



ISSN 1819-432X print / ISSN 1993-3495 online

СУЧАСНЕ ПРОМИСЛОВЕ ТА ЦИВІЛЬНЕ БУДІВНИЦТВО  
СОВРЕМЕННОЕ ПРОМЫШЛЕННОЕ И ГРАЖДАНСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО  
MODERN INDUSTRIAL AND CIVIL CONSTRUCTION

ТОМ 4, N3, 2008, 129-134

УДК 624:69.0365;692

## СТВОРЕННЯ БЕЗПЕКИ ВЕЛИКОПРОЛЬОТНИХ СПОРУД ВІД ЛАВИНОПОДІБНОГО (ЩО ПРОГРЕСУЄ) ОБВАЛЕННЯ ПРИ АВАРІЙНИХ ДІЯХ

**П.Г.Єремєєв**

*Центральний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій (ЦНДІБК ім. В.А. Кучеренко) –  
філіал ФДУП “НДЦ “Будівництво”, лабораторія металевих конструкцій*

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

*E-mail: LMK317sp@rambler.ru*

*Отримана 24 червня 2008; прийнята 4 вересня 2008.*

**Анотація.** У статті розглянуті питання забезпечення безпеки великопрольотних споруд від лавиноподібного (що прогресує) обвалення конструкцій за рахунок виключення або зниження до мінімуму впливу аварійних дій, використовуючи, в першу чергу, превентивні заходи. Робота виконана на підставі аналізу чинних зарубіжних і російських нормативних і технічних документів для будівель масового будівництва і узагальнення досвіду проектування, зведення і експлуатації великопрольотних споруд.

**Ключові слова:** великопрольотні споруди, лавиноподібне (що прогресує) обвалення, рекомендації щодо забезпечення безпеки.

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫХ СООРУЖЕНИЙ ОТ ЛАВИНООБРАЗНОГО (ПРОГРЕССИРУЮЩЕГО) ОБРУШЕНИЯ ПРИ АВАРИЙНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

**П.Г.Єремєєв**

*Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций  
(ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко) – филиал ФГУП “НИЦ “Строительство”,*

*лаборатория металлических конструкций,*

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

*E-mail: LMK317sp@rambler.ru*

*Получена 24 июня 2008; принята 4 сентября 2008.*

**Аннотация.** В статье рассмотрены вопросы обеспечения безопасности большепролетных сооружений от лавинообразного (прогрессирующего) обрушения конструкций за счет исключения или снижения до минимума влияния аварийных воздействий, используя, в первую очередь, превентивные меры. Работа выполнена на основании анализа действующих зарубежных и российских нормативных и технических документов для зданий массового строительства и обобщения опыта проектирования, возведения и эксплуатации большепролетных сооружений.

**Ключевые слова:** большепролётные сооружения, лавинообразное (прогрессирующее) обрушение, рекомендации по обеспечению безопасности.

## LARGE-SPAN STRUCTURES PROTECTION FROM PROGRESSIVE COLLAPSE WHILE ACCIDENTAL ACTIONS

**P.G. Yeremeyev**

*Department for metal structures,*

*Central Research Institute of Building Structures (Kucherenko SRIBS) – the branch of FGUP “NITs  
“Stroitelstvo”*

*2<sup>nd</sup> Institutskaya str. 6, 109428, Moscow, Russia,*

*E-mail: LMK317sp@rambler.ru*

*Received 24 June 2008; accepted 4 September 2008.*

**Abstract.** Article deals with the questions of large-span structures protection from progressive collapse on the account of exception or reduction to a minimum of accidents influence, using, first of all, preventive measures. The work has been carried out on the reason for the operating foreign and Russian normative and technical documentation for buildings of mass construction as well as experience generalization of designing, erection and operation of large-span structures.

**Key words:** large-span structures, progressive collapse, recommendations for a safety.

Большепролётные сооружения имеют повышенный уровень ответственности по назначению, их обрушение может привести к тяжелым социальным и экономическим последствиям. При проектировании таких сооружений возникают проблемы, которые не отражены в действующих строительных нормах. В связи с этим возникла необходимость разработки практических рекомендаций по обеспечению безопасности большепролётных сооружений от лавинообразного обрушения конструкций при аварийных воздействиях.

Сегодня отсутствуют единые общепринятые определения (термины) по этой проблеме, поэтому вначале приведем обобщенные данные отечественных и зарубежных стандартов строительного проектирования, обзор современной технической 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 большой его части [1].

**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. Это аварии или значительные повреждения конструкций, вызванные ошибками проектирования, изготовления или монтажа, ненадлежащим качеством материалов, нарушением правил эксплуатации сооружения; взрывы (взрывоопасные материалы и бытовой газ, промышленные взрывы, взрывные устройства, используемые террористами); аварии оборудования; столкновения с движущимися транспортными средствами; запроектные - не нормированные сейсмические и пожарные воздействия и т.д. [2].

Большепролётные системы - **пространственные или традиционные конструкции пролетом свыше 36 м [3].** К первым относятся сплошные и стержневые оболочки, купола, висячие вантовые и тонколистовые покрытия, стержневые пространственные конструкции, перекрестные системы, а ко вторым – фермы, рамы, арки и т.п. Большепролётные системы могут быть выполнены из разнообразных материалов: сталь, железобетон, дерево, специальные ткани, в отдельных элементах могут применяться тросы, углепластик и др.

Уникальные большепролётные сооружения – **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. [4].

В настоящее время требования по предотвращению лавинообразного обрушения содержатся в документах, которые относятся только к жилым и торгово-офисным многоэтажным зданиям [5 ч 11]. Анализ имеющихся материалов показал, что эта сложная проблема не может быть решена универсальными методами, ее постановка и решение должны быть отражены в рекомендациях по проектированию зданий и сооружений конкретных типов. Требования по предотвращению лавинообразного обрушения панельных или каркасных высотных зданий не могут быть использованы при проектировании большепролетных пространственных конструкций.

На сегодняшний день отсутствует общепринятый научно-обоснованный подход или практика проектирования большепролетных сооружений, сохраняющих структурную целостность при различных вариантах расчетных нагрузок и аварийных воздействий. Трудно теоретически определить возможность лавинообразного обрушения такого сооружения ввиду отсутствия четких определений, начиная от вероятности возникновения и величины предполагаемой опасности. Не разработаны аналитические методы определения начальных повреждений и прогнозирования вероятности последующего лавинообразного обрушения сооружения из-за предполагаемых аварийных воздействий. В тоже время инженеры нуждаются в простых методах проектирования и расчетов, способных предотвратить потенциальную опасность лавинообразного обрушения сооружений.

До последнего времени нормативные документы РФ не регламентировали необходимость проверки строительных несущих конструкций на «живучесть». Единственное косвенное упоминание этого вопроса содержится в п.1.10, ГОСТ 27751-88 [12], где говорится о необходимости учета в качестве аварийной расчетной

ситуации отказа какого-либо элемента конструкции. Однако это требование не подкреплено никакими нормативными документами, что исключает возможность их выполнения при проектировании большепролетных сооружений. Какие элементы следует исключать при расчетах, 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?

Простой анализ показывает [13], что невозможно обеспечить существование большепролетных сооружений после отказа основных несущих элементов (например, опорного контура висячих или выпуклых оболочек, несущих пилонов или главных канатов вантовых систем и т.п.). Лавинообразное обрушение большепролетных сооружений нельзя предотвратить условными необоснованными расчетами, путем исключения из работы ключевых элементов. При буквальном соблюдении п. 1.10 ГОСТ 27751-88 [12], касающегося этого вопроса, реальное проектирование таких объектов становится невозможным.

Общеизвестно [14], что главная причина отказов в строительстве - это ошибки проектирования, дефекты изготовления и монтажа; низкое качество материалов и конструкций; неправильная эксплуатация. Разрушения от террористических нападений оказывается гораздо (на несколько порядков) ниже этих причин.

В последние годы в зарубежные строительные нормы введено понятие риска, предложены подходы для определения уровня риска/последствия, оценки проектных мер предотвращения лавинообразного обрушения, которые учитывают ценность и уязвимость сооружения. Отмечено, что никакими экономически оправданными мерами нельзя полностью исключить риск отказа любого несущего элемента. Каждое сооружение имеет некоторую вероятность разрушения. Попытка приблизить эту вероятность к нулю сопровождается стремительным ростом стоимости сооружения [15].

В настоящее время в ЦНИИСК им. В.А.Кучеренко подготовлены и изданы «Временные рекомендации по обеспечению большепролетных сооружений от лавинообразного (прогрессирующего) обрушения при аварийных воздействиях».

Они рекомендованы к применению научно-техническим советом Комплекса архитектуры, строительства, развития и реконструкции города Москвы.

Работа выполнена на основании анализа действующих зарубежных и российских нормативных и технических документов, а также обобщения опыта проектирования, возведения и эксплуатации большепролетных сооружений. Указанную проблему рекомендуется решать путем исключения или снижения до минимума влияния аварийных воздействий, применяя, в первую очередь, превентивные меры, используя экономичные и эффективные мероприятия, без внесения дорогих и существенных изменений в общепринятую практику проектирования и строительства. Рекомендации предназначены для проектирования, возведения и эксплуатации новых и реконструируемых зданий и сооружений с применением большепролетных конструкций.

Безопасность большепролетных сооружений от лавинообразного обрушения конструкций при аварийных воздействиях обеспечивается правильным выбором и применением одного или нескольких перечисленных ниже мероприятий, в ряде случаев соответствующих определенному аварийному воздействию.

1. Для минимизации влияния возможных ошибок проектирования, изготовления, монтажа или неправильной эксплуатации сооружения принимаются необходимые запасы несущей способности «ключевых» несущих конструкций, в зависимости от расчетного срока эксплуатации и пролета объекта, степени ответственности сооружения и «ключевых» элементов. Выполняется анализ работы конструкции с целью выявления элементов, выход из строя которых влечет за собой лавинообразное обрушение всей конструкции. Для указанных элементов и узлов вводятся дополнительные коэффициенты условий работы.

В «Специальных технических условиях на проектирование» принимается требование обязательного выполнения экспертизы законченной документации не только на стадии «проект», но и в ряде случаев, независимой экспертизы «рабочей документации» перед сдачей ее в производство, в т.ч. выполнение

поверочных расчетов с целью повышения качества проекта, исключения возможных ошибок. Экспертиза должна выполняться специалистами, имеющими практический опыт проектирования сооружений подобного рода.

2. Применение превентивных мер безопасности, исключающих, предупреждающих или снижающих до минимума влияние аварийных воздействий, которым может подвергаться конструкция или объект.

Это комплексное обеспечение безопасности и антитеррористической защищенности [16, 17, 18] - защитные барьеры, препятствующие движущемуся транспорту, увеличение размеров зон, недоступных для террористической угрозы, комплекс мероприятий по защите сооружения по периметру и т.д. Предусматриваются технические (объемно-планировочные, конструктивные, инженерные, организационные) мероприятия, обеспечивающие своевременную, беспрепятственную и безопасную эвакуацию людей при возникновении аварийных воздействий. Разработка и детализация превентивных защитных мер безопасности выполняется специализированными организациями в особых разделах проекта конкретного большепролетного сооружения.

3. Выбор рациональных конструктивных решений и материалов, которые даже при наличии локальных (в пределах одного конструктивного элемента) повреждений, не приводят к потере несущей способности всего сооружения, исключают лавинообразное обрушение системы.

В их число входит: увеличение массивности (бетонирование) основных периметральных колонн и оттяжек выше уровня земли на определенную высоту; установка связевых элементов по всей поверхности стержневых пространственных покрытий; использование специальных решений, определяющих огнестойкость и сейсмическую устойчивость сооружений, противостоящих отказам фундаментов; применение материалов с повышенными требованиями к их пластичности, хладостойкости, свариваемости и т.д.

Для «ключевых» элементов рекомендуется использовать конструктивно-технологические решения, не вызывающие значительную концентрацию напряжений,

уменьшающие растягивающие напряжения в направлении толщины проката, снижающие влияние остаточных сварочных деформаций и напряжений.

Необходима разработка (в соответствии с ГОСТ 23118-99 и СП 53-101-98) «Технических условий на изготовление и монтаж конструкций», содержащих дополнительные требования и основные положения показателей качества применяемых материалов, изготовления и монтажа конструкций, методы их контроля и приемки, не входящие в действующие нормативно-технические документы или регламентирующие более высокие требования.

4. Проведение инструментального мониторинга, отслеживающего техническое состояние элементов и конструкций в целом, их деформаций во времени и при различных нагрузках, при их возведении и после сдачи в эксплуатацию для адекватной и систематической обратной связи, контролирующей поведение конструкций, обеспечивающей долговечность объекта. Организация надлежащей эксплуатации сооружения [19]: обеспечение соответствия эксплуатационных сред, нагрузок и воздействий на строительные конструкции величинам, принятым при проектировании или оговоренным действующими нормами; проведение периодических осмотров; своевременное выявление, оценка и устранение неисправностей строительных конструкций.

Перечисленные мероприятия должны обеспечиваться квалифицированным выполнением проектных и строительных работ, использованием надлежащих стройматериалов, выбором методов контроля и приемки и обязательным их выполнением на всех стадиях проектирования, возведения и эксплуатации сооружения.

Требования по обеспечению безопасности конкретного большепролетного сооружения от лавинообразного обрушения конструкций при аварийных воздействиях должны быть обязательно отражены в «Специальных технических условиях на проектирование», согласованных с авторами проекта, организацией, проводящей экспертизу проектной документации, и утвержденных заказчиком. Там же указывается уровень ответственности сооружения.

На стадии проектирования большепролетных сооружений рекомендуется рассматривать несколько взаимосвязанных подходов по обеспечению безопасности конструкций от лавинообразного обрушения при аварийных воздействиях. А именно: оценка уязвимости примененных конструктивных схем аварийным воздействиям; разработка решений, которые являются эффективными для уменьшения последствий при различных сценариях угрозы; превентивные меры безопасности – снижение степени опасности аварийных воздействий; замедление обрушения – для обеспечения достаточного времени и путей эвакуации из здания после начала локального повреждения конструкции.

При принятии проектных решений должны учитываться: причины и вид аварийных воздействий; возможные последствия лавинообразного обрушения, включающие опасность для жизни и увечий людей, экономические и социальные потери; эффективность и стоимость мероприятий по обеспечению безопасности конструкций от лавинообразного обрушения.

Применительно к одному и тому же уровню обеспечения безопасности конструкций от лавинообразного обрушения при различных аварийных воздействиях варианты мероприятий могут быть взаимозаменяемыми. Ужесточение мер одного типа может компенсировать ослабление мер другого типа. Различные решения могут соответствовать определенному типу угрозы. Например, в случае пожара, для сохранения несущей способности системы могут быть эффективны более долговечные огнезащитные покрытия. Однако в большинстве случаев следует принимать рациональное сочетание нескольких методов. Такой объединенный подход минимизирует расход средств при существенном улучшении способности конструкций сопротивляться лавинообразному обрушению при аварийных воздействиях.

Условия предотвращения (уменьшения последствий) лавинообразного обрушения должны базироваться на четких требованиях к конструкции или на общих требованиях к их целостности в рамках строительных нормативных и технических документов. Должны быть ясно определены критерии проектирования для уменьшения вероятности лавинообразного обрушения.

### Литература

1. ASCE 7-02, "Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, 2002 edition," American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 2002.
2. ENV 1991-2-7: 1998. Eurocode 1: Basis of design and actions on structures. Accidental actions due to impact and explosions. - Brussels: CEN, 1998.
3. Стальные конструкции зданий и сооружений. (Справочник проектировщика. Том 2) - М.: изд-во АСБ, 1998.
4. Еремеев П.Г Предотвращение лавинообразного (прогрессирующего) обрушения несущих конструкций уникальных большепролётных сооружений при аварийных воздействиях. «Строительная механика и расчёт сооружений» № 2, 2006 г.
5. Рекомендации по защите жилых каркасных зданий при чрезвычайных ситуациях. - М.: «НИАЦ», 2002.
6. Рекомендации по защите монолитных жилых зданий от прогрессирующего обрушения. - М.: «НИАЦ», 2005.
7. Рекомендации по защите высотных зданий от прогрессирующего обрушения: - М.: «НИАЦ», 2006.
8. UFC 4-023-03. "Unified Facilities Criteria (UFC). Design of Buildings to Resist Progressive Collapse". Department of Defense USA, 2005.
9. NYC, 1973, "Chapter 18, Resistance to Progressive Collapse Under Extreme Local Loads, Appendix A – Rules of the City of New York, Building Code of the New York City," Gould Publications, Binghamton, NY 13901, 2001
10. General Services Administration Washington, DC Draft, Progressive Collapse Analysis Draft, Progressive Collapse Analysis Office Buildings and Major Modernization Projects, 2003.
11. National Bureau of Standards Washington, DC 20234 Report Number -GCR p.p.75-78 The Avoidance of Progressive Collapse: Regulatory Approaches to the Problem, 1975.
12. «Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения по расчёту». ГОСТ 27751-88.
13. Перельмутер А.В. Прогрессирующее обрушение и методология проектирования конструкций. «Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений». № 6, 2004.
14. Krishnamurthy N. Forensic Engineering in Structural Design and Construction , / Proseeding of the Third International Congress (SEWC 2007). India. Bangalore, 2007.
15. Райзер В.Д. Теория надежности в строительном проектировании. - М.: Изд-во АСБ, 1998.
16. UFC 4-010-01. "Unified Facilities Criteria (UFC). DoD Minimum Antiterrorism Standard for Buildings". Department of Defense USA, 2002.
17. UFC 4-010-02 "Unified Facilities Criteria (UFC). Design (FOUO): DOD Minimum Antiterrorism Standoff Distances for Buildings", Department of Defense USA, 2002.
18. UFC 4-022-02 "Unified Facilities Criteria (UFC). Selection and Application of Vehicle Barriers", Department of Defense USA, 2005.
19. Еремеев П.Г Опыт проведения технического мониторинга и эксплуатации конструкций покрытий уникальных большепролётных сооружений. «Промышленное и гражданское строительство», № 2, 2008 г.

**Еремеев Павло Георгійович** – д.т.н., професор, працює головним науковим співробітником лабораторії металевих конструкцій Центрального науково-дослідного інституту будівельних конструкцій (ЦНДІБК ім. В.А. Кучеренко). Член міжнародної організації ІАСС, віце-президент МОО «Просторові конструкції» (Росія). Наукові інтереси: розробка, проектування, розрахунки, дослідження металевих просторових конструкцій – тонколистові провисаючі оболонки (мембрани); всіячі системи, зведення з холодногнутих тонкостінних елементів; комбіновані конструкції.

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

**Pavel Georgievich Yeremeyev** – the doctor of technical sciences, professor, work as the senior research fellow at the metal structures laboratory of the Central Research Institute of Building Structures (SRIBS). He is a member of International Association of Space Structures (IASS), the vise-president of MOO "Space Structures" (Russia). Scientific interests: elaboration, design, calculations, investigation of metal space structures – thin sheet suspended shells (membrane); suspended structures, domes made of bend cold thin walled elements; combined structures.