

В.И. ДРАГАН, Н.Л. МОРИЛОВА

Брестский государственный технический университет

## **БОЛЬШЕПРОЛЕТНАЯ МЕТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРНАЯ КОНСТРУКЦИЯ СИСТЕМЫ «БрГТУ» ДЛЯ ПОКРЫТИЯ СПОРТИВНОГО КОМПЛЕКСА В Г. ГРОДНО, ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ЕЕ ЖИВУЧЕСТИ**

В статье описано конструктивное решение спортивного комплекса в г. Гродно. Конструкция покрытия является комбинированной и состоит из структурной плиты и треугольной пространственной фермы, узлы которой запроектированы с применением балансирного шарнира. Техническая новизна данной разработки состоит в возможности собирать большепролетную конструкцию на строительной площадке без применения сварки, всегда обеспечить сборку конструктивных элементов фермы, т.к. балансирный шарнир позволяет компенсировать отклонения в размерах стержней конструкции за счет неточности изготовления и температурных деформаций.

В статье описаны методики расчета на прогрессирующее обрушение, смоделированы ситуации прогрессирующего обрушения для комбинированного покрытия СК в г. Гродно. Проведен анализ напряженно-деформированного состояния конструкции покрытия на стадии прогрессирующего обрушения. Моделирование ситуаций прогрессирующего обрушения убедительно доказывает надежную работу сооружения на любые катаклизмы техногенного и природного характера и исключает ситуацию прогрессирующего обрушения.

Проведенный анализ доказывает эффективность применения большепролетных комбинированных конструкций покрытий для зданий любых назначений.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В конце XIX в. большими считались пролеты 12÷18 м, во второй половине XX в. - 30÷40 м. На сегодняшний день уникальные большепролетные здания - объекты, характеризующиеся по критерию технической сложности, следующими параметрами:

- Пролеты свыше 100 м, при конструктивных решениях, прошедших успешную апробацию в практике проектирования, строительства и эксплуатации;
- Пролеты свыше 60 м, при принципиально новых конструктивных решениях, требующих разработки специальных методов расчета, экспериментального исследования на физических моделях и т.п. [1].

Одной из разновидностей большепролетных покрытий являются комбинированные большепролетные покрытия, т.е. в одном покрытии может сочетаться

две и более самостоятельных несущих конструкций, работающих вместе как единое целое и в случае локального повреждения, способные перераспределить усилия. К числу таких конструкций принадлежит и универсальный спортивный комплекс для игровых видов спорта в г. Гродно.

## 1. КОНСТРУКТИВНОЕ РЕШЕНИЕ ПОКРЫТИЯ УНИВЕРСАЛЬНОГО СПОРТИВНОГО КОМПЛЕКСА В Г. ГРОДНО

Покрытие представляет собой в плане квадрат  $74 \times 74$  м, опирающийся на колонны (и диафрагмы жесткости) по контуру  $64 \times 64$  м, с пятиметровыми консольными свесами по всем граням (рис. 1).

Несущие конструкции запроектированы в виде металлической трубчатой регулярной структурной плиты с квадратными ячейками решеток поясов. Стержни верхнего и нижнего решеток поясов и раскосов имеют одинаковую длину, образуя ортогональную сетку с ячейкой  $3 \times 3$  м, высота структурной плиты 2,12 м по осям поясов. Структурная плита сломана по диагонали и образует два треугольных ската с уклоном  $15^\circ$ . Структура опирается по контуру на 48 железобетонных колонн, 4 диафрагмы жесткости. Также структурная плита опирается на нижние пояса треугольной пространственной фермы, расположенные по диагонали плана здания. По верхним узлам структурных плит устанавливаются прогоны из швеллеров, на которые укладывается профнастил и элементы кровли.

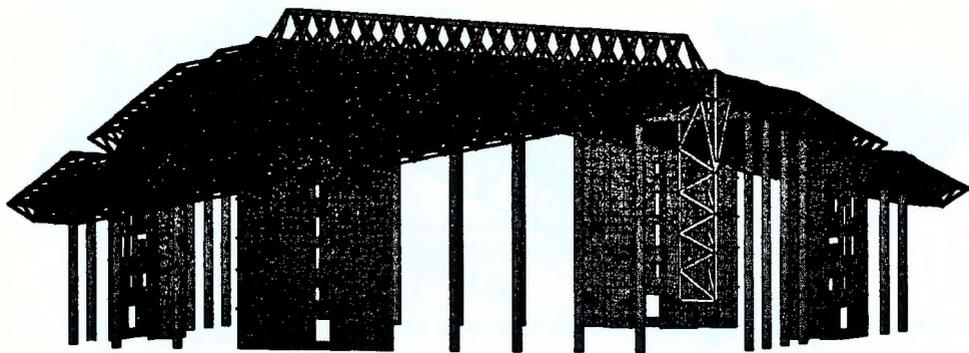


Рис. 1. Модель СК в г. Гродно

Структурная плита покрытия системы «БрГТУ» запроектирована из круглых труб, соединенных полыми шаровыми узлами (рис. 2а). Структура имеет ортогональную верхнюю и нижнюю поясные сетки. Стержни пространственной структуры запроектированы из бесшовных горячекатаных труб, в торцы которых ввариваются круглые гайки резьбой М24, М30 и М36. Для стержневых элементов с усилиями более 400 кН сопряжение с узлами выполняется через фасонку с помощью монтажной сварки (рис. 2б). Узловое соединение

в местах опирания структурной плиты на сталебетонные колонны - типовой узел, подкрепленный ребрами жесткости (рис. 2в).

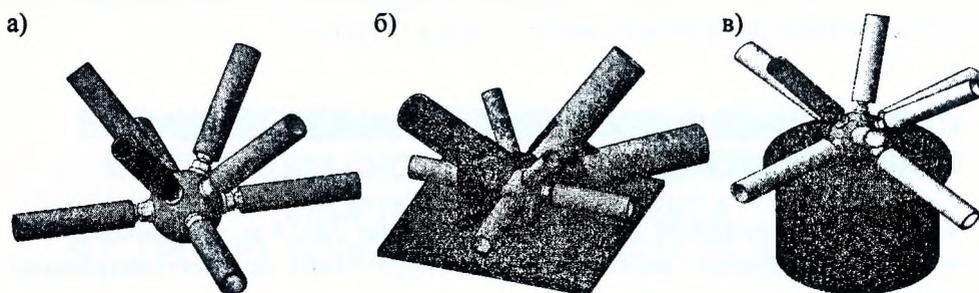


Рис. 2. Типовой узел системы БрГТУ (а), узел опирания на диафрагмы жесткости (б), узел опирания на колонны (в)

Треугольная пространственная ферма состоит из двух плоских ферм, установленных под углом  $63^\circ$ , связанных структурной плитой. Верхний и нижний пояса плоских ферм запроектированы из бесшовных горячекатаных труб  $\varnothing 273 \times 10$ , а раскосы из труб -  $\varnothing 168 \times 8$ . На нижние пояса ферм с шагом 4,24 м опирается структурная плита, что обусловило геометрию плоских ферм (рис. 3, 4а). Узлом опирания структурной плиты на нижний пояс фермы также является узел структурной конструкции типа «БрГТУ» в форме полого шара, подкрепленного ребрами жесткости (рис. 4б).

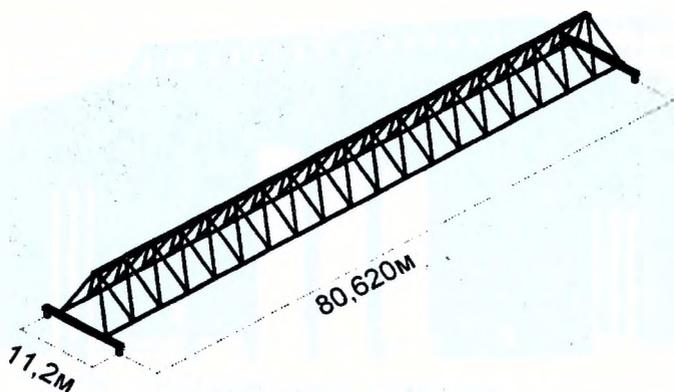


Рис. 3. Конструктивная схема фермы

Так как геометрические размеры запроектированных плоских ферм, больше транспортных габаритов, то сборку ферм необходимо производить на строительной площадке. Каждый из поясов плоских ферм разбит на отправочные марки. Стыки отправочных марок производятся вне узлов фермы и опорных узлов структуры. Укрупнительные стыки плоских ферм выполняются при помощи внутренних втулок и наружных муфт на сварке.

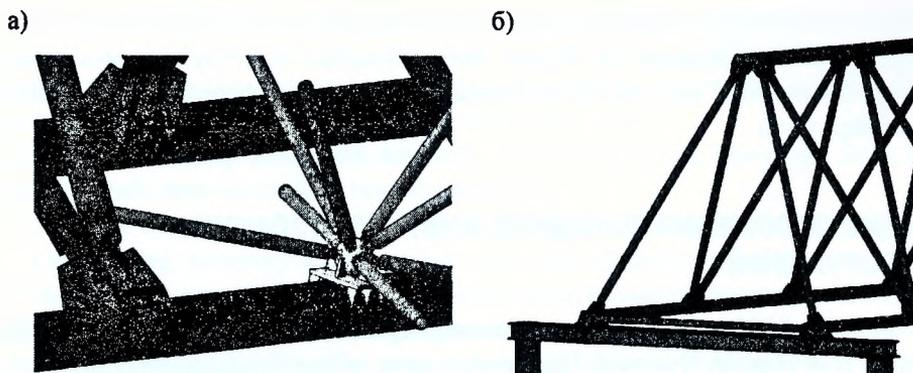


Рис. 4. Узел опирания нижнего пояса структурной плиты на нижний пояс фермы (а); конструкция опирания пространственной фермы на колонны (б)

Узел соединения решетки раскосов с поясами фермы запроектирован с применением балансирующего шарнира (рис. 5).

Балансирный шарнир состоит из круглой втулки с эксцентрично расположенным отверстием (эксцентриситет 10 мм) и соединительной детали  $\varnothing 50$  мм. После сборки узлового элемента соединительная деталь фиксируется двумя круглыми гайками. Крепежный элемент показан на рисунке 5в.

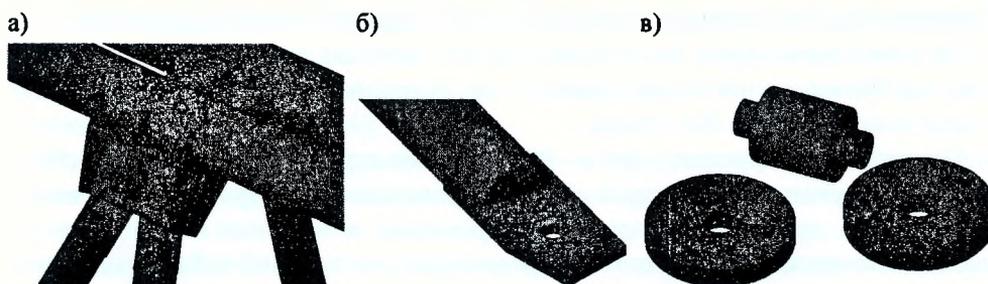


Рис. 5. Узел соединения раскосов и поясов фермы (а); конструктивное решение балансирующего шарнира (б); крепежный элемент (резьба не показана) (в)

Балансирный шарнир позволяет центрировать отверстия в фасонках стержней раскосов и поясов и обеспечивает необходимые допуски для сборки конструкции (рис. 5). В этом случае все стержни ферм испытывают только осевые усилия (центральное растяжение или центральное сжатие), что позволяет более полно использовать материал. Устройство узлов с применением балансирующего шарнира обеспечивает простоту сборки плоских ферм на строительной площадке с учетом температурных деформаций и конструктивных несовершенств.

Большепролетная треугольная пространственная ферма опирается на балки, состоящие из двух широкополочных двутавров 40Ш1, соединенных между собой накладками. Двутавровые балки в свою очередь опираются на сталебетонные колонны  $\varnothing 63$  см, расстояние между осями колонн - 11,2 м. Сталь-

ная плита опорного узла фермы устанавливается на фторопластовую прокладку, в месте опирания на балки, такая опорная конструкция исключает передачу распорных усилий на колонны при прогибах фермы и при изменении температуры.

## 2. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПО ОЦЕНКЕ ЖИВУЧЕСТИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

14 февраля 2005 г. обрушилась оболочка Трансваль парка (Москва), 4 декабря 2005 г. в городе Чусовой Пермского края обрушилась кровля бассейна, 11 декабря 2005 г. в Москве - крыша следственного изолятора УВД Юго - Восточного административного округа, 2 января 2006 г. в Баварии упала кровля катка, на следующий день в Чехии под тяжестью снега обрушилась крыша супермаркета, 28 января 2006 г. в польском городе Катовице - крыша выставочного центра, 7 февраля 2006 г. в супермаркете города Тегинг-ам-Инн на юге Германии рухнула крыша, 23 февраля 2006 г. произошло обрушение покрытия Бауманского рынка (Москва), весной 2007 г. произошла авария при монтаже покрытия ККЦ в Крылатском (Россия), в августе 2009 г. обрушилось структурное покрытие стадиона Shah Alam (Малайзия), 20 октября 2009 г. при монтаже мембранного покрытия произошел пожар в г. Ангарск (Россия). К сожалению, это далеко не полный список аварий зданий и сооружений.

За этими названиями стоит более тысячи людских трагедий. Но, к сожалению, проблема эта настолько сложна и многогранна, что вопрос: кто виноват? - чаще всего остается без ответа.

Статистика показывает, что в ~80% случаев строительных аварий с обрушением несущих конструкций объекта происходит в результате человеческих ошибок, допущенных при проектировании, возведении и эксплуатации зданий и сооружений. Эти ошибки формируют внутренний (объектный) риск аварии, от величины которого зависит не только срок службы (ресурс) объекта, но и размер ущерба в случае его аварии.

Для большепролетных уникальных конструкций, в отличие от типовых, делать акцент на изучении конкретных аварий и поиске статистических зависимостей причин с целью их предупреждения бесперспективно. Так аварии большепролетных покрытий являются еще более редкими событиями, чем их строительство. А авария сооружения практически непредсказуема, её причины могут быть самыми разнообразными и неожиданными, начиная от тщательно разработанного террористического акта и кончая непростительной небрежностью в эксплуатации сооружения. Изучая известные аварии большепролетных покрытий, приведшие к серьезным последствиям, можно заключить, что последние происходили за последние три десятилетия со средней периодичностью раз в два-три года, а их причины ничем не отличаются от причин аварий обычных зданий.

По статистике, 85÷90% аварий происходит во время эксплуатации зданий. Однако, когда начинают расследовать их причины, в 90% этих аварий во время эксплуатации причинами являются ошибки, допущенные на стадиях изыскания, проектирования и самого строительства.

Именно поэтому наиболее важной задачей является проверка живучести конструкций, еще на стадии проектирования.

Сегодня отсутствуют единые общепринятые определения (термины) по этой проблеме, поэтому в начале хотелось бы привести обобщенные данные отечественных и зарубежных стандартов строительного проектирования, обзор современной строительной литературы по этому вопросу.

Для строительных объектов *живучесть* понимается как свойство (качество) поврежденной системы полностью или частично выполнять свое функциональное назначение [2]. Понятие живучести неразрывно связано с понятием прогрессирующего обрушения: при моделировании ситуаций прогрессирующего (лавинообразного) обрушения выявляется степень живучести сооружения.

*Лавинообразное (прогрессирующее) обрушение* - распространение начального локального повреждения в виде цепной реакции от элемента к элементу, которое, в конечном счете, приводит к обрушению всего сооружения или непропорционально большей его части [3].

*Аварийная расчетная ситуация* (которая может быть причиной разрушения) - явление, представляющее исключительные условия работы конструкции на аварийные воздействия, имеющие малую вероятность появления и небольшую продолжительность, но приводящие, в большинстве случаев, к тяжелым последствиям [4].

Что касается способов расчета зданий на прогрессирующее обрушение, можно выделить наиболее часто используемые проектировщиками. Это такие способы, как:

- > Общее упрочнение всего здания (разрушение одного из элементов здания не приводит к разрушению всего строения) - т.е. несущим элементам здания придается повышенный запас прочности;
- > Удаление элемента из расчетной схемы - т.е. расчет сводится к нахождению «ключевого» элемента. Мы считаем, что какой-либо элемент получил локальные повреждения, не включился в работу - его нет. Каким образом система будет работать без него?
- > Аварийное воздействие на расчетную схему, т.е. на здание или сооружение внезапно действует некая сила.

Проведя сравнительный анализ, было установлено, что наиболее неблагоприятным методом моделирования аварийной ситуации является метод с удалением элементов конструкции. Поэтому расчет на устойчивость к прогрессирующему обрушению покрытия СК в г. Гродно был рассчитан именно таким методом.

### 3. ПРОВЕРКА НА УСТОЙЧИВОСТЬ К ПРОГРЕССИРУЮЩЕМУ (ЛАВИНООБРАЗНОМУ) ОБРУШЕНИЮ ПОКРЫТИЯ УНИВЕРСАЛЬНОГО СПОРТИВНОГО КОМПЛЕКСА

Конструкция данного спорткомплекса относится к уникальным, не типовым сооружениям, т.е. к зданиям с I (повышенным) уровнем ответственности. Все здания I уровня ответственности должны быть рассчитаны на устойчивость к прогрессирующему обрушению.

С одной стороны:

- необходимо обеспечить определенную степень безопасности находящихся в зданиях людей и сохранности их имущества за счет уменьшения вероятности прогрессирующего обрушения при локальных разрушениях несущих конструкций.

С другой стороны:

- при стремлении запроектировать здание, устойчивое к прогрессирующему обрушению - его стоимость стремится к бесконечности.

Расчет на прогрессирующее обрушение проводился по схеме, включающей в себя два этапа [5].

Первый этап включал следующие действия:

- Статический расчет с целью определения напряженно - деформированного состояния конструкции в нормальных условиях эксплуатации;
- Составление различных расчетных сочетаний нагрузок и выбор наиболее неблагоприятного сочетания;
- Подбор и проверка сечений элементов стальных конструкций.

Второй этап включал следующие действия:

(Цель расчета - нахождение «ключевого» элемента)

- Список элементов, входящих во внезапно удаляемый фрагмент конструкции;
- Проверочную комбинацию загружений, в которую входят постоянные нагрузки и длительная часть временных нагрузок  $\gamma_f = 1$  (нормативные значения);
- Анализ результатов расчета.

Учитывая все методики расчета на прогрессирующее обрушение, необходимо было найти «ключевой» элемент, потеря или разрушение которого повлечет за собой максимальные разрушения всей конструкции покрытия.

При нахождении «ключевого» элемента удалялись следующие элементы конструкции (рис. 6):

- Элемент н.п. фермы в середине пролета (только в одной ферме);
- Элемент в.п. фермы в середине пролета (только в одной ферме);
- Опорный раскос фермы (только в одной ферме),
- Элементы кристалла структуры в середине пролета;
- Элементы кристалла структуры в опорной части (около диафрагмы на 1/4 части структуры).

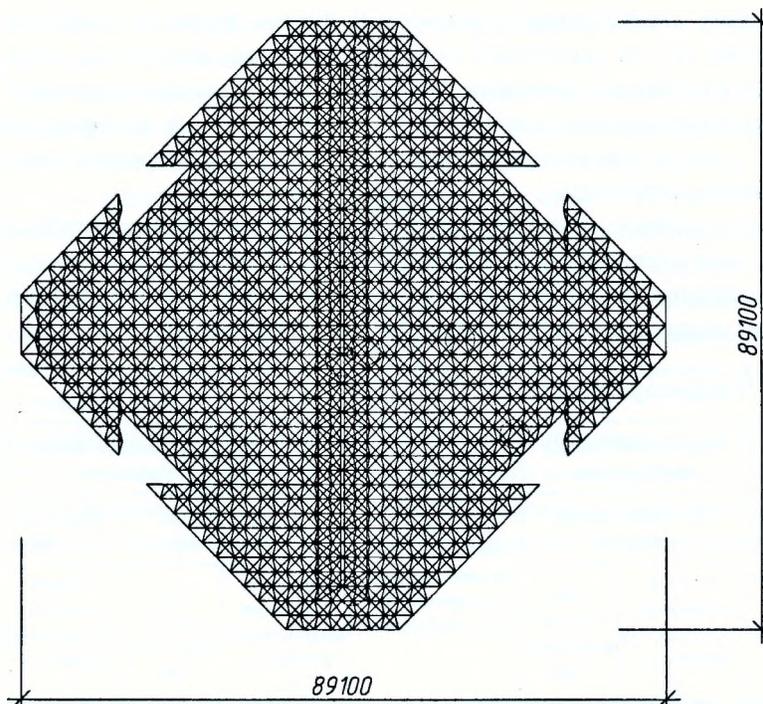


Рис. 6. Схема расположения удаляемых элементов

Проанализировав все модели разрушения, мы пришли к выводу, что одними из самых ответственных элементов конструкции покрытия являются элементы нижнего пояса пространственной фермы и опорные раскосы фермы.

Устойчивость к прогрессирующему обрушению проверялась расчетом на особое сочетание нагрузок и воздействий, включающее постоянные и временные длительные нагрузки (коэффициенты надежности = 1), т.е.  $1(G_k+S_k+W_k)$  где:  $G_k$  - нормативная постоянная нагрузка,  $S_k$  - нормативная снеговая нагрузка,  $W_k$  - нормативная ветровая нагрузка.

#### 4. СОПОСТАВЛЕНИЕ НОРМАЛЬНОЙ РАБОТЫ КОНСТРУКЦИИ И СЦЕНАРИЕВ ПРОГРЕССИРУЮЩЕГО ОБРУШЕНИЯ

Для моделирования ситуации с элементом панели нижнего пояса можно сделать вывод о том, что при выключении из работы элемента нижнего пояса в середине пролета одной из плоских ферм усилия во всех элементах нижнего пояса этой фермы уменьшаются, а в работу включается структура, в которой значительно возрастают усилия в элементах нижнего пояса и вторая плоская ферма, но ни одно из них при заданных нагрузках не достигает предельных усилий, т.е. при разрушении нижнего пояса его роль играют элементы структуры.

Еще одним ответственным элементом фермы является опорный раскос. При удалении его из расчетной схемы в элементах структуры, расположенных вблизи удаленного элемента, также заметно повышаются усилия. Кроме того, перераспределение усилий идет на колонны, на которые опирается структура, а не те, на которые опираются балки, т.е. передача усилия идет через элементы структуры.

Для более удобного анализа все результаты были сведены в таблицу 1.

Как и у всех стержневых конструкций, у комбинированных структур их работа по перераспределению усилий ярче проявляется с увеличением нагрузки, а также при неравномерных (несимметричных) нагрузках.

Таблица 1. Перераспределение усилий

Элементы конструкции покрытия (при нормальной работе конструкции)	Нормальная работа конструкции		Элементы конструкции покрытия (при моделировании прогрессирующего обрушения)	Моделирование сценариев прогрессирующего обрушения			
	От нормативных нагрузок			Удаление панели нижнего пояса		Удаление опорного раскоса	
	Усилия в наиболее нагруженных элементах, т.с.	Мах прогиб покрытия мм		Усилия в наиболее нагруженных элементах, т.с.	Мах прогиб покрытия мм	Усилия в наиболее нагруженных элементах, т.с.	Мах прогиб покрытия мм
Ферма	-59,3	-106,41	Ферма с удаленным эл-м	-54,8	-112,85	-57,63	-107,45
	+74,8		Ферма с не удаленным эл-м	+46,7		+74,01	
Верхний пояс структуры	-29,5		Верхний пояс структуры	-33,3		-30,0	
	+45,7			+47,2		+46,26	
Решетка раскосов	-57,81		Решетка раскосов	-59,38		-59,0	
	+41,05			+42,07		+41,49	
Нижний пояс структуры	-43,54		Нижний пояс структуры	-44,44		-45,22	
	+18,26			+18,09		+18,68	

Необходимо отметить, что после проверки всех элементов покрытия для каждой из моделируемых ситуаций усилие ни в одном из элементов не достигает предельных значений. Если продолжить моделирование и пойти дальше - удалить еще элемент вблизи уже удаленных, то можно проследить более «явное» перераспределение усилий и достижение предельных усилий элементами, находящимися вблизи удаляемых элементов, т.е., по сути, основная часть покрытия все равно сохранит свою целостность.

### Некоторые обобщения

При реализации данного режима принималась во внимание очевидная условность исходных предпосылок, заключающаяся в следующем:

- нет достоверной информации о месте и причине возникновения процесса и характере его протекания;
- реальные параметры разрушения могут далеко отстоять от условий прочности, приведенных в нормах, т.к. известно, что расчетные значения параметров прочности могут существенно отличаться от наблюдаемых в натуре.

Кроме того, невозможно запроектировать и построить сооружение абсолютно безопасным и при этом не учитывать стоимость предотвращения аварийных ситуаций, также сооружения не могут быть совершенно свободными от риска обрушения из-за неопределенностей требований к системе, разброса технических свойств строительных материалов, трудностей адекватного моделирования поведения системы даже с использованием современных программных комплексов [6].

Таким образом, в результате численного моделирования можно получить качественную оценку характеристик устойчивости конструкции по отношению к прогрессирующему обрушению, а также сопоставить несколько возможных сценариев обрушения с целью выявления слабых мест конструкции.

## ВЫВОД

Из моделирования данных ситуаций можно сделать вывод, что большепролетное комбинированное покрытие спортивного комплекса в г. Гродно обладает высокой надежностью и живучестью в работе на восприятие проектных нагрузок и воздействий и исключает возможность развития прогрессирующего обрушения при возникновении непредвиденных катаклизмов природного и техногенного характера.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Еремеев Л.Г., Предотвращение лавинообразного (прогрессирующего) обрушения несущих конструкций уникальных большепролетных сооружений при аварийных воздействиях, П.Г. Еремеев, Строительная механика и расчёт сооружений 2006, № 2.
- [2] Marco Haberland. Progressive Collapse Nomenclature / Marco Haberland, Uwe Starossek // Hamburg University of Technology, Hamburg, Germany - Structural Engineers © 2009 ASCE.
- [3] ASCE 7\_02, «Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, 2002 edition» American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 2002.
- [4] 3.ENV 1991\_2\_7: 1998. Eurocode 1: Basis of design and actions on structures. Accidental actions due to impact and explosions. - Brussels: CEN, 1998.
- [5] Перельмутер А.В., Расчет монолитных жилых зданий на прогрессирующее обрушение в среде системы «SCAD OFFICE».
- [6] МДС 20-2.2008 «Временные рекомендации по обеспечению безопасности большепролетных сооружений от лавинообразно (прогрессирующего) обрушения при аварийных воздействиях», Департамент градостроительной политики, развития и реконструкции г. Москвы, Москва 2008.