

Драган В.И., канд. техн. наук, доц.; Морилова Н.Л.; Дмитриева А.В.
(БрГТУ, г. Брест)

ИССЛЕДОВАНИЕ БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫХ ПОКРЫТИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ СИСТЕМЫ «БрГТУ» ПРИ ЗАПРОЕКТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Структурные покрытия с применением системы «БрГТУ» относятся к 1 уровню ответственности, для которых необходим расчет уровня живучести. Сразу отметим, что при последующем расчете не берется вероятность терактов, взрывов и других событий, имеющих бесконечно малую вероятность их появления. Данный расчет проводился с целью определения величины критической нагрузки, выявления путей разрушения различных структурных систем, а также влияния формы системы на характер их разрушения.

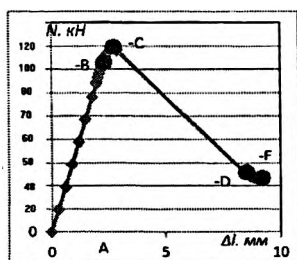
Обоснование уровня живучести проводилось в ПК SAP2000 в нелинейной постановке. Было необходимо рассчитать весь процесс нагружения, включая докритическое и закритическое деформирование. Кроме того, предлагаемый метод позволил рассчитать такие сложные задачи, которые традиционным способом решались или приближенно, или не решались вовсе. Полученные результаты оказались весьма наглядными, а сам процесс определения несущей способности оказался полностью автоматизированным.

Весьма важной задачей было нахождение величины критической (разрушающей) узловой нагрузки, определение предельного состояния системы в целом. Предельное напряженное состояние системы соответствует такому напряженному состоянию, когда малейшее добавочное силовое воздействие нарушает существующее равновесие и приводит систему в неустойчивое состояние. Достаточное условие устойчивости – потенциальная энергия имеет минимум. Выполнение этого условия, а также определение границ перехода различных состояний энергии представляет сложнейшую проблему.

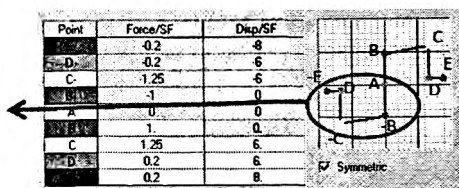
Структурные пространственные покрытия – сложная система, включающая в себя тысячи элементов, в которой при увеличении нагрузки происходит исчерпание несущей способности отдельных стержней, перераспределение усилий и даже смена знака усилия в элементах. По сравнению с растянутыми элементами, расчет сжатых элементов требует значительно большей исходной информации. Во-первых, необходимо описать геометрические характеристики стержня: длину, форму поперечного сечения и форму оси, ко-

торая имеет начальный изгиб. Во-вторых, необходимо задать упругопластическую диаграмму материала. В-третьих, необходимо описать условия прикрепления концов элемента к остальной конструкции.

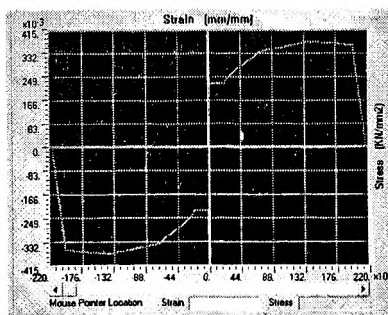
При создании расчетных моделей были приняты следующие исходные параметры: все узлы системы принимаются шарнирными, принималась гипотеза о центральном нагружении элементов, для описания нелинейных характеристик элементов во все стержни системы были введены пластические шарниры, характеристики которых были описаны по реальным характеристикам материала и экспериментальным данным деформирования отдельных элементов (рис. 1).



а)



б)



в)

Рис. 1. Графики физически и геометрически нелинейной работы стержней структурной конструкции:

- а – экспериментальная диаграмма деформирования сжатого стержня структуры;
- б – диаграмма деформирования сжатого и растянутого стержня по данным SAP2000;
- в – диаграмма деформирования стали 20 при растяжении и сжатии

Полученная расчетная модель протестирована на фрагментах, а сопоставление экспериментальных данных с теоретическими дало хорошие результаты, что позволяет ее применять на реальных конструкциях.

При задании характеристик пластического шарнира была учтена работа как растянутых, так и сжатых элементов в составе системы.

Работа растянутых элементов была задана диаграммой деформирования растянутого стержня (верхняя правая ветвь графика рис. 1, б) и диаграммой растяжения стали (верхняя правая ветвь графика рис. 1, в).

Работа сжатых элементов была описана графиком деформирования сжатого стержня (нижняя правая ветвь графика, рис. 1, б) и диаграммой сжатия стали (нижняя левая ветвь графика, рис. 1, в).

Верификация расчетной модели проводилась на натуральных фрагментах конструкций системы «БрГТУ». По данным испытаний получена величина практической разрушающей нагрузки, определены ключевые элементы и схемы разрушения фрагментов.

1. Фрагмент большепролетного металлического покрытия системы «БрГТУ»

Фрагмент представляет собой квадратную часть большепролетного покрытия (рис. 2, а). Все стержни фрагмента выполнены из труб $\text{Ø}60 \times 4$ мм длиной 2,2 м. Нагружение фрагмента производится через узлы нижнего пояса (рис. 2, б) пошагово до полного разрушения фрагмента. Определялась разрушающая нагрузка в ключевых элементах. После чего произведено сопоставление экспериментальных и теоретических данных.

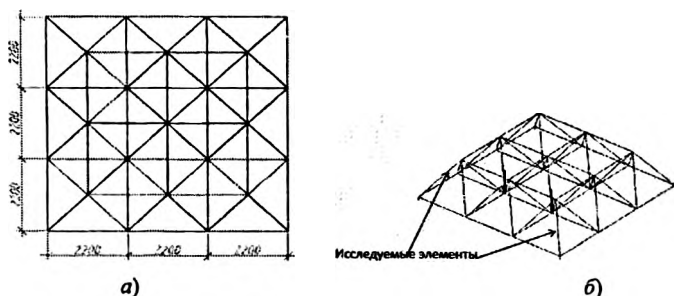


Рис. 2. Фрагмент большепролетного металлического покрытия системы «БрГТУ»: а – испытываемый фрагмент (основные размеры); б – схема нагружения

По экспериментальным данным выявлено наличие ключевых элементов, которыми являются опорные раскосы, именно в этих элементах указаны величины усилий. Нагружение фрагмента производилось пошагово: 3 – 6 шаг – увеличение нагрузки по 10 кН на каждом шаге в узел; 7 – 41 шаг – увеличение нагрузка по 1 кН на каждом шаге в узел; 1 шаг – без нагрузки (собственный вес); 2 шаг – нагрузка 50 кН в узел; 15 шаг – нагрузка 99 кН. Образование пластических шарниров в раскосах. Усилие в элементах – 93 кН,

перемещение узлов – 4,793 мм; 19 шаг – нагрузка 103 кН. Образование шарниров в верхнем поясе. Усилие в элементах – 99,7 кН, перемещение узлов – 6,21 мм; 36 шаг – нагрузка 120 кН. Усилие в опорных раскосах (теоретическое) – 112,1 кН, усилие в элементе (экспериментальное) – 126 кН, перемещение узлов – 12,52 мм, перемещение узлов (экспериментальное) – 9 мм; 40 шаг – разрушающая нагрузка 126 кН (экспериментальная). Усилие в опорном раскосе (теоретическое) – 124 кН, усилие в опорном раскосе (экспериментальное) – 126 кН, перемещение узлов – 14,0 мм.

Как видно из расчетной модели, наиболее ответственными элементами данного фрагмента являются опорные раскосы, после потери ими устойчивости конструкция превращается в механизм. При помощи ПК SAP2000 было проведено исследование работы опорных раскосов структурной конструкции (рис. 3).

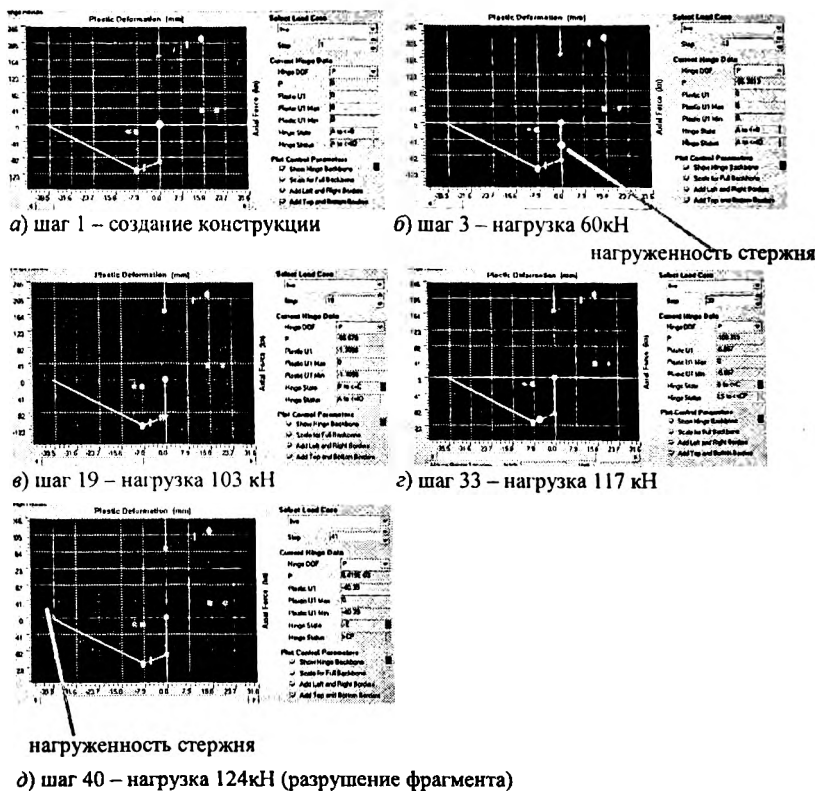


Рис. 3. Работа опорного раскоса в составе фрагмента

Образование пластических шарниров в элементах и переход их на последующие стадии нагружения отмечается по цветовой шкале. На диаграмме круглой точкой показана нагруженность сжатого раскоса в соответствующий момент нагружения конструкции. Экспериментальные и теоретические данные по испытанию фрагмента сводим в таблицу [1].

Результаты теоретических и экспериментальных исследований живучести фрагмента

Номер стержня	Геом. длина стержня между центрами	Экспериментальные данные		Теоретические данные	
		критическое усилие $N_{кр}$, кН	нагрузка на узел, кН	критическое усилие $N_{кр}$, кН	нагрузка на узел, кН
1	220	126	120	120	125
2	220	136	120		

Из проведенного анализа можно отметить, что работа элементов фрагмента идет по заложенной диаграмме пластического шарнира, что соответствует действительной работе стержня в составе конструкции, погрешность между экспериментальными и теоретическими данными составляет около 5 %, а деформированная схема полностью соответствует полученной экспериментально.

По полученным теоретическим данным была построена диаграмма деформирования фрагмента в координатах «нагрузка на фрагмент – вертикальное перемещение узлов», представленная на рисунке 4, которая описывает изменение напряженно-деформированного состояния конструкции на всем протяжении ее нагружения, вплоть до разрушения.

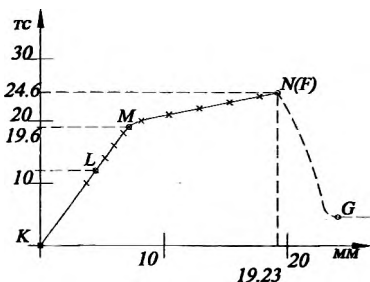


Рис. 4. Зависимость истощения живучести, представленная в координатах «суммарная нагрузка на фрагмент – перемещение узла в месте приложения нагрузки»

Построенная диаграмма характерна практически для всех пространственных структурных систем, поэтому характеристику ее участков также можно считать общей.

Участок проектной работы характеризуется участком диаграммы в точках $K - L$. Точка L , для любой системы – есть величина проектной нагрузки (максимальное ее значение). Конструкция работает упруго, снятие нагрузки приводит конструкцию в исходное положение.

Участок LM запроектной работы характеризуется работой системы до истощения несущей способности первых стержней конструкции. Для фрагмента точка M соответствует нагружению сжатых раскосов до точки B по диаграммам деформирования (см. рис. 1, а, б).

Участок MN сопровождается накоплением повреждений в фрагменте. Данный участок является самым протяженным, а для сложных систем, с большим числом статической неопределенности, может характеризоваться потерей устойчивости нескольких сотен стержней, но не приводит к разрушению конструкции.

Заключительное поведение системы – участок NF . На данном участке происходит дальнейшее накопление повреждений, возможны резкие увеличения перемещений. Участок NF при испытании фрагмента не установлен, так как после потери устойчивости опорных раскосов расчетная схема становится изменяемой системой.

Аварийное состояние конструкции соответствует участку FG диаграммы $KLMNFG$. Любой компьютерный расчет в нелинейной постановке прекращается в точке F , так как участок FG характеризуется не только разрушением системы в целом, но и превращением расчетной схемы в изменяемую систему.

При испытании фрагмента нагрузка прикладывалась медленно и плавно (квазистатически), так чтобы скорость деформации не превышала $\frac{d\varepsilon}{dt} \leq 4 \cdot 10^{-4} \frac{1}{c}$. При таком нагружении потеря устойчивости сжатых стержней происходит плавно, без проявления заметных динамических эффектов, а растянутые стержни в связи с высокой пластичностью стали 20 ($\varepsilon_{от} \approx 24\%$) не могут быть разорваны.

В большепролетных покрытиях всех построенных зданий и сооружений с применением структурных конструкций системы «БрГТУ» проектные и запроектные воздействия прикладываются в виде квазистатических нагрузок. Поэтому накопление повреждений, сопровождающиеся большими пластическими деформациями элементов, не приведет к динамическим воздействиям при выключении их из работы в составе конструкции.

При анализе работ структурных конструкций в среде SAP2000 можно отметить следующие особенности:

– перераспределение усилий в стержнях при их упругопластической работе вплоть до потери устойчивости сжатых стержней и разрыве растянутых стержней;

- определение разных стадий развития нагруженности стержней в процессе нагружения системы;
- прекращение расчета системы при вырождении статической неопределенности;
- возможность нагружения системы во времени

2. Штаб-квартира НОК Республики Беларусь в г. Минске.

Конструкции запроектированы 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 (рис. 5).

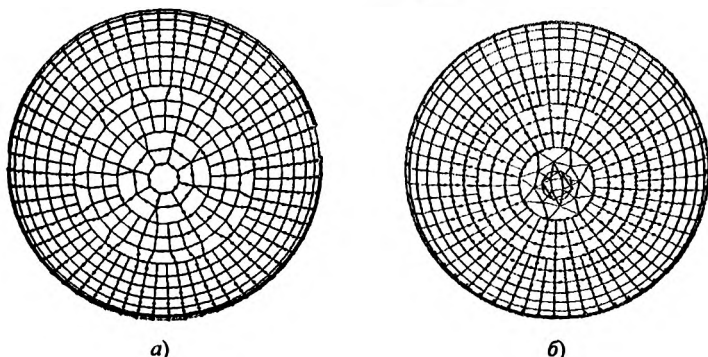


Рис. 5. Превращение системы в механизм (шаг 39). Узловая нагрузка – 11,78 кН:
 а) – повреждения верхнего пояса купола; б) – повреждения нижнего пояса купола

Нагружение системы производилось узловой нагрузкой. Система загружалась постоянными и временными нагрузками. При расчете в нелинейной постановке было важным выяснить величину критической (разрушающей) нагрузки. Целью данного расчета было создание адекватной расчетной модели и определение превышения разрушающей нагрузки над проектной. Поэтому нагружение модели производилось через узлы верхнего пояса, а разрушающая нагрузка определялась путем пошагового увеличения снеговой нагрузки.

Полученная расчетная модель НОКа включала в себя следующие нагрузки: собственный вес оболочки; вес остекления; вес оборудования; снеговая нагрузка (в расчет из всех схем нагружения принималась наиболее неблагоприятная). Данная нагрузка увеличивалась с шагом $k = 0,1 \cdot q$ до момента разрушения системы. Наиболее важными являются шаги в начале образования шарниров и при разрушении системы. Можно отметить, что скорость выключения элементов верхнего пояса при увеличении нагрузки

возрастает, а нижнего пояса – замедляется, при этом в раскосах образуется всего по 2 шарнира около дверных проемов купола. Общий график скорости выключения элементов при возрастании нагрузки представлен на рисунке 6. Разрушение системы происходит при превращении ее в механизм – система становится геометрически изменяемой при превышении проектной снеговой нагрузки почти в 4,5 раза выше проектной.

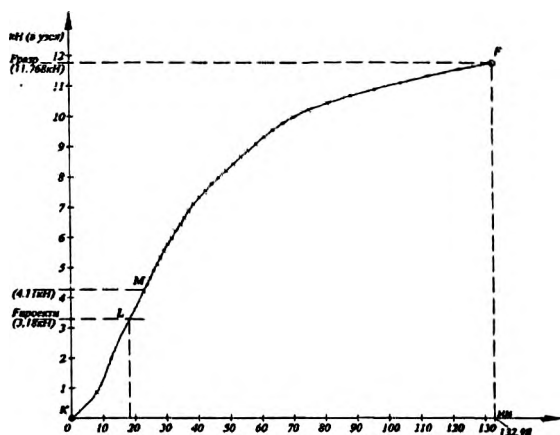


Рис. 6. Зависимость истощения живучести в координатах «нагрузка на узел – перемещение центральных узлов купола»

Анализируя график KLMF, можно установить следующие участки деформирования сооружения. Участок диаграммы KL – работа конструкций купола в области проектных нагрузок, участок LM – работа конструкций до начала образования первых пластических шарниров в стержнях системы, происходит при превышении полной проектной нагрузки в 1,3 раза. Участок MF – накопление в конструкции в результате развития пластических деформаций растянутых и потери устойчивости сжатых стержней приводит к накоплению остаточных деформаций в куполе.

Построенный график показывает отсутствие ключевых элементов, при пошаговом увеличении нагрузки распределение пластических шарниров происходит равномерно преимущественно по поясам радиальных стержней поясов структурной оболочки.

Для определения скорости накопления повреждений и образования пластических шарниров построен график (рис. 7). По горизонтальной оси указано отношение действующей нагрузки к проектной, по вертикальной оси – отношение стержней, исчерпавших свою несущую способность, к общему числу элементов системы. Для исследуемой системы: общее коли-

чество стержней в системе – 4949 шт., в момент разрушения сооружения исчерпали несущую способность – 786 стержней, разрушающая узловая нагрузка – 11,768 кН, проектная узловая нагрузка – 3,18 кН.

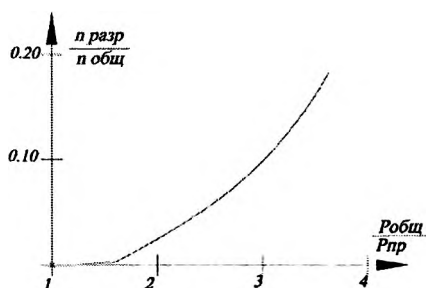


Рис. 7. График скорости накопления повреждений в системе купола НОК

Исследования, проведенные на расчетных моделях, построенных для испытанных фрагментов различных форм купола НОК в г. Минске, позволяют сделать выводы:

1) разработана методика расчета живучести металлических структурных конструкций системы «БрГТУ», основанная на расчете элементов за пределами упругой работы вплоть до потери устойчивости сжатых стержней и разрывов растянутых стержней и перераспределения усилий в системе в процессе запроектной работы сооружения;

2) выполнена верификация расчетной модели живучести структурных конструкций системы «БрГТУ» по результатам испытаний натурного фрагмента, которая позволила установить основные этапы живучести: 1 – работа конструкции в пределах проектных нагрузок; 2 – работа конструкции до появления первых пластических шарниров в элементах; 3 – стадия накопления повреждений в конструкции; 4 – стадия разрушения конструкции;

3) построение диаграммы деформирования структурных конструкций системы «БрГТУ» на примере купола покрытия здания НОК Республики Беларусь дает возможность описать процесс накопления повреждений сооружений и определить уровни запаса несущей способности для всех этапов их допроектного и запроектного нагружений.

Литература

1. Провести теоретические и экспериментальные исследования работы стальных конструкций покрытия летнего амфитеатра в г. Витебске: отчет о НИР № ГР2007457 / Брест. гос. техн. ун-т; рук. В.И. Драган. – Брест, 2007. – 189 с.