

## КОНСТРУКТИВНОЕ РЕШЕНИЕ ПОКРЫТИЯ УНИВЕРСАЛЬНОГО СПОРТИВНОГО КОМПЛЕКСА В Г. ГРОДНО И ЕГО ПРОВЕРКА НА УСТОЙЧИВОСТЬ К ПРОГРЕССИРУЮЩЕМУ ОБРУШЕНИЮ

**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 конструкции, работающие вместе как единое целое и в случае локального повреждения, способные перераспределять усилия. К числу таких конструкций принадлежит и универсальный спортивный комплекс для игровых видов спорта в г. Гродно.

**Конструктивное решение покрытия универсального спортивного комплекса в г. Гродно**

Покрытие представляет собой в плане квадрат 74x74 м, опирающийся на колонны (и диафрагмы жесткости) по контуру 64x64 м, с пятиметровыми консольными свесами по всем граням.

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 3x3 м, высота структурной плиты 2,12 м по осям поясов. Структурная плита сломана по диагонали и образует два треугольных ската с уклоном 15°. Структурная конструкция опирается по контуру на 48 железобетонных колонн, 4 диафрагмы жесткости. Также структурная плита опирается на нижние пояса треугольной пространственной фермы. По верхним узлам структурных плит устанавливаются прогоны из швеллеров, на которые укладывается профнастил и элементы кровли.

Структурная плита покрытия запроектирована из круглых труб, соединенных полыми шаровыми узлами системы «БрГТУ» (рис. 1). 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.

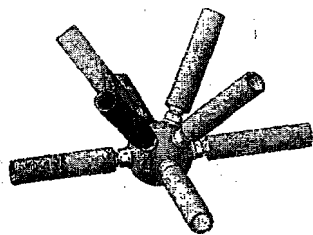


Рис. 1 – Типовой узел системы БрГТУ

Треугольная пространственная ферма состоит из двух плоских ферм, установленных под углом 63°, 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 обу-

словило геометрию плоских ферм (рис. 2, 3а). Узлом опирания структурной плиты на нижний пояс фермы также является узел структурной конструкции типа «БрГТУ» в форме полого шара, подкрепленного ребрами жесткости (см. рис. 3б).

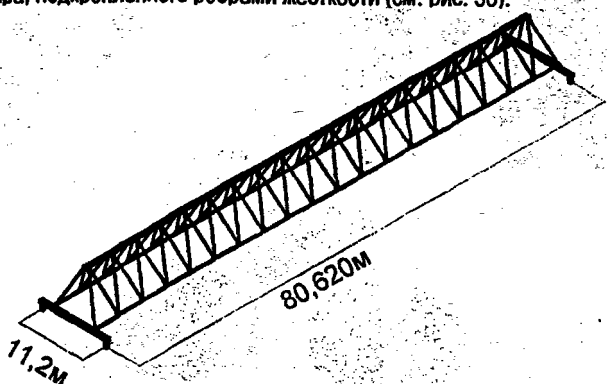


Рис. 2 – Конструктивная схема фермы

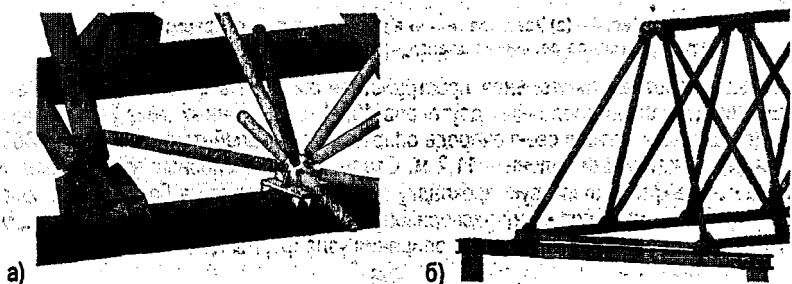


Рис. 3 – (а) Узел опирания нижнего пояса структурной плиты на нижний пояс фермы; (б) конструкция опирания пространственной фермы на колонны

Т.к. 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.

Узел соединения решетки раскосов с поясами фермы запроектирован с применением балансирующего шарнира (рис. 4).

Балансирный шарнир состоит из круглой втулки с эксцентрично расположенным отверстием (эксцентриситет 10 мм) и соединительной детали Ø50 мм. После сборки узлового элемента соединительная деталь фиксируется двумя круглыми гайками. Крепежный элемент показан на рис. 4в.

Балансирный шарнир позволяет центрировать отверстия в фасонках стержней раскосов и поясов и обеспечивает необходимые допуски для сборки конструкции (рис. 4). 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.

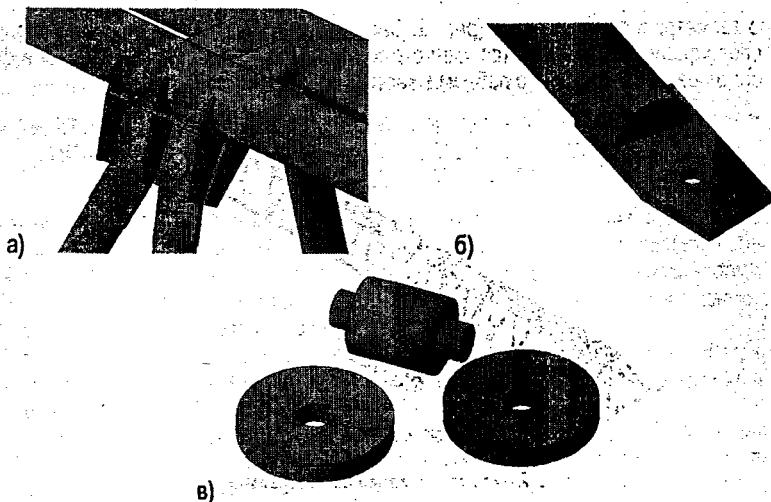


Рис. 4 – (а) Узел соединения раскосов и поясов фермы; (б) конструктивное решение балансирующего шарнира; (в) крепежный элемент

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. Стальная 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. Решение опирания узла фермы на балки см. рис. 5.



Рис. 5 – Узел опирания фермы на двутавровые балки

#### Общие положения по расчету на прогрессирующее обрушение

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.

*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 [2].

**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 [3].

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, мы пришли к выводу, 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.

**Проверка на устойчивость к прогрессирующему (лавинаобразному) 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 [4].

Первый этап включал следующие действия:

• Статический расчет с целью определения НДС конструкции в нормальных условиях эксплуатации;

• Составление различных РСН 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 загрузок, в которую входят постоянные нагрузки и длительная часть временных нагрузок с  $k=1$  (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):

• Эл-т н.п. фермы в середине пролета (только в одной ферме);

- Эл-т в.п. фермы в середине пролета (только в одной ферме);
- Опорный раскос фермы (только в одной ферме);
- Элементы кристалла структуры в середине пролета (на 1/2 части структуры);
- Элементы кристалла структуры в опорной части (около диафрагмы на 1/4 части структуры).

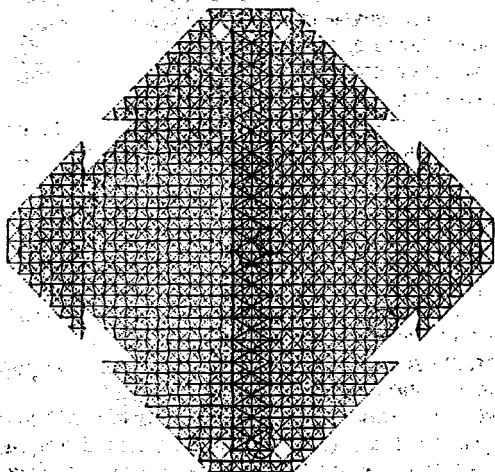


Рис. 6 – Схема с расположением удаляемых элементов

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.

**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 ячея проявляется с увеличением нагрузки, а также при неравномерных (несимметричных) нагрузках.

Таблица 1

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.	max прогиб покрытия, мм		Усилия в наиболее нагруженных элементах, т.с.	max прогиб покрытия, мм	Усилия в наиболее нагруженных элементах, т.с.	max прогиб покрытия, мм
Ферма	-59.3 +74.8	-106.41	Ферма с удаленным эл-м	-54.8 +46.7	-112.85	-57.63 +74.01	-107.45
			Ферма с не удаленным эл-м	-58.15 +91.76		-57.54 +75.23	
Верхний пояс структуры	-29.5 +45.7		Верхний пояс структуры	-33.3 +47.2		-30.0 +46.26	
Решетка раскосов	-57.81 +41.05		Решетка раскосов	-59.38 +42.07		-59.0 +41.49	
Нижний пояс структуры	-43.54 +18.26		Нижний пояс структуры	-44.44 +18.09		-45.22 +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 достижения предельных усилий элементами, находящимися вблизи удаляемых элементов. Т.е., по сути, основная часть покрытий 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 природе.

Кроме того, в «Рекомендациях по снижению опасности (предотвращению) аварийных воздействий и лавинообразного (прогрессирующего) обрушения для большепролетных зданий», разработанных НИЦ «СТРОИТЕЛЬСТВО» и ЦНИИСК им. Кучеренко, указано, что «...невозможно запроектировать и построить сооружение абсолютно безопасным и при этом не учитывать стоимость предотвращения аварийных ситуаций...», а 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...» [5].

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 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 П.Г. Предотвращение лавинообразного (прогрессирующего) обрушения несущих конструкций уникальных большепролётных сооружений при аварийных воздействиях / П.Г. Еремеев // Строительная механика и расчёт сооружений. – 2006. – № 2.
2. ASCE 7\_02, "Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, 2002 edition," American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 2002.
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.
4. Перельмутер А.В. Расчёт монолитных жилых зданий на прогрессирующее обрушение в среде системы «SCAD OFFICE».
5. МДС 20-2.2008 «Временные рекомендации по обеспечению безопасности большепролётных сооружений от лавинообразно (прогрессирующего) обрушения при аварийных воздействиях» / Департамент градостроительной политики, развития и реконструкции г. Москвы / Москва 2008.

УДК 624.155.15(088.8)

Сивуда Г.Г., Азаров Д.А.

Научный руководитель: доцент Пчелин В.Н.

### ПОВЫШЕНИЕ К.П.Д. УДАРА ЗА СЧЕТ УВЕЛИЧЕНИЯ СООТНОШЕНИЯ МАСС УДАРНОЙ ЧАСТИ МОЛОТА И ПОГРУЖАЕМОЙ СВАИ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ ПОГРУЖЕНИЯ СОСТАВНЫХ ТЕЛЕСКОПИЧЕСКИХ СВАИ

С учетом мирового финансового и энергетического кризисов правительство республики особый упор делает на разработку и широкое внедрение в производство энергоэкономичных технологий.

В свайном фундаментастроении важное место в решении поставленной задачи отводится совершенствованию нового сваебойного оборудования, обеспечивающего погружение в грунт не менее 80% свай заводского изготовления и характеризующегося невысоким коэффициентом полезного действия (К.П.Д.) удара [1].

К.П.Д.  $\eta$  в общем случае представляет собой долю совершенной полезной работы (энергии) от затраченной полной подведенной работы (энергии) и определяется по выражению:

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^n F_i \delta_i}{mghn} \quad (1)$$

- где  $F_i$  – сила сопротивления грунта статическому погружению сваи в период  $i$ -го удара, Н;  
 $\delta_i$  – величина погружения сваи (осадка) от действия  $i$ -го удара, м;  
 $m$  – масса ударной части сваебойной установки, кг;  
 $h$  – высота свободного падения ударной части, м;  
 $n$  – количество ударов на погружение сваи, шт.;  
 $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения.

Для определения энергоёмкости и величины К.П.Д., к сожалению, нельзя воспользоваться теоретическими положениями механики при свободном соударении упругих тел, так как процесс погружения тел свай происходит в более сложных условиях (некоторая масса грунта присоединяется к массе свай, нарушая правильность результатов вычисления К.П.Д. по классическим формулам теории удара) и зависит от значительного числа влияющих факторов, в том числе и от формы соударяемых тел и условий соударения. В общем случае погружение сваи можно представить как процесс соударения