализации условия достижения предельного состояния в какой-либо точке или элементе системы, происходит перераспределение напряжений и конструкция способна воспринимать дальнейшее увеличение нагрузки. Для такой системы случайная изменчивость предельной нагрузки становится бесконечно малой с увеличением числа элементов.

В предыдущем разделе была найдена вероятность отказа отдельного элемента на различных этапах нагружения в составе системы. Как было отмечено, необходимо рассматривать надежность системы на этапе с приложением проектной нагрузки и при приложении запроектной нагрузки.

При приложении проектной нагрузки надежность системы может быть найдена через общее число элементов (ввиду отсутствия пластических шарниров) по самым низким показателям. Самыми низкими показателями будут данные рассчитанного примера, т.к. в качестве примера был рассчитан наиболее нагруженный элемент с первым образовавшимся шарниром в системе. Тогда надежность си-

стемы при проектной нагрузке по данным таблицы 2

$$P_{сум} = (1 - P_1)^n = (1 - 2,00255 \cdot 10^{-14})^{4949} \rightarrow 1, \quad (13)$$

где n – общее число элементов системы,

P_1 – вероятность отказа первого элемента при проектной нагрузке.

Гораздо больший интерес вызывают характеристики надежности в момент разрушения. Не совсем корректной представляется оценка надежности всего сооружения по первому стержню на этапе разрушения. По данным таблицы 1 видно, что с 10 по 34 шаг образуется 498 шарниров, соответственно для каждого этапа будут разные показатели надежности, и чем больше шаг между этапами, тем больше разница в математическом выражении.

Разделим время образования шарниров на 6 этапов, а количество отказавших элементов на 6 групп. Данные сведем в таблицу 3.

Теперь по результатам исследования можем найти вероятность неразрушения системы [11]:

$$P_{сум} = (1 - P_{1\text{эп}})^{n_1} (1 - P_{2\text{эп}})^{n_2} \dots (1 - P_{i\text{эп}})^{n_i} = 0,999999981. \quad (14)$$

Данная величина находится в пределах погрешности (менее 0,1%).

Вероятность того, что действующая нагрузка составит более 8,88 кН/узел (превысит полную расчетную в 2,846 раза) и при этом откажут 498 стержней с изменением расчетной схемы, стремиться к нулю, а индекс надежности намного превышает нормируемый [1].

Для других типов сооружений, форм покрытий необходима другая детальная проработка данного метода.

Однако нельзя говорить, что данный метод не имеет недостатков. Основным и, пожалуй, единственным недостатком является следующее: вероятность наступления событий (в нашем случае нагрузки) была взята для снеговой нагрузки, доля которой в составе общего нагружения не превышает 60–70 % от полной проектной величины, что дает определенную, но допустимую погрешность.

Заключение. Проведенные исследования купола НОК в г. Минске позволяют сделать выводы:

1. 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.
2. Построение диаграммы деформирования структурных конструкций системы «БрГТУ» дают возможность описать процесс накопления повреждений сооружений и определить уровни запаса несущей способности для всех этапов их проектного и особо нагружений.
3. 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.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Основы проектирования конструкций: ТКП EN 1990. – Мн.: Типпроект, 2011 – 137с.
2. Общие принципы обеспечения надежности строительных конструкций: СТБ ISO2394. – Мн.: Типпроект, 2008 – 142 с.

Таблица 3

	1 этап (шаг 10)	2 этап (шаг 15)	3 этап (шаг 20)	4 этап (шаг 25)	5 этап (шаг 30)	6 этап (шаг 33)
β	5,967	6,057	6,3758	6,467	6,491	6,70046
P_f	$1,204 \cdot 10^{-9}$	$6,905 \cdot 10^{-10}$	$9,10042 \cdot 10^{-11}$	$4,975 \cdot 10^{-11}$	$4,2592 \cdot 10^{-11}$	$1,0382 \cdot 10^{-11}$
Функция влияния воздействия	2990+20N	2700+20N	2230+20N	1900+20N	1900+20N	1900+20N
Кол-во шарниров	4	7	92	136	117	142

3. Нормы проектирования. Нагрузки и воздействия: СНиП 2.01.07-85. / Госстрой СССР. – М.: ЦНИТП Госстроя СССР, 1986. – 36 с.
4. Общие воздействия. Снеговые нагрузки: ТКП EN 1991-1-4. – Мн.: Типпроект, 2009.
5. Manjunnath, K. Reliability based Analysis of Steel Truss Member / K. Manjunnath, S. Kumar // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering – Vol. 2, issue 11, November, 2012 – P. 69–572.
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). – Vol. 13. – №1(2012) – P. 79–88.
8. Borkovski, A. On reliability analysis and optimization of plastic plane frames / A. Borkovski, K. Sikorski // Rozprawy Inzynierskie, 1985. – P. 311–312.
9. Пичугин, С.Ф. Надежность стальных конструкций производственных зданий: монография. – М.: Издательство АСВ, 2011. – 456 с.
10. Аугусти, Г. Вероятностные методы в строительном проектировании; пер. с англ. Ю.Д. Сухова / Г. Аугусти, А. Баратта, Ф. Каштиани – М.: Стройиздат, 1988. – 584 с. ил.
11. Лычев, А.С. Надежность строительных конструкций: учебное пособие. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2008. – 184 с.
12. Дереченник, С.С. Автоматизация картографирования в задачах долгосрочного климатического прогнозирования / С.С. Дереченник, А.В. Дмитриева // Вестник БрГТУ. – 2010. – №5(65): Физика, математика, информатика. – С. 44–48.

Материал поступил в редакцию 27.01.13

DRAGAN V.I., TUR V.V., MORILOVA N.L., DMITRIEVA A.V. Assessing the reliability of the system design "BrGTU" at the design stage by direct calculation of the probability of failure

In this paper the technique of determining the reliability of complex spatial systems on an example dome NOC, based on nodal connection system "BrGTU." Have developed methods to determine the reliability index and the probability of failure as a separate element, and the system as a whole at any stage of loading. The calculation in the nonlinear formulation outside the elastic behavior to determine of the real stock carrying capacity of complex structural systems of various forms of coverage.

Construction of the strain diagram of the dome covering the building NOC RB, makes it possible to describe the process of accumulation of damage structures and determine the levels of stock carrying capacity for all stages of their pre-project and design basis loads.