



## ОСОБЛИВОСТІ ПРОЕКТУВАННЯ УНІКАЛЬНИХ ВЕЛИКОПРОЛЁТНИХ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД

**П. Г. Єремєєв**

*Лабораторія металевих конструкцій, Центральний науково-дослідний інститут будівельних  
конструкцій (ЦНДІБК ім. В. А. Кучеренка) — філія ФДУП "НДЦ "Будівництво",*

*вул. 2-а Інститутська, 6, м. Москва, 109428, Росія.*

*E-mail: LMK317sp@mtu-net.ru*

*Отримана 17 січня 2006; прийнята 14 березня 2006*

**Анотація.** У статті узагальнений досвід проектування унікальних великопролётних будівель і споруд, зведених при участі ЦНДІБК ім. В. А. Кучеренка за останні 30 років. Висвітлено основні етапи проектування, питання навантажень і впливів, розрахунків, науково-технічного супроводу, деяких спеціальних проблем проектування.

**Ключові слова:** унікальні великопролётні будівлі і споруди, проектування, розрахунки.

## ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ УНИКАЛЬНЫХ БОЛЬШЕПРОЛЁТНЫХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

**П. Г. Еремеев**

*Лаборатория металлических конструкций, Центральный научно-исследовательский институт  
строительных конструкций (ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко) —*

*филиал ФГУП "НИЦ "Строительство",*

*ул. 2-я Институтская, 6, г. Москва, 109428, Россия.*

*E-mail: LMK317sp@mtu-net.ru*

*Получена 17 января 2006; принята 14 марта 2006*

**Аннотация.** В статье обобщён опыт проектирования уникальных большепролётных зданий и сооружений, возведённых при участии ЦНИИСК им. В.А.Кучеренко в последние 30 лет. Освещены основные этапы проектирования, вопросы нагрузок и воздействий, расчётов, научно-технического сопровождения, некоторых специальных проблем проектирования.

**Ключевые слова:** уникальные большепролётные здания и сооружения, проектирование, расчёты.

## DESIGN PECULIARITIES FOR THE UNIQUE LARGE-SPAN BUILDINGS AND STRUCTURES

**P. G. Yeremeyev**

*Department for metal structures, Central Research Institute  
for Building Structures (Kucherenko TsNIISK) — branch of FGUP "NITs "Stroitelstvo",  
2-nd Institutskaya Str. 6, Moscow, 109428, Russia.  
E-mail: LMK317sp@mtu-net.ru*

*Received January 17, 2006; accepted March 14, 2006*

**Abstract.** The article presents an experience of design peculiarities for the unique large-span buildings and structures constructed in collaboration with Kucherenko TsNIISK for the last 30 years. The main stages of design, loads and actions, analysis, scientific and technical investigation, some special problem of design are illustrated.

**Keywords:** unique buildings and buildings of major spans, projection, designs.

### 1. Введение

В настоящей работе обобщен опыт проектирования уникальных большепролетных зданий и сооружений (далее сооружений), возведенных при участии ЦНИИСК им. Кучеренко за последние 30 лет. В их числе, крупнейшие в Европе — универсальный стадион "Олимпийский", велотрек "Крылатский", Дворец спорта "Измайлово", светопрозрачное покрытие "Старого Юстиного Двора", козырьки над трибунами стадионов "Лужники" и "Локомотив", крытый конькобежный центр в Крылатском, футбольно-легкоатлетический манеж в Казани и ряд других. Отметим возрастающий объем такого строительства у нас в стране и за рубежом. В первую очередь это стадионы, крытые спортивные и зрелищные залы, выставочные павильоны.

К уникальным большепролетным объектам, как правило, следует относить сооружения с возможностью одновременного пребывания в них людей численностью более 300 человек и отвечающих следующим условиям:

- пролет свыше 60 м, при принципиально новых конструктивных решениях, не прошедших апробацию в практике строительства и эксплуатации;
- пролет свыше 100 м, при конструктивных решениях, прошедших успешную апробацию в практике проектирования, строительства и эксплуатации.

Уникальные большепролетные сооружения имеют повышенный уровень ответственности по назначению, отказы которых могут привести к тяжелым экономическим и социальным последствиям [1]. В этой связи возникают дополнительные требования к номенклатуре и объемам изысканий и проектных работ, изготовлению и монтажу конструкций, правилам их приемки и эксплуатации. При проектировании уникальных сооружений возникают проблемы выходящие за рамки существующих нормативных документов. Новизна технических решений требует от инженера-конструктора глубоких специальных знаний, нужен опыт проектирования сооружений подобного рода. Все это определяет необходимость обязательного персонального лицензирования инженеров на право проектирования уникальных сооружений. Аналогичные положения включены в ряд национальных строительных норм. Например, в [2] отмечено: "... важно, что уникальные проекты должны выполняться специалистами, имеющими соответствующую квалификацию и практический опыт". Требования документа [3] предназначены, для гарантирования уровня безопасности, выполнения необходимых этапов проектирования, минимизации человеческих ошибок. Процесс проектирования должен быть формализован для обеспечения контроля его качества, требований

безопасности, эксплуатационной надежности и долговечности.

Наиболее важной особенностью проектирования уникальных большепролетных сооружений является генерирование идей, основанных на творческом потенциале инженера, который должен объединить свои профессиональные знания и опыт со способностью неограниченного созидания. Этот процесс не может быть компьютеризирован, так как творческий потенциал — привилегия человеческого ума и он абсолютно необходим для решения задач будущего проекта, тем более уникального. Компьютеру следует отвести правильную роль — роль технического инструмента.

При проектировании уникальных большепролетных сооружений, выдвигаемые идеи должны быть технически и экономически обоснованы. Необходим научный комплексный подход при решении задачи выбора приемлемых конструктивных решений, увязанных с функциональным назначением, архитектурными решениями, методами изготовления и монтажа, условиями эксплуатации. В полном объеме должны выполняться требования надёжности, технологичности и экономической эффективности, учитываться экологические и социальные факторы.

При нарушении указанных правил возможно возникновение аварийных ситуаций. Приведем несколько известных примеров частичных или общих отказов большепролетных покрытий: Hartford Coliseum (1978), Pontiac Stadium (1982), Minnesota Metrodome (1983), купол испытательного центра в Истре (1984), Миланский велотрек (1985), трансформирующееся покрытие Монреальского Олимпийского стадиона (1988), козырек над трибунами футбольного стадиона в Коре (2002), аквапарк в Москве (2004) и т.д. Согласно [4] главная причина отказов в строительстве с вероятностью 50% — ошибки проектирования. Другими причинами названы: нарушения технологии монтажа (17,5%); низкое качество материалов и конструкций (14,5%); недоработка нормативных документов (4%); прочие причины и их сочетания (14%). В работе [5] приведены несколько иные данные: ошибки проекта — 25%; дефекты изготовления и монтажа — 48%; низкое качество материалов — 6%; недоработка

норм проектирования — 4%; неправильная эксплуатация — 16%; прочее — 1%. Разница приведенных данных может быть объяснена, по-видимому, недостаточностью статистических материалов, несовершенством методики оценки причин аварий и т.п. Однако, настоятельно большая доля проектных ошибок. Указанные факторы, с определенной погрешностью, могут быть отнесены и к большепролетным уникальным сооружениям. Эти случаи — уроки, на которых должны быть изучены причины и механизмы аварий в строительстве, чтобы исключить возможность их возникновения в дальнейшем.

## 2. Основные этапы проектирования уникальных сооружений

При всей неповторимости уникальных большепролетных сооружений их проектирование должно обязательно включать следующие стадии [6]: постановка задачи, разработка и анализ вариантов технических решений, выбор окончательного варианта, разработка проектной документации с тщательной проверкой принятых решений. Необходимыми документами предшествующими проектным разработкам являются "Техническое задание" и "Специальные технические условия на проектирование" [7]. В СНиП 11-01-95 достаточно подробно приведены требования к составу "Технического задания на проектирование", основными из которых являются: цели и задачи проекта, функциональное назначение, объемно-планировочные и архитектурные решения, особые условия строительства, исходные данные проектирования, требования по вариантной и конкурсной разработке и т.п. "Специальные технические условия на проектирование", разрабатываемые заказчиком совместно с научно-исследовательскими и специализированными организациями, должны отражать специфику их проектирования, строительства и эксплуатации, определять уровень ответственности и уникальность сооружения, расчетный срок его эксплуатации, требования по применению и объемам опытно-конструкторских и исследовательских работ. Эти документы должны четко формулировать постановку задач проектирования, определять пути их решения и таким образом воздействовать на качество проекта.

Наряду с обычными этапами двустадийного проектирования ("проект" и "рабочая документация") при разработке конструкций уникальных большепролетных сооружений обязателен этап эскизного (концептуального) проектирования, который начинается с накопления максимальной, разносторонней информации, связанной с постановкой задачи. На этом этапе конструктор разрабатывает и анализирует эскизные варианты технических решений совместно с другими специалистами (архитекторами, технологами, специалистами по изготовлению и монтажу конструкций, и т.д.). Концепция проекта определяется опытом и комплексным подходом, основанными зачастую на интуитивной оценке надежности отобранных моделей, которая должна быть подтверждена на следующих этапах анализа. Концепция проекта — знание, базирующееся в основном на индивидуальности авторов. В тоже время успешное решение задач этого этапа прямо зависит от опыта и способности работы участников проекта в команде. Их участие на ранних стадиях проекта эквивалентно интуитивной стратегии проверки и "фильтрованию" решений, которые могут исключить существенную часть погрешностей. Сравниваются различные решения, анализируются и откладываются для дальнейшего рассмотрения и разработки, с учётом разнообразных, зачастую противоречивых требований. В этом процессе конструктор и архитектор работают совместно. Задача проектирования уникальных большепролетных сооружений настолько комплексна, что проект не может быть выполнен единолично. Обсуждения с опытными специалистами на ранних стадиях проектирования очень полезны для оценки вариантов проекта с различных точек зрения.

На стадии эскизного проектирования уникальных большепролетных сооружений необходимо максимально использовать современные достижения: новые типы конструкций, материалы, методы строительства. Этот этап предполагает преодоление неопределенностей проектирования, вызванных тем, что выбор решения, как правило, происходит в условиях неполного знания проектируемой системы; большого количества изменчивых и противоречивых задач; субъективностью лиц, принимающих решения.

Вариантное эскизное проектирование включает изучение и обобщение отечественного и зарубежного опыта строительства, инженерный анализ большого количества аналогичных объектов, в которых применены разнообразные большепролётные конструкции, разработку новых вариантов конструктивных предложений (исключающих неоправданные риски), выбор основных материалов, согласование противоречий между различными разделами проекта.

Отбор рациональных решений — конечный выбор лучшей идеи. Это может быть или спонтанное решение или трудоемкая разработка и оценка накопленных идей, возможно проверка первого вторым для оценки выполнимости. Здесь также проявляется творчество, например для ограничения некоторых идей, разработки программы научных исследований или установления порядка важности требований. Когда найдена лучшая идея, начинается ее проверка, которая обычно делается в форме расчётов и чертежей.

### 3. Стадии "проект" и "рабочая документация"

Разработка проектов уникальных большепролётных сооружений требует специальных знаний, таких как: нагрузочные факторы, статическая и динамическая реакция сооружений на различные сочетания нагрузок и воздействий, устойчивость системы в целом и отдельных структурных элементов, учёт физической и геометрической нелинейности, кратковременная и длительная ползучесть, надёжность и запасы прочности материалов, параметрическая чувствительность конструктивной системы в зависимости от типа и степени статической неопределимости и т.п. Необходимы опыт и чёткая организация процесса проектирования, научно-техническое обоснование разработки и реализации проекта, решение финансовых и организационных вопросов, в том числе организация системы строгого контроля и приёмки на всех этапах проектирования, возведения и эксплуатации уникального сооружения.

Стадия "Проект" включает разработку основных конструктивных решений, монтажных схем, узлов и деталей, предварительных технических спецификаций. На этой стадии рекомендуется разработка нескольких вариантов,

для выбора наиболее рационального по технико-экономическим и другим показателям. Технические решения должны быть обоснованы достаточно подробными расчётами, в том числе компьютерными, на основные сочетания нагрузок.

Состав, порядок разработки, согласования и утверждения "Рабочей документации" установлен требованиями [7] и включает подробную разработку чертежей на стадии КМ, КЖ или КД. В них входят: общие данные, сведения о нагрузках и воздействиях, нагрузки на фундаменты, схемы расположения элементов конструкций, чертежи элементов и узлов конструкций, спецификации материалов и изделий. Принятые проектные решения должны удовлетворять: ряду ограничений, обеспечивающих выполнение условий прочности, устойчивости и деформативности отдельных элементов и системы в целом; требованиям нормативных документов, сортаментов, технологических регламентов на изготовление, транспортировку и монтаж конструкций.

Отметим, что для стандартных объектов государственная экспертиза выполняется только на стадии "проект". Для уникальных большепролётных сооружений справедливо предложение [8] обязательной независимой экспертизы (включая выполнение полноценного поверочного расчета) законченной рабочей документации перед сдачей ее в производство. Цель такой экспертизы повысить качество проекта, исключить возможные грубые ошибки, снизить вероятность возникновения аварийных ситуаций.

#### 4. Нагрузки и воздействия

Уникальные большепролётные сооружения должны воспринимать любые виды нагрузок, определенных "Техническим заданием на проектирование", включая неравномерно распределённые временные нагрузки, статические и динамические нагрузки в виде грузов — сосредоточенных, полосовых, распределённых на небольшой площади, динамические воздействия, в том числе сейсмические. Зачастую большепролётные покрытия находятся под действием только собственного веса, нагрузок от снега и ветра. К ним могут добавляться: предварительное натяжение, монтажные нагрузки, вызывающие дополнительные усилия суммирующиеся с эксплуатаци-

онными, температурные воздействия, а также технологические нагрузки (от оборудования, подвесных потолков и т.п.), для которых необходимо учитывать возможное их увеличение в процессе длительной эксплуатации, реконструкции или модернизации сооружения.

В нормативных документах как правило отсутствуют данные по климатическим нагрузкам на большепролётные покрытия с пространственной формой поверхности. Для таких сооружений необходима разработка специальных рекомендаций по определению снеговых и ветровых нагрузок, на основании продувок макета сооружения в аэродинамической трубе. В большепролётных покрытиях исключается вероятность сноса снега. Ввиду того, что предполагаемый срок эксплуатации таких сооружений более продолжителен чем рядовых построек, расчётные климатические нагрузки следует принимать соответствующей обеспеченности. Все это приводит к необходимости увеличения этих нагрузок по сравнению с данными действующих норм.

Некоторые большепролётные покрытия (например, висячие) имеют относительно небольшую собственную массу и незначительную изгибную жёсткость. В этом случае неравномерные снеговые и ветровые нагрузки могут вызвать достаточно большие локальные, в том числе кинематические, деформации покрытия, привести к потере его устойчивости или к разрушению кровли.

Повышенный уровень ответственности таких сооружений следует учитывать применяя коэффициент надёжности не менее 1,2 [1]. Вопросы аварийных воздействий рассмотрены в разделе 7.

#### 5. Расчёты

В расчётах уникальное большепролётное сооружение следует рассматривать как единую пространственную систему, включающую фундаменты, каркас, покрытие, с учётом продольных, изгибных и крутильных жесткостей основных, а в ряде случаев и второстепенных элементов; их проектных связей, узловых эксцентриситетов. Расчёты проводятся на статические и динамические нагрузки и воздействия на конструкцию и её элементы в процессе изготовления, транспортировки, возведения и эксплуатации,

подтверждающие надёжность и пространственную устойчивость системы на всех этапах.

На стадии концептуального проектирования обычно не требуются какие-либо расчёты, так как конструктивные размеры принимаются грубо, исходя из существующего опыта. Но на следующей стадии выполняются приближённые вычисления, чтобы получить размеры сечений основных элементов. При вариантном и рабочем проектировании для больших вычислений пользуются компьютером. При вариантном проектировании обычно выполняется большое количество расчётов для поиска оптимальной конструктивной схемы, рациональных соотношений геометрических и жесткостных параметров элементов системы. На этом этапе расчётов рекомендуется процесс понижения сложной, высоко избыточной структурной задачи к упрощённой схеме, с последующим усложнением системы, за счёт последовательного присоединения новых элементов и исследования их влияния на работу конструкции. На стадии рабочего проектирования выполняются поверочные расчёты с учётом всех возможных сочетаний нагрузок. Составление расчётной схемы сооружения, представляющей идеализированную модель максимально приближённую к натурной системе, важнейший этап проектирования, позволяющий отыскать наиболее рациональные решения, обеспечивающие надёжность конструкции и экономию материалов. Специальное внимание следует уделять расчётам и конструированию узлов, выполняя их равнопрочными сопрягаемым элементам.

Численные методы, ориентированные на широкое использование современной вычислительной техники с высоким быстродействием, большой памятью и развитой системой внешних устройств открывают возможности успешного решения задач расчёта сложных систем. Их использование позволяет учесть различные виды нагружений и воздействий, конструктивные особенности системы (геометрию поверхности, переменные толщины, наличие элементов подкрепления, проёмов, фактические свойства материалов, местное изменение жёсткости и т.п.). При этом, в большинстве случаев, применяются апробированные стандартные вычислительные комплексы. Для повышения надёжности результатов, расчёты рекомендуется проводить

с использованием различных программ с сопоставлением и анализом полученных данных.

Однако использование компьютера, позволяющего оперировать с огромными массивами чисел, имеет и обратную сторону, растёт риск ошибки. Молодым инженерам предлагают решать на компьютере сложные задачи, без предварительного анализа упрощённых схем приближёнными методами. Сегодня инженеры зачастую пользуются компьютером прежде, чем они получают ясное понимание работы сооружения в целом и отдельных его элементов в системе. В тоже время, такое понимание, основанное на правилах строительной механики, единственный путь безопасного взаимодействия инженера с компьютером. Вслепую расшифровывать численные результаты без первоначальных знаний порядка ожидаемых расчётных величин просто недопустимо. Компьютер — несомненно огромная помощь для инженеров на всех этапах проектирования. Однако приближённые вычисления должны использоваться и в будущем, в том числе для быстрой достоверной проверки компьютерных расчётов и оценки основных решений.

В большинстве случаев расчёты уникальных большепролётных сооружений выполняются в геометрически нелинейной постановке. Расчёты рекомендуется выполнять с учётом неупругих деформаций, деформаций усадки и ползучести бетона, приводящие к изменению геометрии системы в процессе длительной эксплуатации. Кроме того, в железобетонных элементах следует учитывать образование трещин на участках, где он работает на внецентренное сжатие с большими эксцентриситетами, приводящее к местному снижению его изгибной жёсткости и соответственно величин изгибающих моментов. При учёте неупругих деформаций расчёт выполняется в физически нелинейной постановке. В нелинейных расчётах не применим принцип независимости действия сил, системе приходится рассчитывать на одновременное совместное воздействие различных сочетаний нагрузок, учитывающих в том числе последовательность монтажа конструкций и изменяющуюся при этом расчетную схему.

При расчётах следует учитывать статическую и динамическую реакции большепролётных сооружений на воздействия ветра, с учётом статических, квазистатических и резонансных

вкладов. Динамический расчёт таких систем усложнён ввиду их пространственной работы, геометрической и физической нелинейности, существенного влияния податливости основных элементов и т.д. Отметим, что динамическую реакцию можно существенно снизить конструктивными мероприятиями, например, введением в систему дополнительных оттяжек или демпфирующих устройств.

Важным этапом расчёта уникальных сооружений является проверка их общей и местной устойчивости. Вопросы аварийных расчётных ситуаций, в том числе при исключении из работы отдельных конструктивных элементов, рассмотрены в разделе 7.

## 6. Научно-техническое сопровождение

Проектирование уникальных большепролётных сооружений предполагает обязательное комплексное научно-техническое сопровождение, которое включает: упомянутые ранее продувки макета сооружения в аэродинамической трубе и разработка рекомендаций по назначению снеговых и ветровых нагрузок; изготовление и исследование физической модели сооружения; разработка методики расчета, составление и исследование расчетной схемы сооружения, выполнение поверочных расчётов. Кроме того, привлекаются научно-исследовательские и специализированные организации для научного сопровождения при изготовлении и монтаже конструкций, разработке рекомендаций по обеспечению жизнеспособности сооружения при экстремальных ситуациях, в т.ч. противопожарные и антитеррористические мероприятия; проведения мониторинга основных несущих конструкций на стадии возведения и первых лет эксплуатации. Необходимо иметь адекватную и систематическую обратную связь, контролируя поведение конструкций, для обеспечения долговечности проекта.

Экспериментальные исследования на крупномасштабных моделях, а в некоторых случаях на натурных объектах, выполняются с целью выявления действительного напряженно-деформированного состояния рассматриваемых систем, оценки надёжности методики расчёта, обоснованности принятых исходных предпосылок. Кроме того, ставятся задачи экспериментального исследования таких сторон

работы конструкций, которые трудно поддаются решению математическими методами и необходим синтез теории и эксперимента.

Важны исследования по оптимизации уникальных большепролётных сооружений, которые сводятся к подготовке рекомендаций по выбору рационального варианта конструктивной схемы и оптимальных геометрических соотношений и жесткостных параметров основных элементов покрытий. Комплексное проектирование уникальных сооружений можно представить как сумму различных требований, в виде показателей качества: конструктивно-технологических, экономических, производственно-технических, функциональных и социальных.

Исследования уникальных сооружений с большепролётными покрытиями выявили, что их напряженно-деформированное состояние и технико-экономические показатели зависят от ряда основных варьируемых параметров проектирования: толщины покрытия, его начальной геометрии, жёсткости элементов (геометрических размеров сечения, физико-механических свойств материала, процента армирования). Остальные параметры являются заданными: тип покрытия, габаритные размеры здания (пролёт, высота до низа покрытия), величины и характер распределения климатических, технологических и других нагрузок и воздействий и т.п. Варьируемые параметры проектирования в силу статической неопределённости и геометрической нелинейности системы взаимоувязаны и оказывают зачастую противоречивое влияние на экономические показатели конструкции.

## 7. Некоторые специальные вопросы проектирования

При проектировании уникальных сооружений необходимо учитывать также аварийные расчетные ситуации. Однако при буквальном соблюдении п.1.10 [9], касающегося этого вопроса, реальное проектирование становится невозможным, ввиду нечеткости и неопределённости части требований этого раздела нормативного документа. Так, если пожарные воздействия достаточно полно определены нормативными документами, то ситуация со взрывом может иметь весьма субъективное толкование.

Заметим, что ГОСТ 27751-88 составлялся в СССР 1984-87 г.г., когда рассматривались аварийные воздействия только от промышленных взрывов, требования к которым определяются нормативными документами. Сегодня этот термин (взрыв) некоторыми экспертами трактуется более широко, включая террористические акты.

На основе анализа требований зарубежных норм [3, 10, 11] по данному вопросу предлагается следующая формулировка, вместо существующей (см. п. 1.10 [9]).

Аварийная расчетная ситуация, представляющая исключительные условия работы конструкции на аварийные воздействия (например, пожар, промышленный взрыв, столкновение, авария оборудования); имеющие малую вероятность появления и небольшую продолжительность, но приводящие в большинстве случаев к тяжелым последствиям, если не принимаются специальные меры. Аварийные воздействия регламентируются в соответствующих разделах нормативных документов.

Возможные повреждения конструкций от аварийных воздействий должны предотвращаться или ограничиваться за счет соответственного выбора и проведения одного или нескольких перечисленных ниже мероприятий:

- предупреждение, исключение или снижение опасности, которой может подвергаться конструкция или объект;
- выбор конструктивного решения, которое имеет малую чувствительность к учитываемым опасностям;
- выбор конструктивного решения, которое при аварийном выходе из строя отдельного элемента или примыкающих к нему частей, либо при наличии локального повреждения, не приводит к потере несущей способности всего сооружения;
- применение конструктивных систем, потеря несущей способности которых сопровождается предупредительным проявлением внешних признаков.

Перечисленные требования должны выполняться за счет выбора подходящих стройматериалов, квалифицированного выполнения проектных работ, выбора метода контроля на всех стадиях проектирования, возведения и эксплуатации сооружения.

Отметим, что нормы РФ практически не регламентируют необходимость проверки несущих конструкций на живучесть. Эта ситуация непосредственно связана с необходимостью учета в расчетах отказа какого-либо элемента конструкции. Однако это требование не определено никакими нормативными документами, что исключает возможность их выполнения при проектировании. Какие элементы следует при расчетах исключать, в каком количестве, в какой последовательности, какие расчетные сочетания нагрузок принимать для этого случая? Следует ли при этом учитывать причину отказа, вид отказа и возможные его последствия? При этом необходимо иметь в виду, что каждое сооружение имеет некоторую вероятность разрушения. Попытка приблизить эту вероятность к нулю сопровождается стремлением стоимости сооружения к бесконечности [12]. Повышенный уровень надежности уникального сооружения и, обеспечивающий его перечень дополнительных мероприятий, должен быть обязательно оговорен в "Техническом задании на проектирование", утверждаемом заказчиком.

Обеспечить существование уникального большепролетного сооружения после отказа любого конструктивного элемента невозможно (например, опорный контур висячих или выпуклых оболочек, несущие пилоны или подвески вантовых систем и т.п.). Очевидно, что живучесть таких сложных систем должна достигаться, в первую очередь, необходимыми запасами несущей способности основных элементов конструкций [13], включая элементы обеспечивающие общую устойчивость сооружения, исключением прогрессирующего обрушения системы, вследствие отказа второстепенных элементов конструкции, узлов и деталей; а также комплексом антитеррористических организационных мероприятий, как это делается в авиационном транспорте или при охране ряда объектов.

## 8. Выводы и рекомендации

1. К уникальным большепролетным объектам относятся здания/сооружения с возможностью одновременного пребывания в них людей численностью более 300 человек и отвечающих следующим условиям:



- пролет свыше 60 м, при принципиально новых конструктивных решениях, не прошедших апробацию в практике строительства и эксплуатации;
- пролет свыше 100 м, при конструктивных решениях, прошедших успешную апробацию в практике проектирования, строительства и эксплуатации.

Такие сооружения имеют повышенный уровень ответственности, их отказы могут привести к тяжелым экономическим и социальным последствиям. В связи с этим следует учитывать дополнительные требования к их долговечности, номенклатуре и объемам изысканий и проектных работ, изготовлению и монтажу конструкций, правилам их приемки и эксплуатации.

2. Проектирование уникальных сооружений должно основываться на комплексном подходе выбора рациональных конструктивных решений, увязанных с функциональным назначением, архитектурными решениями, методами изготовления и монтажа, условиями эксплуатации. В полном объеме должны выполняться требования надёжности, технологичности и экономической эффективности, учитываться экологические и социальные факторы.
3. При проектировании уникальных сооружений возникают задачи не нашедшие отражение в существующих нормативных документах. Новизна технических решений требует от инженера-конструктора глубоких специальных знаний, практического опыта, подтвержденных обязательным персональным лицензированием на право проектирования уникальных сооружений. Наиболее важной особенностью процесса проектирования является генерирование идей, основанных на творческом потенциале проектировщика. Этот процесс не может быть компьютеризирован, так как компьютер не может предлагать новые решения.
4. Процесс проектирования должен быть формализован для его четкой организации, решения вопросов строгого контроля и приёмки, минимизации человеческих ошибок, обеспечения требований безопасности, эксплуатационной надёжности и долговечности объекта. При всей неповторимости уникальных большепролетных сооружений

процесс их проектирования должен включать ряд необходимых этапов.

Обязательными документами являются "Техническое задание на проектирование" и "Специальные технические условия на проектирование", которые разрабатываются и согласовываются всеми участниками процесса проектирования, возведения, приемки и эксплуатации уникального сооружения, включая инвестора, заказчика, ген- и субподрядчиков. Этапам двухстадийного проектирования ("проект" и "рабочая документация") обязательно должен предшествовать этап эскизного (вариантного) проектирования, включающий инженерный анализ аналогичных объектов с большепролётными системами, разработку вариантов конструктивных решений, выбор основных материалов, согласование противоречий между различными разделами проекта, предварительный технико-экономический анализ.

5. Разработка проекта уникальных большепролётных сооружений требует учета специальных факторов, таких как: статическая и динамическая реакция сооружения на различные сочетания нагрузок и воздействий, включая монтажные; местная и общая устойчивость системы в целом и отдельных структурных элементов; учёт физической и геометрической нелинейности, кратковременной и длительной ползучести; надёжность и запасы прочности материалов, в том числе усталостной и т.п. Расчёт уникальных сооружений следует выполнять как единой пространственной системы, включающей фундаменты, каркас, большепролётное покрытие.
6. Повышенный уровень надёжности уникального сооружения и, обеспечивающий его перечень дополнительных мероприятий, должен быть обязательно оговорен в "Техническом задании на проектирование", утверждаемом заказчиком. Обеспечить существование уникального большепролётного сооружения после отказа любого конструктивного элемента невозможно. Очевидно, что живучесть таких сложных систем должна достигаться, в первую очередь, необходимыми запасами несущей способности основных элементов конструкций, включая элементы обеспечивающие общую устойчивость

сооружения; исключением прогрессирующего обрушения системы, вследствие отказа второстепенных элементов конструкции, узлов и деталей; а также комплексом антитеррористических организационных мероприятий.

7. Проектирование уникальных сооружений предполагает обязательное научно-техническое сопровождение. Перечень опытно-конструкторских и исследовательских работ, определяющийся "Специальными техническими условиями на проектирование", обычно включает: продувки макета в аэродинамической трубе и разработку рекомендаций по назначению снеговых и ветровых нагрузок; исследование физической модели; разработку методики расчета, составление и исследование расчётной схемы, выполнение поверочных расчётов. Кроме того, должны привлекаться научно-исследовательские и специализированные организации для научного сопровождения при изготовлении и монтаже конструкций, разработки рекомендаций по обеспечению жизнеспособности сооружения при экстремальных ситуациях, в т.ч. противопожарные и антитеррористические мероприятия; проведения мониторинга основных несущих конструкций на стадии возведения и первых лет эксплуатации.
8. Для уникальных большепролётных сооружений обязательна независимая экспертиза законченной "рабочей документации" перед сдачей ее в производство, с целью повышения качества проекта, исключения возможных грубых ошибок, снижения вероятности возникновения аварийных ситуаций. Экспертиза должна выполняться специалистами, имеющими практический опыт проектирования сооружений подобного рода.
9. Комплекс работ по проектированию уникальных большепролётных сооружений требует достаточного времени и объемов финансирования (существенно превышающих эти параметры для традиционных объектов), для обеспечения их качества, безопасности, эксплуатационной надежности и долговечности.

Следует иметь в виду, что многие, в том числе важные, вопросы и определения возможно не нашли своего отражения в настоящей статье. Ее цель предварительная постановка проблемы для обсуждения заинтересованными лицами и организациями необходимости разработки нормативного или иного документа, регламентирующего основные требования по проектированию уникальных большепролётных сооружений.

### Литература

1. СНиП 2.01.07-85\*. Нагрузки и воздействия/ Госстрой России. - ГУП ЦПП, 2003.
2. National Building Code of Canada, 1990.
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. Majowiecki.M. Conceptual design of long span structures: a knowledge based synthetical approach. University of Bologna, Italy. Proceedings of the IASS Symposium October 7-11, 1996, Stuttgart/ Germany, vol.I.
5. Перельмутер А.В. Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций. - Киев: Изд-во УкрНИИпроектстальконструкция, 2000.
6. Никонов Н.Н. Большепролётные покрытия. Анализ и оценка. -М: изд-во АСВ, 2002.
7. СНиП 11-01-95. "Инструкция о порядке разработки, согласования, утверждения и составе проектной документации на строительство предприятий, зданий и сооружений" / Минстрой России.- 1985.
8. Савельев В.А., Павлов А.Б., Малый В.И., Калашников Г.В. Некоторые соображения по поводу организации экспертизы проектов //Промышленное и гражданское строительство, 2004, №5.
9. "Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения по расчету". ГОСТ 27751-88.
10. DIN 1055-100. "Нагрузки и воздействия".
11. ANSI/ASCE 7-95. "Нагрузки для зданий и сооружений".
12. Райзер В.Д. Теория надежности в строительном проектировании. -М:Изд-во АСВ, 1998.
13. Перельмутер А.В. Прогрессирующее обрушение и методология проектирования конструкций.// Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений, 2004, №6.

**Єремєєв Павло Георгійович** працює головним науковим співробітником лабораторії металевих конструкцій Центрального науково-дослідного інституту будівельних конструкцій (ЦНДІБК ім. В. А. Кучеренка). Д.т.н., професор, член міжнародної організації ІАСС, віце-президент МОО "Просторові конструкції" (Росія). Наукові інтереси: розробка, проектування, розрахунки, дослідження металевих просторових конструкцій — тонколистові провисаючі оболонки (мембрани); висячі системи, зводи з холодногнутих тонкостінних елементів; комбіновані конструкції.

**Еремеев Павел Георгиевич** работает главным научным сотрудником лаборатории металлических конструкций Центрального научно-исследовательского института строительных конструкций (ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко). Д.т.н., профессор, член международной организации ИАСС, вице-президент МОО "Пространственные конструкции" (Россия). Научные интересы: разработка, проектирование, расчеты, исследования металлических пространственных конструкций — тонколистовые провисающие оболочки (мембраны); висячие системы, своды из холодногнутого тонкостенных элементов; комбинированные конструкции.

**Pavel G. Yermeyev** is a head researcher in Metal Structures Laboratory of the Central Research Institute for Building Structures (TsNIISK). Doctor of Technical Science, Professor, he is a member of International Association of Space Structures (IASS), vice-president MOO "Space Structures" (Russia). Range of professional interests: development, design, calculation, investigation metal space structures — thin sheet suspended shells (membrane), suspended constructions, shell arches made of cold formed thin gauge elements; combined systems.