

2. Аналитические зависимости для определения коэффициентов ползучести напрягающего бетона в раннем возрасте (до 28-ми суток реального возраста), установленном с учётом влияния температурно-влажностного режима окружающей среды (т.е. с учётом влияния условий хранения на стадии твердения и расширения напрягающего бетона).
5. Early Age Deformation and Resultant Induced Stress in Expansive High Strength Concrete / I. Hidetoshi [et al.] // Journal of Advanced Concrete Technology, 2004. – Vol. 2, № 2. – P. 155–174.
6. Применение базальтопластиковой арматуры при изготовлении самонапряжённых конструкций / В.В. Тур, О.С. Семенюк // Вестник Брестского государственного технического университета, 2013. – № 1(79): Строительство и архитектура. – С. 99–103.
7. Expansive Performance of Self-stressing and Self-compacting Concrete confined with Steel Tube / X. Lei [et al.]. – Journal of Wuhan University of Technology-Mater, 2007. – P. 341–345.
8. JCI: Autogenous Shrinkage of Concrete / E. Tazawa [et al.]. – London, 1999. – 31 p.
9. Design of Concrete Structure. General Rules and Rules for Building: EN 1992-1: 2001 (Eurocode 2) / Brussel: European Committee for Standardization, Introduced October 2001. – 230 p.
10. Бетоны напрягающие. Технические условия: СТБ 2101-2010. – Введ. 28.07.2010. – Минск: РУП «Стройтехнорм», 2010. – 19 с.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Экспериментально-теоретические основы предварительного напряжения конструкций при применении напрягающего бетона: монография / В.В. Тур. – Брест: изд. БрПИ, 1998. – 246 с.
2. Предварительно напряжённые железобетонные конструкции: монография / И. Гийон – М.: Стройиздат, 1958. – 498 с.
3. Расширяющийся и напрягающий цементы и самонапряжённые железобетонные конструкции: монография / В.В. Михайлов, С.Л. Литвер. – М.: Стройиздат, 1974. – 389 с.
4. Бетонные и железобетонные конструкции из напрягающего бетона: ТКП 45-5.03-158-2009 / Министерство архитектуры и строительства РБ. – Мн.: Минстройархитектуры, 2010. – 28 с.

Материал поступил в редакцию 01.04.14

#### TUR V.V., SIEMIENIUK O.S. To the estimating of the resultant induced stresses in the self-stressed structures

Empirical approaches and analytical models for resultant induced stresses evaluating in the concrete of self-stressed structures are considered. The applicability of above-mentioned methods was assayed and its merits and demerits were studied. Comparison of experimental and calculated data obtained with the usage of described in the article methods for resultant induced stresses evaluating is given.

УДК 624.014.27

Драган В.И., Морилова Н.Л.

### КРИТЕРИИ ЖИВУЧЕСТИ СТРУКТУРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ СИСТЕМЫ «БрГТУ»

**Введение.** Проектирование современных архитектурных форм большой выразительности и универсальности, образуемых на основе многократно повторяющихся элементов, привели к созданию металлической структурной системы нового типа – структурной конструкции системы «БрГТУ».

За последние восемь лет запроектировано 29 и построено 19 уникальных сооружений с применением металлических структурных конструкций системы «БрГТУ». Это покрытия сцен летних амфитеатров в г. Бресте, г. Кобрине, г. Хойники, покрытия ледовых арен в г. Пружаны, г. Лунинец, г. Ивацевичи, г. Кобрине, покрытие летнего амфитеатра в г. Витебске, навес над трибунами стадиона «Спартак» в г. Могилеве, покрытием спортивного зала и главного входа на «Минск-арена», покрытия ДЮСШ №2 в г. Калинковичи, купол здания НОК в г. Минске, покрытие амфитеатра в парке г. Молодечно и другие.

Для дальнейшего развития, проектирования и строительства новых объектов с применением структурных конструкций системы «БрГТУ» необходимо проведение теоретических и экспериментальных исследований с целью определения и уточнения новых конструктивных решений, а также реализации новых методов расчета и проектирования конструкций, в том числе в случае аварийных нагрузок и аварийных состояний, включая методы расчета живучести структурных конструкций системы «БрГТУ».

На сегодняшний день отсутствует общепринятый научно – обоснованный подход проектирования живучести и долговечности зданий и сооружений на различных стадиях жизненного цикла. В этой связи развитие элементов теории и практических методов расчета живучести приобретает все большую актуальность. Новый этап исследований связан с изучением живучести физически и геометрически нелинейных систем, а также влияния выключения отдельных элементов на процесс общей несущей способности в запредельных состояниях.

Для решения задач оценки живучести структурных конструкций

системы «БрГТУ» приняты следующие гипотезы:

- запроектное воздействие на структурную конструкцию определяется интегральным результатом накопления повреждений, выраженный диаграммой деформирования покрытия «нагрузка – прогиб покрытия»;
- разрушение структурной конструкции определяется набором выключенных связей, в частности пластических шарниров, которые превращают конструкцию в кинематически изменяемую систему;
- на начальном этапе нагрузка, при действии которой не происходит образование пластических шарниров, считается постоянной (проектная нагрузка), остальная нагрузка изменяется пропорционально по одному параметру.

На живучесть структурных покрытий системы «БрГТУ» влияет также их топология. Рациональный выбор топологии таких покрытий дает возможность управлять их живучестью при исчерпании несущей способности элементов.

**1. Конструктивные решения большепролетных структурных покрытий системы «БрГТУ».** Структурная металлическая конструкция системы «БрГТУ» достаточно быстро получила признание архитекторов, проектировщиков и в настоящее время имеет несомненный приоритет по отношению к другим пространственным конструкциям. Об этом свидетельствует не только факт широкого применения данной конструкции по всей республике в качестве покрытий общественных зданий, культурно-развлекательных и спортивных сооружений, но и то, что данная конструкция была использована при возведении уникальных сооружений, таких как, например, покрытие летнего амфитеатра в г. Витебске [1].

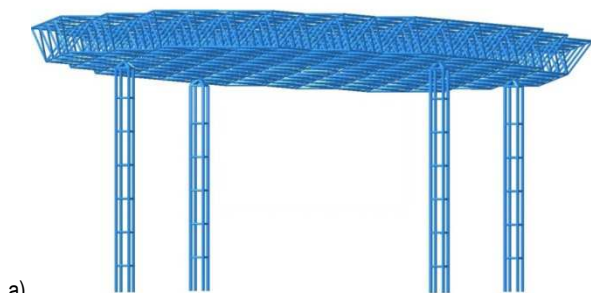
Впервые структурное покрытие системы «БрГТУ» было применено при строительстве театра эстрады в парке культуры и отдыха в г. Бресте, его аналоги были построены в г. Кобрине и г. Хойники (рис. 1а).

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

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

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

Структурное покрытие театра эстрады в парке г. Хойники представляет собой пространственную стержневую плиту с ортогональной сеткой поясов с размерами ячеек 1,5x1,5 м. Конструкция имеет размеры в плане 18x22,5 м. Все стержни пространственной конструкции имеют одинаковую номинальную длину и состоят из бесшовных круглых труб одного типоразмера: поясов и раскосов –  $\varnothing 60 \times 3,5$  мм. Все узлы выполнены из полых сферы с наружным радиусом 160 мм и толщиной стенки  $t=10$  мм. Структурная плита опирается на четыре колонны двух типов: сквозной четырехветвевой из труб сечением  $\varnothing 102 \times 6$  мм и сплошной из труб  $\varnothing 273 \times 7$  мм и имеет консольный вылет над сценой на 9,0 м. Особенностью данной конструкции структурной плиты в г. Хойники является применение более жесткой треугольной ячейки [2].



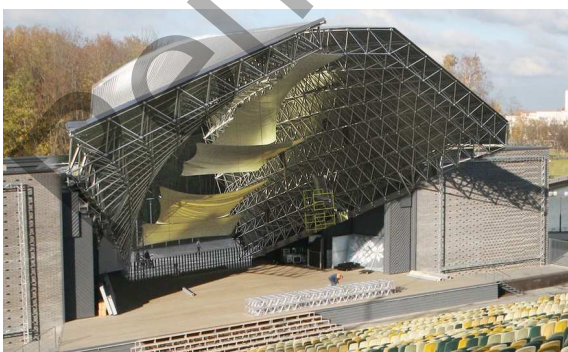
а)



б)



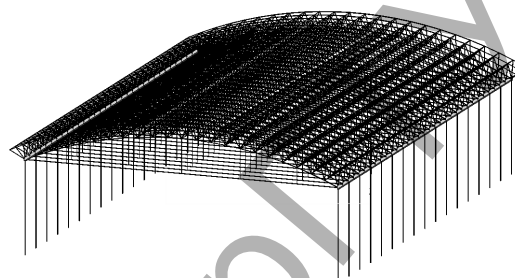
в)



г)



д)



е)

Рис. 1. Применение металлической структурной конструкции системы «БрГТУ»

Одним из приоритетных конструкций покрытия среди построенных с применением структурной конструкции системы «БрГТУ» является купол здания НОК (рис. 1б). Купол здания «Олимпийского комитета» состоит из трех отдельных стальных конструкций, выполненных с использованием стержневых систем 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 представляют собой 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.

Конструкции запроектированы в виде двухслойной сетчатой оболочки из стержней с расстояниями 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» [3].

Сложное конструктивное решение применено в конструкции покрытия ледовой арены на 800 мест в г. Пружаны. Такая же конструкция применена на ледовых аренах в г. Кобрине Брестской области, в г. Сморгони Гродненской области, в городах Новолукомле, Лепеле, Глубокое Витебской области (рис. 1в).

Покрытие представляет собой металлическую пространственную перекрестно – стержневую конструкцию, выполненную в виде предварительно-напряженной прямоугольной плиты. Регулярная пространственная конструкция образована двумя прямоугольными плитами, соединенными в коньке и создающими два ската с уклоном  $8^\circ$ . Структурная плита опирается по контуру крайними узлами нижнего пояса на сталежелезобетонные колонны с шагом 6 м и образующие в плане прямоугольник с размерами сторон  $39 \times 63$  м. Ячейки поясов плиты имеют размер  $3 \times 3$  м, высота плиты в осях – 3 м.

В связи с необходимостью восприятия реакции распора, в уровне опорных узлов нижней пояса плиты устанавливаются затяжки с шагом 3 м в направлении меньшего пролета.

Все затяжки выполнены из бесшовных горячекатаных труб  $\varnothing 127$  мм и толщиной стенки 8 мм. Затяжки включают в работу пред-

варительным натяжением 50 кН. Для сборки покрытия ледовой арены применены две марки узлов системы «БрГТУ»: с толщиной стенки полой сферы 10 мм и наружным диаметром 160 мм и с толщиной стенки 16 мм и наружным диаметром 212 мм. Стержни структурной плиты изготовлены из круглых труб  $\varnothing 127 \times 8$  мм,  $\varnothing 89 \times 5$  мм,  $\varnothing 83 \times 4$  [1].

Покрытие над сценой амфитеатра в парке отдыха г. Молодечно запроектировано из двух пространственных двухъярусных структурных конструкций (рис. 1г). Сооружение имеет следующие генеральные размеры: ширина – 25,879 м; длина – 35,658 м; высота +15,064 м.

Пространственная решетчатая конструкция имеет четырехугольную сетку верхнего и нижнего поясов. Размеры ячеек верхней и нижней поясной сетки составляют – 1,5...1,7х1,5...1,8 м. Высота конструкции по осям поясов составляет – 1,06 м. Структурные конструкции опираются крайними узлами нижней и верхней поясной сетки с шагом 1,5...1,6 м на стальные ригеля пространственных рам.

Стержневые элементы конструкции покрытия выполнены из бесшовных горячекатаных труб по ГОСТ 8732 (тр. 73х6, тр. 89х10, тр. 108х10 и тр.140х12), в торцы которых вварены круглые гайки с резьбой М24 и М30.

Соединение строжневых элементов в пространственную систему осуществляется при помощи узловых элементов системы «БрГТУ», представляющих собой полые шары диаметром 184 мм, толщина стенки 12мм и  $\varnothing 212$  мм, толщина стенки 16 мм с отверстиями, в которые установлены высокопрочные болты М24 и М30.

Покрытие ледового катка по ул. Головацкого в г. Гомеле (рис. 1д) по технической сложности пространственной структурной оболочки, новизне принятых конструктивных технических решений, перекрываемой площади без промежуточных опор и другим параметрам относится к уникальным сооружениям. Покрытие запроектировано на кафедре строительных конструкций БрГТУ в 2007 году. Покрытие имеет размеры в плане 49,092х57,82 м и представляет собой комбинированную пространственную структурную оболочку, в поперечном разрезе близкую по очертанию к синусоиде. Объединение стержней в единую конструкцию выполнено с помощью полых шаровых узлов системы «БрГТУ».

Структурная оболочка имеет диагональные верхнюю и нижнюю поясные сетки с ячейками в виде ромбов. Высота структурной оболочки по осям 2400 мм, размер стороны ромба верхней поясной сетки – 2861 мм, размеры сторон ромбов нижней поясной сетки – 2733 мм, 2911 мм, 3005 мм, 3053 мм. В качестве стержней в структурной оболочке применены трубы стальные горячекатаные по ГОСТ 8732 ( $\varnothing 76 \times 5$ ,  $\varnothing 89 \times 5$ ,  $\varnothing 102 \times 8$ ,  $\varnothing 114 \times 9$  и  $\varnothing 121 \times 11$ ). В торцы стержневых элементов вварены круглые гайки с резьбой М30. Наиболее нагруженные стержневые элементы с величиной продольного усилия более 400 кН сопрягаются с узлами с помощью монтажной сварки через фасонки.

Для уменьшения строительной высоты покрытия и расхода металла структурная оболочка опирается нижними узлами на опорные площадки составных ригелей. Ригели выполнены из двух горячекатаных труб (ГОСТ 8732) сечением  $\varnothing 273 \times 10$ , объединенных в местах опирания узлов диафрагмами и площадками. Ригели, расположенные по оси А и Д, выполнены криволинейными в вертикальной плоскости. Ригели, смонтированные по оси 1 и 3, выполнены прямолинейными [4].

Наиболее новой конструкцией покрытия, среди законструированных с применением системы «БрГТУ» (рис. 1е), является покрытие спортивного комплекса запроектированного для г. Москвы. Покрытие законструировано в виде структурной цилиндрической оболочки с затяжками в опорных узлах. Структурная оболочка по продольным осям опирается на монолитные железобетонные балки сечением 1200ммх1000 (h) мм. Железобетонные балки опираются на сталежелезобетонные колонны, установленные с шагом 6,0 м.

Структурная конструкция покрытия имеет четырехугольную сетку верхнего и нижнего поясов. Размеры ячеек верхней и нижней поясной сетки составляют 3,185х3,0 м соответственно. Высота конструкции по осям поясов составляет – 3,0 м.

Для восприятия усилий распора в каждый опорный узел структурной оболочки введена затяжка (шаг затяжек 3,0 м). Затяжки выполнены из бесшовных горячекатаных труб  $\varnothing 121 \times 10$  по ГОСТ 8732. В пролете затяжка поддерживается пятью подвесками из бесшовных труб  $\varnothing 60 \times 4$  по ГОСТ 8732.

Кровля выполняется по стальному профилированному настилу марки Н75-750-0.8 по ГОСТ 24045-94 из тонколистового оцинкованного проката по ГОСТ 14918.

Для всех описанных сооружений был проведен ряд расчетов в нелинейной постановке с применением ПК SAP2000. Подробная методика проведения нелинейных расчетов была изложена в [3].

Результатами проведенного исследования стали определение численных показателей надежности, подтверждение высокого уровня живучести, отсутствие ключевых элементов, исключение прогрессирующего обрушения, а также действенность применения разработанной расчетной модели.

В данной статье проведен сравнительный анализ полученных результатов, который будет направлен на определение конструктивных форм покрытий, наиболее подходящих для перекрытия больших пролетов.

Проведение нелинейных расчетов [2–3] показало, что образование шарнира в 1-м элементе не ведет к прогрессирующему обрушению системы в целом. Подобное не происходит и при образовании 5–10–20 и более шарниров.

**2. Сравнительный анализ вероятности отказа и индекса надежности.** Все конструктивные формы покрытий, рассматриваемые в данной работе сформированы на основании узлового соединения системы «БрГТУ». Эти объекты, в соответствии с ТКП EN 1990 [5], можно отнести к классу надежности RC2, а в соответствии с ГОСТ 27751-88 [6] при их расчете необходимо принимать коэффициент надежности по назначению  $\gamma_n = 1,2$ .

Таким образом, эти характеристики означают, что при подборе элементов конструкций коэффициент запаса должен составлять не менее 20%, с одной стороны, и при проверке соответствия нормативному уровню надежности  $\beta \geq 3,8$ , с другой стороны.

В таблице 1 приведены данные определения характеристик надежности ( $\beta/P_f$ ) при проектном нагружении и на стадии разрушения системы.

Таблица 1. Сравнение показателей надежности

Объект	$\beta/P_f$ (нормативный)	$\beta/P_f$ (проектный)	$\beta/P_f$ (стадия разрушения)	Коэф. конструкт. безопасности
1	2	3	4	5
Навес в г. Хойники	$3,8/10^{-4}$	$9,2/1,2 \cdot 10^{-20}$	$8,12/2,33 \cdot 10^{-16}$	6,56
Покрытие в г. Молодечно	$3,8/10^{-4}$	$3,88/5,08 \cdot 10^{-5}$	$5,0/2,79 \cdot 10^{-7}$	1,85
Ледовый дворец в г. Пружаны	$3,8/10^{-4}$	$4,02/2,85 \cdot 10^{-5}$	$7,67/8,07 \cdot 10^{-15}$	1,41
Купол НОК (равн. снег)	$3,8/10^{-4}$	$4,06/2,53 \cdot 10^{-5}$	$5,67/7,69 \cdot 10^{-9}$	2,47
Каток в г. Гомеле (неравн. снег)	$3,8/10^{-4}$	$4,15/1,61 \cdot 10^{-5}$	$7,77/3,65 \cdot 10^{-5}$	2,46
Каток в г. Гомеле (равн. снег)	$3,8/10^{-4}$	$2,79/2,6 \cdot 10^{-3}$	$3,98/3,3 \cdot 10^{-5}$	1,88
Спорткомплекс в г. Москва (неравн. снег)	$3,8/10^{-4}$	$2,86/2,1 \cdot 10^{-3}$	$4,68/4,68 \cdot 10^{-6}$	1,38
Спорткомплекс в г. Москва (равн. снег)	$3,8/10^{-4}$	$3,96/3,37 \cdot 10^{-5}$	$4,74/1,02 \cdot 10^{-6}$	1,56

Перед проведением нелинейного расчета был проведен статический линейный расчет с целью подбора сечений элементов по I и II группам предельных состояний. Естественно, что в сложных системах, состоящих из нескольких тысяч стержней, показатели исчерпания несущей способности для каждого элемента будут различны, так же как и их показатели надежности. Пытаясь превратить такую систему в ферму равного сопротивления, инженер получит число жесткостей элементов, равное числу стержней.

Для оценки надежности большепролетных покрытий предлагается принимать коэффициент конструктивной безопасности, равный отношению разрушающей нагрузки на покрытие к проектной.

Долгое время было принято считать, что если обеспечена необходимая надежность каждого элемента – это есть обеспечение надежности системы в целом. Показатели надежности, приведенные в таблице 1, рассчитаны по первому пластическому шарниру, образовавшемуся в элементе.

Целевые (нормативные) показатели надежности должны обеспечить необходимый запас несущей способности на весь период эксплуатации.

Введем понятие величины «коэффициент конструктивной безопасности», выраженный как отношение полной разрушающей нагрузки к величине полной проектной нагрузки, данная величина также является величиной весьма показательной в сравнении с показателями надежности.

Таким образом, исходя из следующих характеристик – коэффициента конструктивной безопасности, вычисленных индексов надежности и вероятностей отказа, заключаем, что для различных конструктивных форм коэффициенты надежности по назначению должны быть различны. Например:

- для купольных конструкций (в соответствии с расчетом купола НОК) он может приниматься в классическом варианте  $\gamma_n=1,2$ ;
- для структурных плит с более жесткой ячейкой (в соответствии с расчетом структурной плиты навеса в г. Хойники) вполне достаточно  $\gamma_n=1,0$ ;
- для комбинированных структурных плит (по расчету конструкции покрытия ледового дворца в г. Пружаны) его также можно оставить  $\gamma_n=1,2$ ;
- для структурных оболочек сложной формы (покрытие в г. Гомель, Москва) для принятия  $\gamma_n$  необходим дополнительный расчет, возможно в нескольких приближениях с целью определения его необходимой величины, предварительно можно лишь предполагать, что его величина будет превышать 1,2;
- для консольных структурных плит сложной формы (расчет покрытия амфитеатра в г. Молодечно) можно говорить о том, что  $\gamma_n=1,2$  соответствует нормируемым показателям надежности, но при проектировании новых конструкций необходим проверочный расчет.

Проведение сравнительного анализа различных конструктивных форм на соответствие нормируемым характеристикам надежности говорит о невозможности применения обобщенного коэффициента

$\gamma_n=1,2$ , а также о необходимости проведения дополнительных расчетов на стадии проектирования.

### 3. Сравнительный анализ деформационных свойств различных систем.

Важной частью сравнительного анализа является нелинейная диаграмма деформирования в относительных координатах «нагрузка – перемещение центральных узлов покрытия» (рис. 2).

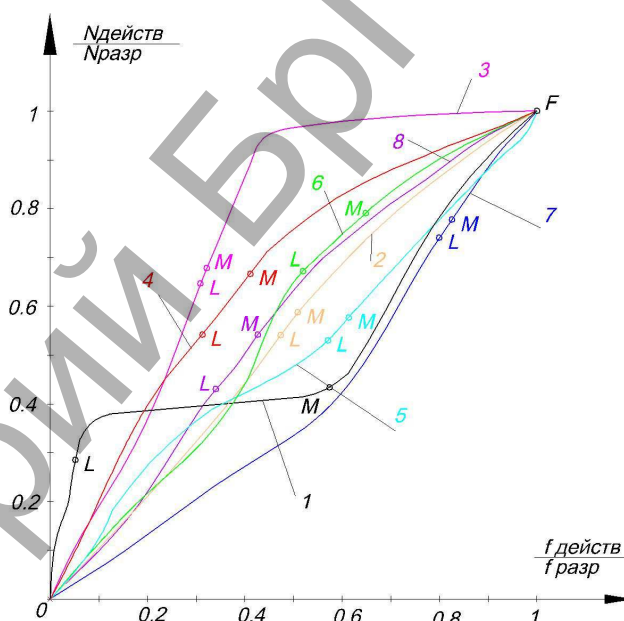
На графике, представленном на рис. 2 вертикальная ось представляет собой отношение нагрузки на текущем шаге к разрушающей, а по горизонтальной оси – перемещение на текущем шаге к перемещению, соответствующему разрушающей нагрузке.

Каждый график обозначим критическими точками,

где  $L$  – величина полной проектной нагрузки;

$M$  – величина нагрузки с образованием первых пластических шарниров в элементах;

$F$  – величина разрушающей нагрузки.



- 1 – структурная плита навеса в г. Хойники; 2 – консольная структурная оболочка в г. Молодечно; 3 – ломаная структурная плита г. Пружаны; 4 – оболочка катка г. Гомель (загружение неравномерным снегом); 5 – оболочка катка г. Гомель (загружение равномерным снегом); 6 – спортивный комплекс г. Москва (загружение равномерным снегом); 7 – спортивный комплекс г. Москва (загружение неравномерным снегом); 8 – купол НОК

Рис. 2. Зависимости «нагрузка на 1 м² – перемещение центральных узлов покрытия» по результатам нелинейного расчета

Таблица 2. Сводная таблица жесткостных показателей конструкций покрытий

Объект	Вертикальный прогиб			
	Нормированный, [мм] по [7]	От проектной нагрузки, [мм]	От разрушающей нагрузки, [мм]	В долях пролета*
1	2	3	4	5
Навес в г. Хойники	72	18.35	634.16	1/28
Покрытие в г. Молодечно	48	121.10	255.81	1/86
Ледовый дворец в г. Пружаны	143	65.52	212.34	1/202
Купол НОК (равн. снег)	154	22.38	79.42	1/584
Каток в г. Гомеле (неравн. снег)	164	92.26	292.96	1/168
Каток в г. Гомеле (равн. снег)	164	66.23	116.09	1/424
Спортивный комплекс в г. Москва (неравн. снег)	230	111.39	139.26	1/496
Спортивный комплекс в г. Москва (равн. снег)	230	114.75	220.90	1/313

\* - вертикальный фактический прогиб при разрушающей нагрузке

Особенностью данного графика является нелинейное деформирование покрытия с образованием пластических шарниров в стержнях.

Анализируя диаграмму (рис. 2) мы видим, что реакция различных конструктивных форм на внешние, в том числе запроектные воздействия, различна.

Сводный график зависимостей «нагрузка–перемещение» является весьма показательным с точки зрения поведения сложных систем при действии запроектных нагрузок. Из рисунка видно, что скачки, переломы диаграмм присутствуют на графиках сооружений с приложением неравномерных, больших нагрузок, выраженных снеговыми мешками, такое поведение исследуемых конструкций говорит о приспособляемости сложных большепролетных систем к внешним воздействиям. Резкие изменения направления графиков происходят при выключении одних элементов из работы и передачи усилий на другие. Так, например на диаграмме 1 (навес в парке г. Хойники) изменение направления диаграммы происходит при исчерпании несущей способности опорных раскосов и перераспределении усилий на элементы поясов.

Картина приспособляемости конструкций покрытий при восприятии запроектных воздействий, образование пластических шарниров при пошаговом увеличении нагрузки говорит об отсутствии ключевых элементов и об исключении возможности лавинообразного обрушения.

Конечно, на практике, при эксплуатации таких сооружений, никакими объективными и субъективными причинами невозможно объяснить образование до 500 пластических шарниров в элементах, однако такая картина разрушения говорит о высокой степени надежности и живучести структурных систем.

Таким образом, исследуя различные типы и формы структурных конструкций покрытий, можно сделать выводы об отклике различных конструктивных форм на запроектные воздействия. Так, например:

- структурированные двухслойные купола (по результатам расчетов купола НОК): оптимальный расход стали при высоких запасах несущей способности, разрушение системы происходит при «продавливании» купола при действии разрушающей нагрузки;
- консольная изогнутая оболочка (по результатам исследования амфитеатра в г. Молодечно): при пошаговом приращении нагрузки на покрытие происходит перераспределение усилий от приопорных зон в сторону консоли, при этом разрушение системы происходит при достижении критической нагрузки с образованием механизма, расположенного в середине консоли;
- структурная плита (навес в парке г. Хойники): обладает большим запасом несущей способности, при минимальных сечениях узлов и элементов, такие показатели достигаются жесткостью ячейки структурной плиты при незначительном увеличении расхода стали. Наиболее ответственными элементами являются опорные раскосы, при исчерпании несущей способности перераспределение усилий происходит на элементы поясов;
- двухкатаная структурная плита с затяжками – комбинированная конструкция (конструкции покрытия в г. Пружаны, Сморгони, Новолукомле, Лепеле и т.д.): совместная работа комбинированных систем позволяет добиться высокого уровня надежности при минимальном расходе материала, при достижении разрушающего уровня запроектного воздействия в системе покрытия образуется не-

сколько механизмов в разных частях конструкции покрытия;

- изогнутая структурированная оболочка (по результатам расчета покрытия катка в г. Гомеле): данная конструкция покрытия была рассчитана на два варианта снеговой нагрузки, результаты расчетов показали различные пути возможных разрушений, а следовательно, различные показатели надежности. Проведенный сравнительный анализ для регионов Брест-Гомель показывает необходимость более детального отношения к расчету показателей надежности и живучести сложных систем;

- цилиндрическая оболочка с затяжками (рассмотрена по результатам расчета спортивного комплекса, запроектированного для г. Москвы): рассмотренные два варианта загрузки доказывают совместную работу всех элементов комбинированной конструкции покрытия, отсутствие ключевых элементов, высокий уровень живучести и, как следствие, исключение прогрессирующего обрушения.

Обобщая сравнительный анализ, можно говорить, что график зависимости «нагрузка на  $1\text{ м}^2$  – перемещение центральных узлов покрытия» характеризуется углом наклона. Вертикальность графика говорит о жесткости системы: чем вертикальней участок кривой, тем большей жесткостью обладает система на данном этапе нагружения. Из рассматриваемых сооружений можем выделить системы, обладающие наибольшей жесткостью: это навес в г. Хойники, купол НОК, структурная плита покрытия в г. Пружаны.

Другим показателем, рассматриваемой диаграммы является количество изменений углов наклона для каждого отдельного графика. Среди рассматриваемых систем можно выделить структурированную плиту в г. Хойники. Каждый излом графика говорит о перераспределении усилий, приспособляемости системы и изменении расчетной схемы.

Так, например, диаграмма 1 рис. 2 кардинально меняет свой угол наклона при выключении верхних и нижних опорных раскосов, перераспределении усилий на пояса.

Изменение угла наклона диаграммы 3 рис.2, построенного для покрытия ледовой арены в г. Пружаны, происходит при выключении средних раскосов – наиболее ответственных элементов для данной системы.

Равномерность и вертикальность графика НОК (диаграмма 8 рис. 2), напротив, говорит о равномерном перераспределении напряжений в системе на различных этапах нагружения.

**4. Скорость накопления повреждений различных систем.** Еще одним критерием живучести стала общая относительная диаграмма зависимости «нагрузка – количество пластических шарниров».

Данная диаграмма характеризует скорость накопления повреждений системы по мере приложения нагрузки. За меру повреждений было принято отношение общего количества шарниров, образовавшихся при разрушении к числу образовавшихся шарниров на рассматриваемом шаге.

Угол наклона данной диаграммы характеризуется способностью системы к перераспределению усилий. Появление горизонтальных участков говорит об изменении расчетной схемы и увеличении скорости накопления повреждений.

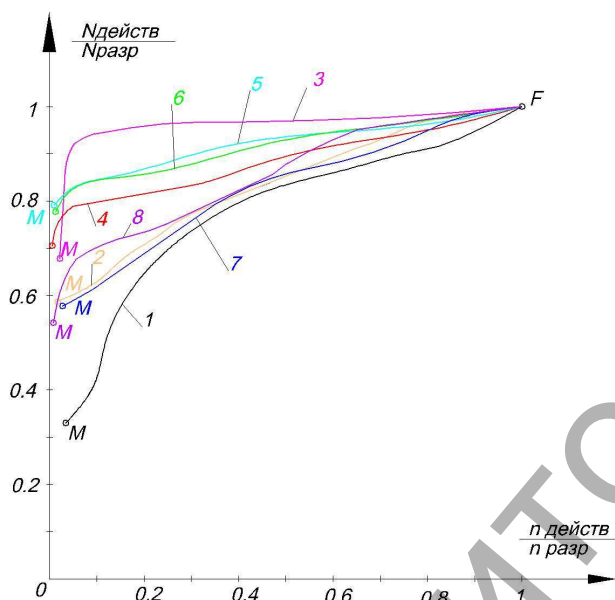
Переходя к анализу взаимного расположения кривых, можно отметить:

Таблица 3. Сводная таблица наличия повреждения в конструкциях покрытий

Объект	Общее кол-во стержней, шт.	Кол-во образовавшихся шарниров на стадии разрушения	
		шт.	%*
1	2	3	4
Навес в г. Хойники	1399	174	7.15
Покрытие в г. Молодечно	1440	57	3.95
Ледовый дворец в г. Пружаны	2420	188	7.76
Купол НОК (равн. снег)	4499	498	11.07
Каток в г. Гомеле (неравн. снег)	2835	353	12.45
Каток в г. Гомеле (равн. снег)	2835	37	1.3
Спорткомплекс в г. Москва (неравн. снег)	6008	331	5.5
Спорткомплекс в г. Москва (равн. снег)	6008	443	7.19

\* - % образовавшихся шарниров в элементах системы «БрГТУ» на стадии разрушения от общего числа стержней

- минимальная скорость накопления повреждений (лучшая приспособляемость) относится к плоским структурным плитам, как к отдельным системам (навес в г. Хойники), так и комбинированным системам;
- ярко выраженное изменение углов наклона для диаграмм (диаграммы 1, 3, 4) удобно рассматривать с диаграммами рис.2, из чего можно заключить, что изменение угла наклона обоих графиков происходит при выключении отдельных конкретных элементов, приспособляемости, изменении расчетной схемы.  
Так, например:
- особенностью купольного формообразования, для рассматриваемой диаграммы на примере купола НОК, изменение углов наклона (диаграмма 8 рис. 3) появляется при образовании новых больших групп пластических шарниров при пошаговом увеличении нагрузки;
- равномерной диаграммой является диаграмма 8 рис.3. Данная диаграмма имеет довольно малый угол наклона к горизонтали, однако отсутствие изменений углов наклона на протяжении жизненного цикла системы говорит о равномерном перераспределении усилий и о одинаковой скорости накопления повреждений.



- 1 – структурная плита навеса в г. Хойники; 2 – консольная структурная оболочка в г. Молодечно; 3 – ломаная структурная плита г. Пружаны; 4 – оболочка катка г. Гомель (загружение неравномерным снегом); 5 – оболочка катка г. Гомель (загружение равномерным снегом); 6 – спортивный комплекс г. Москва (загружение равномерным снегом); 7 – спортивный комплекс г. Москва (загружение неравномерным снегом), 8 – купол НОК

**Рис. 3.** Зависимости «нагрузка на 1 м<sup>2</sup> – количество пластических шарниров в элементах покрытия» по результатам нелинейного расчета

**Заключение.** Для каждого сооружения нелинейный расчет проводился до момента полного разрушения – вырождения статической неопределенности и превращения конструкции в механизм. В данных расчетах не принимался принцип единичного отказа или умышленного внесения повреждений. В таких сложных, статически неопределимых системах на стадии разрушения образуется до 500 шарниров.

Конечно, такая ситуация на практике вряд ли возможна, однако такое моделирование позволяет:

- определить действительные резервы несущей способности сооружений;
- определить пути разрушения;
- определить места образования пластических шарниров;
- на любом этапе определить характеристики надежности;
- определить наличие ключевых элементов, если они есть;
- путем регулирования жесткости системы в целом добиться необходимых уровней надежности и живучести;
- определить характеристики надежности при запроектных нагрузках;
- оценить влияние формы на характеристики системы;
- оценить влияние схем приложения нагрузок на характеристики системы.

По результатам нелинейных расчетов различных форм покрытия можно назначить критерии надежности и живучести сложных конструктивных систем:

- деформации конструкций покрытия при нелинейной работе сложных конструктивных схем с образованием пластических шарниров (относительная диаграмма «нагрузка – перемещение центральных узлов покрытия»);
- вычисление математических характеристик надежности на различных этапах жизненного цикла системы;
- нелинейная диаграмма в относительных координатах «нагрузка – количество шарниров»;
- величина накопленного повреждения, измеряемая количеством пластических шарниров и процент полного или частично исчерпавших несущую способность стержней к общему количеству стержней в структурной конструкции системы «БрГТУ».

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Драган, В.И. Механика большепролетных металлических структурных конструкций системы «БрГТУ» / В.И. Драган, Н.Л. Морилова // Труды VI Международного симпозиума по трибофатике МСТФ 2010: в 2 ч. – Минск: БГУ, 2010. – Ч. 2 – С. 317–322.
2. Драган, В.И. Методика расчета живучести структурных конструкций системы «БрГТУ» / В.И. Драган, Н.Л. Морилова // Вестник БрГТУ. – № 1(73): Архитектура и строительство – Брест: БрГТУ, 2012. – С. 39–46.
3. Драган, В.И. Оценка надежности конструкций системы «БрГТУ» на стадии проектирования методом прямого расчета вероятности отказа / В.И. Драган, В.В. Тур, Н.Л. Морилова, А.В. Дмитриева // Вестник БрГТУ. – №1 (79): Архитектура и строительство – Брест: БрГТУ, 2013. – С. 43–50.
4. Драган, В.И. Комбинированная структурная оболочка покрытия ледового катка по ул. Головацкого в городе Гомеле / В.И. Драган, А.Б. Шурин, А.В. Мухин, Н.Н. Шалобыта // Сборник трудов XVIII международного научно-методического семинара: в 2-х т. – Новополоцк, 28–29 ноября 2012 / Под общ. ред. Д.Н. Лазовского, А.И. Колтунова. – Новополоцк: ПГУ, 2012. – Т. 1. – С. 53–58.
5. Основы проектирования конструкций: ТКП EN 1990 – Мн.: Тип-проект, 2011 – 137 с.
6. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения по расчету: ГОСТ 27751-88.
7. Нагрузки и воздействия. Строительные нормы и правила: СНиП 2.01.07-85 / Госстрой СССР. – М.: ГП ЦПП, 1996. – 44 с.

Материал поступил в редакцию 19.03.14

#### DRAGAN V.I., MORILOVA N.L. Survivability criteria structural designs of the system «BSTU»

The article, based on previously developed methods for determining the reliability of complex spatial systems on the basis of nodal connection system «BSTU» were are defined numerical characteristics of reliability, coverage under the strain of their nonlinear work, determined the value of accumulated damage, built nonlinear deformation diagram.

The results obtained enable nonlinear calculations of the comparative analysis of complex structural forms on the basis of the system «BSTU».