



ISSN 1814-5566 print

ISSN 1993-3517 online

**МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ**  
**МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ**  
**METAL CONSTRUCTIONS**

N1, TOM 15 (2009) 59-71

УДК 624.042

(09)-0183-1

## **ЖИВУЧІСТЬ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ – ВАЖЛИВИЙ ФАКТОР ЗНИЖЕННЯ ВТРАТ В УМОВАХ АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЙ**

**Ю.И. Кудишин, Д.Ю. Дробот**

*Московський державний будівельний університет,  
буд. 26, Ярославське шосе, 127337, м. Москва, Росія.  
E-mail: dmitrydrobot@gmail.com*

*Отримана 4 листопада 2008; прийнята 23 сьчня 2009*

**Анотація.** Дана стаття висвітлює триваюче в цей час дослідження, що зачіпає питання живучості будівельних конструкцій. Під живучістю розуміється здатність споруд виконувати своє функціональне призначення при відмові якої-небудь його частини. У першій частині статті приводиться огляд існуючих точок зору, підходів до рішення проблеми. У рамках відібраних і обґрунтованих постулатів формулюється спрощена (інженерна) методика розрахунку на живучість для металевих конструкцій. Як приклад по використанню методики в другій частині статті розглядається багатопролітне металеве покриття Льодового палацу на Ходінському полі (м. Москва).

**Ключові слова:** живучість, надійність, прогресуюче обвалення, теорія систем, ризик, аналіз, динамічна відмова елемента.

## **ЖИВУЧЕСТЬ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ – ВАЖНЫЙ ФАКТОР СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ В УСЛОВИЯХ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ**

**Ю.И. Кудишин, Д.Ю. Дробот**

*Московский государственный строительный университет,  
д. 26, Ярославское шоссе, 127337, г. Москва, Россия.  
E-mail: dmitrydrobot@gmail.com*

*Получена 4 ноября 2008; принята 23 января 2009*

**Аннотация.** Данная статья освещает продолжающееся в настоящее время исследование, затрагивающее вопрос живучести строительных конструкций. Под живучестью понимается способность сооружения выполнять свое функциональное назначение при отказе какой-либо его части. В первой части статьи приводится обзор существующих точек зрения, подходов к решению проблемы. В рамках отобранных и обоснованных постулатов формулируется упрощенная (инженерная) методика расчета на живучесть для металлических конструкций. В качестве примера по использованию методики во второй части статьи рассматривается большепролетное металлическое покрытие Ледового дворца на Ходынском поле (г. Москва).

**Ключевые слова:** живучесть, надежность, прогрессирующее обрушение, теория систем, риск, анализ, динамический отказ элементаметеопост.

## BUILDING STRUCTURE SURVIVABILITY

**Kudishin Yu.I., Drobot D.Yu**

*Moscow State Building University*

*26, Yaroslavskoye Shosse, 127337, Moscow, Russia*

*E-mail: dmitrydrobot@gmail.com*

*Received 4 November 2008; accepted 23 January 2009*

**Abstract.** The article highlights a still proceeding investigation of building structure survivability. "Survivability" means a structure ability to perform its functional purpose in case of failure of any of its parts. The first part of the article is devoted to the consideration of the existing view-points on and approaches to the problem. Within the postulates selected and substantiated there is formulated a simplified (engineering) design procedure as to the survivability of metal structures. As an example of using the procedure there is considered a large-span metal covering of the Ice Palace on the Khodynskoye field (Moscow).

**Keywords:** survivability, reliability, progressive failure, theory of systems, risk analysis, dynamic failure of an element.

В 1-й части статьи отображены общетеоретические аспекты стойкости сооружений к аварийным ситуациям.

Проблема безопасности сегодня весьма актуальна в различных сферах человеческой жизнедеятельности, в том числе и в сфере эксплуатации строительных конструкций зданий и сооружений. Развитие общества со второй половины XX века привело к созданию технических и организационно-технических систем глобального масштаба, обеспечивающих активность в политической, экономической, военной, экологической и других областях. Обычно они имеют развитые коммуникации энергоснабжения, связи, управления, транспорта и т.д., насыщены средствами автоматизации и связи, имеют сложную структуру ресурсообеспечения и взаимодействия. По мере развития подобных систем возрастает их чувствительность к внешним воздействиям как стихийного характера (землетрясения, наводнения, солнечная активность, погодные катаклизмы, техногенные катастрофы), так и целенаправленного (боевые действия, терроризм (см. рис. 1)) и т.д.

В строительстве тематика безопасности привела к изучению свойства живучести - обеспечения стойкости зданий и сооружений к аварийным воздействиям, или как часто можно услышать к прогрессирующему обрушению (далее "ПО").

Но в настоящее время вопреки прогрессу в области проектирования строительных конструкций их возведения и эксплуатации, в мировой практике и у нас в стране проблема живучести далека от ее эффективного решения. Причин тому несколько. Основная причина — сегодня в мире не существует единой и "адекватной" методики расчета на "ПО" при проектировании даже для обычных зданий, не говоря уже об уникальных сооружениях, например большепролетных конструкциях. Как следствие существует "сырая" нормативная база в области расчета на "ПО". В нормативной базе РФ существует целый ряд документов, одна часть которых предписывает необходимость расчета на живучесть, например ГОСТ 27751-88, а другая часть, например, серия рекомендаций, разработанная МНИИТЭП, используется для выполнения большинства расчетов на "ПО" при проектировании. С одной стороны, в этих рекомендациях имеется много противоречий, порождающих путаницу и недоразумения у специалистов, а с другой стороны, поскольку эти документы носят рекомендательный характер, получается, что проектировщики вынуждены работать вне правового поля. Все это объясняется тем, что теория живучести систем еще только находится на стадии становления и оформления в самостоятельную научную дисциплину.

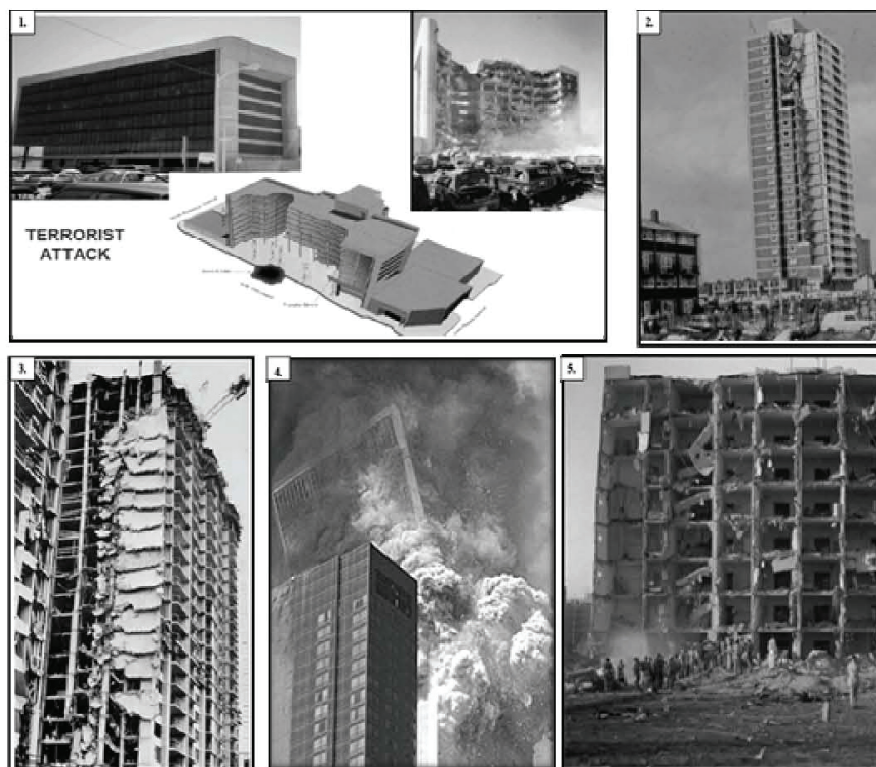


Рис. 1. Здания, испытавшие значительные повреждения вследствие различных причин.

Желание обеспечить свойство живучести в технических системах требует разработки методов анализа и оценки механизмов и средств его обеспечения для каждого конкретного класса систем. Надо отметить, что тематика живучести систем является далеко не новой, начало она берет в 50-е и более ранние годы 20 века. Значительный вклад в разработку вопросов общей теории живучести систем среди отечественных ученых внесли работы докторов наук Рябина И.А., Догодонова А.Г., Шербистова Е.И., Крапивина В.Ф., Парфенова Ю.М., Флейшмана Б.С., Котельникова В.А. Тематика живучести в строительной сфере описывается в работах и научных публикациях отечественных исследователей: Стрелецкого Н.С., Абовского Н.П., Шапиро Г.И., Травуша В.И., Перельмутера А.В., Еремеева П.Г., Алмазова В.О., Распоргуева Б.С., Тамразяна А.Г. Следует отметить, что количество публикаций по тематике зарубежных авторов значительно больше, чем отечественных. Среди иностранных авторов можно выделить в основном работы ученых

США: Crowder В., Williamson E. В., Bilow D., Crawford J. E. и др.

Особое внимание стоит уделить вопросу терминологии, а именно — его запутанности. Так, в отечественной и иностранной литературе существует колоссальное многообразие вариантов определений и терминов, составляющих языковую структуру складывающейся теории живучести. Наиболее ассоциируемыми и часто употребляемыми понятиями, связанными с вопросом безопасности сооружения, являются: прогрессирующее обрушение, надежность, живучесть, риск-анализ, долговечность, запасы по несущей способности, закладываемые в конструкции. Но эти термины требуют не только уточнения, но и разграничения в их смысловом использовании. Особое внимание стоит уделить термину прогрессирующее обрушение (разрушение). "ПО" — прямолинейный, не очень удачный перевод с английского языка. Многие специалисты предлагают поменять его на лавинообразное, цепное или нарастающее обрушение. А иностранные исследователи

предлагают заменить термин "progressive collapse" на "disproportional collapse", либо применять термины: "robustness", "viability", или "life-safety concept". На взгляд авторов данной статьи все вышеперечисленные предложения несостоятельны, так как любое разрушение является прогрессирующим, поскольку представляет последовательность частных разрушений на микро- либо макро-уровне. Изначально в любом сооружении существует прогресс в накоплении повреждений, который рано или поздно может привести к невозможности эксплуатации. Вспомним, например, развитие трещины в хрупком материале.

Лавинообразность (мгновенность), как качество, считающееся неотъемлемым для "ПО", тоже не является обязательным. Обрушение может произойти за достаточно длинный отрезок времени и быть вызвано медленной цепочкой отказов. Диспропорциональность - тоже неадекватное качество. В зарубежных нормах в качестве сравнительной характеристики при расчете на отказ вертикального элемента, например, колонны или пилона, инженерам-проектировщикам предлагаются вполне конкретные лимитирующие ограничения обрушения - 70м<sup>2</sup> или 15% площади этажа. Аналогичные положения были заимствованы и в наши нормативные документы. Однако непонятно, что в этом случае является "характеристикой пропорциональности" (ед. измерения для колонн - шт., для плиты перекрытия - м<sup>2</sup>)?

Еще одно из часто встречающихся недоразумений - это смешивание терминов живучести и надежности. Есть специалисты, которые считают, что надежность сооружения можно обеспечить присущим ему свойством живучести. Для этого необходимо повысить степень статической неопределенности системы. Но это не соответствует основам теории систем. С точки зрения концепции безопасности, всякую сложную систему следует изучать в ее диалектическом рассмотрении с трех основных позиций: надежности системы, ее живучести системы и безопасности. Среди многочисленных научных дисциплин существует уже сформировавшаяся теория, изучающая все вышеперечисленные свойства. Это теория систем. При ее применении в соответствии с требованиями системного анализа различают три группы свойств системы:

- свойства системы, характеризующие взаимодействие системы с внешней средой;
- свойства, характеризующие внутреннее строение системы, ее структуру;
- общесистемные интегральные свойства системы, характеризующие ее поведение: полезность (А-качество), эффективность (Е-качество), самоорганизация (L-качество), безопасность (S-качество), устойчивость (В-качество), управляемость (С-качество), надежность (R-качество), помехоустойчивость (I-качество), живучесть (см. рис. 2).

Надежность (**R-качество**; reliability) понимается как безотказность, т.е. изначальное свойство любой системы. Для технических систем оно определяется, как способность технической системы сохранять во времени в установленных пределах значения признаков и параметров, характеризующих те свойства, которые определяют ее способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях. Если нет устойчивого образования связанных между собой элементов (качество надежности), то не имеет смысла рассматривать какие-либо другие качества системы. Поскольку каждое последующее качество имеет смысл при наличии предыдущих. В связи с этим, в настоящее время надежность систем часто считают "нулевым" уровнем безопасности.

В литературе по теории системного анализа имеются результаты исследований, как правило, двух-трех совместных интегральных свойств систем. Например, RI-качества, IC-качества (управляемость при наличии шумов), RP-качества. При этом надо учитывать, что интегральные свойства сложных систем в общем случае не являются простой суммой свойств, входящих в систему элементов. **РС-качество в русском языке** получило название "**живучесть**", то есть способность системы сохранять свойства, необходимые для выполнения требуемых функций при наличии неблагоприятных воздействий, не предусмотренных условиями нормальной эксплуатации, вызывающими повреждения (отказ) элементов системы.

Наиболее общим представляется определение свойства живучести, как способности системы адаптироваться к новым, изменившимся и, как правило, непредвиденным (аварийным) ситуациям, противостоять вредным воздей-

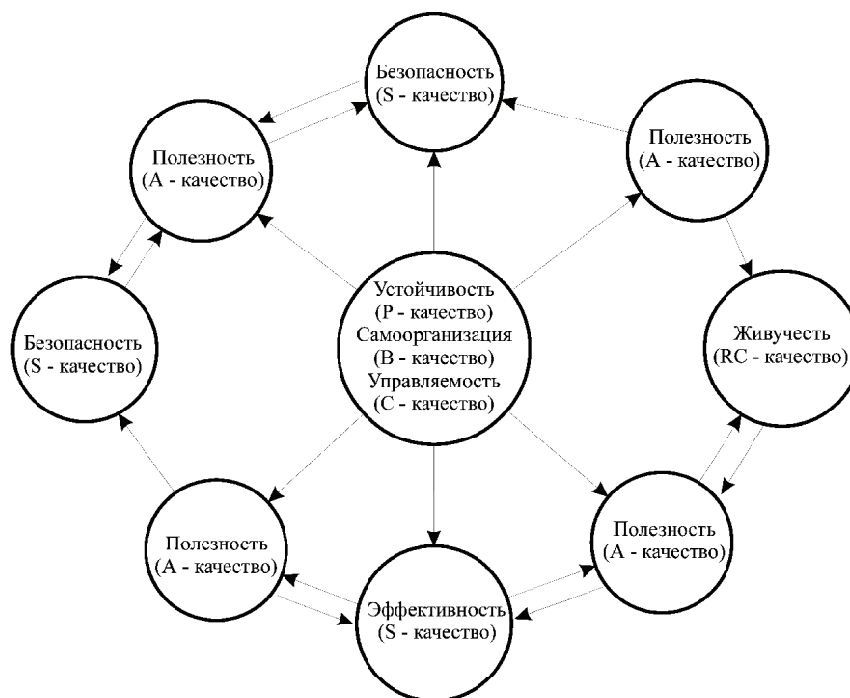


Рис. 2. Взаимосвязь основных интегральных свойств (качеств) сложных динамических систем.

ствиям, выполняя при этом свою целевую функцию за счет соответствующего изменения структуры и поведения системы. В зависимости от степени сложности организации и класса систем, а также уровня анализа свойство живучести может проявляться (и соответственно количественно оцениваться) теми же показателями, которые характеризуют устойчивость, прочность, надежность, адаптивность, отказоустойчивость, помехоустойчивость и т.д. В частности получается, что согласно основным позициям теории систем при решении вопроса в вероятностной постановке за счет повышения уровня надежности системы, повышается уровень ее живучести, а не наоборот.

В [1] предлагается разграничение сфер ответственности надежности и живучести в зависимости от состояния системы. Так "...подход к формализации состояний систем в теории живучести существенно отличается от принятого в теории надежности. На множестве отказовых, с точки зрения надежности, состояний системы могут быть выделены состояния, допускающие решение системой поставленной задачи с заданной эффективностью (см. табл. 1). Что

применительно к металлическим конструкциям оправдывает допущение при повреждении пластических деформаций близких к предельным. Существенной особенностью исследованной живучести систем является их вынужденная априорность. Нерасчетные условия, возникающие в аварийных ситуациях, крайне редки и их опыт может быть распространен весьма ограниченно. Проведение специальных испытаний в натуре или просто невозможно, или крайне дорого".

Под отказоустойчивостью (стойкостью) понимается проявление свойства живучести в нормальном режиме эксплуатации. Так, в нормах для проектирования АЭС существует понятие "проектной" аварии, на которую в том числе должны быть рассчитаны конструкции. Существует мнение, что следует изучать природу аварийных воздействий. Определив, а впоследствии "занормировав" величину последних, можно запроектировать конструкцию с "ключевыми" элементами. При этом подразумевается, что отказ "ключевого" элемента, рассчитанного на аварийное воздействие, невозможен. Но это выводит нас за рамки проблемы

живучести, и вызывает необходимость определения параметров аварийного воздействия, что является крайне сложной и неопределимой задачей.

Модели живучести могут быть стохастические, в рамках современной математической теории надежности, или детерминированные, в рамках механики катастроф. Вероятностную модель, описывающую живучесть системы называют "нагрузка — прочность" ("нагрузка — несущая способность", прочностная модель). Под действием внешней нагрузки "прочность" системы постепенно уменьшается до тех пор, пока система не выйдет из строя. Внешние нагрузки описываются случайной величиной (функцией).

При анализе живучести широко используется аппарат теории графов, позволяющий оценить топологию системы, и как следствие, взаимное влияние элементов друг на друга. Детерминистическая модель живучести системы лежит в основе механики катастроф, в рамках которой исследуются процессы накопления

повреждений, достижения предельного (критического) состояния, реакции элементов конструкций на внешние воздействия и т.д. Особое место в механике катастроф занимает изучение процесса закритического поведения элементов конструкций (систем). Когда в своей закритической области они выходят из строя и оказывают влияние на другие элементы системы, порождая внутренние для самой конструкции негативные воздействия. Внешние и внутренние воздействия приводят к последовательности отказов элементов системы, инициирующих ее переход в аварийное состояние (ЧС). Детерминированные модели, чаще всего логические, незаменимы там, где нужна однозначность, в оценке живучести системы на уровне "да" или "нет".

Важный и ответственный этап в формировании теоретических основ любого свойства — выбор его показателей и критериев. Так, нарушение функционирования систем возможно при нарушении связности их структур. Система не может выполнять свои функции без взаимодействия между всеми или, по крайней мере, жизненно важными элементами. Комплексным "показателем живучести" для дискретной системы (стержневой конструкции) служит минимальное число элементов системы (реберная связность) или узлов (вершинная связность), выход из строя которых под влиянием внешних воздействий приводит к

Таблица 1.

Воздействия \ Состояния	Расчетные	Нерасчетные
Работоспособности	Надежность	Живучесть
Способности	Отказоустойчивость	

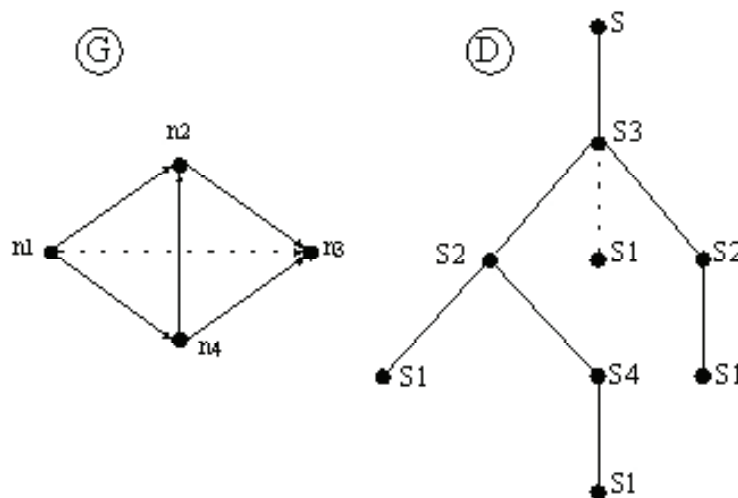


Рис. 3. Модели живучести. Связность.

нарушению функционирования системы. Для коммуникационной сети (графа) (см. рис. 3) без резервного соединения реберная связность равна 2, вершинная — 1. При использовании резервного соединения реберная связность возрастает до 3, а вершинная остается равной 1. Показатели живучести для континуальных систем (например, мембранные конструкции, монолитные ж.б. конструкции с континуальными элементами в виде стен и плит) в настоящее время в науке пока не сформулированы, при их разработке возникают затруднения — так в континуальной системе нельзя четко выделить (обосновать) область отказа. В общем случае тестовыми повреждениями для континуальной конструкции могут выступать — разрез, отверстие, ограниченное некоторой областью. Для обоснования рациональной величины "тестового" повреждения, при котором конструкция будет стойкой к последнему, необходим аппарат теории риска, который позволит связать вероятность возникновения определенной величины повреждающего воздействия и ущерб, к которому может привести воздействие.

Оценить степень повреждения конструкции можно, используя индекс живучести:

$$I_{RC} = \frac{R_{\max} - R}{R_{\max}},$$

т.е. отношение разницы максимально возможного и нанесенного повреждения к максимально возможному повреждению (связности).

В заключительной части статьи приводится рекомендуемая авторами методика проверки на живучесть. В качестве примера рассмотрено покрытие Ледового дворца спорта на Ходынском поле (гл. конструктор Кельман М.И., ООО "ГК Техстрой").

В методику анализа были заложены следующие предпосылки и положения:

1. Количество стартовых аварийных воздействий ограничивается принципом "единичного отказа". В соответствии с принципом, система должна выполнять свои функции при любом исходном, но только **одном** событии, вызывающем повреждение системы.

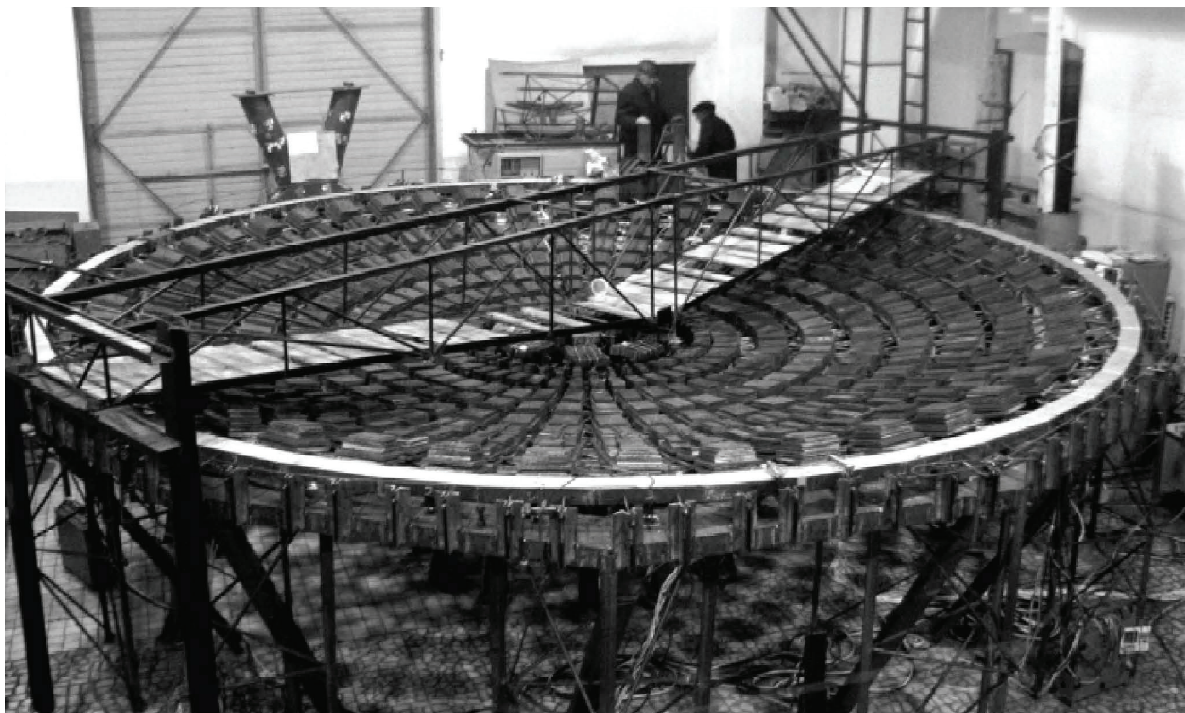


Рис. 4. Исследования на модели ЛДС в лаборатории ЦНИИС.

2. Для реального сооружения, учитывая малую вероятность и небольшую продолжительность аварийной ситуации, а также ограниченные требования по продолжительности обеспечения несущей способности натурального сооружения (только на время эвакуации людей), можно обосновать проверку на живучесть при действии нормативных значений постоянных нагрузок и длительных составляющих временных нагрузок ( $\gamma_{ni} = \gamma_{fi} = 1$ ).
3. Узловые соединения конструктивных элементов для упрощения анализа принимаются равнопрочными основным элементам.
4. За критерий живучести было принято следующее условие — живучесть конструкции обеспечена, если первичные отказы элементов не приводят к разрушению других элементов, на которые перераспределяется нагрузка. Так как аварийные условия оправдывают допущение в поврежденной конструкции деформаций близких к предельным, то в качестве критерия надёжности для несущих элементов покрытия, в основном выполненных из сталей класса С345К и С390, принимались наибольшие допустимые пластические деформации на стадии разрушения материала, с коэффициентом запаса 0,8. Например, для стали класса С390 согласно ГОСТ 27772-88\* гарантируемая предельная деформация  $\varepsilon_{lim}$  составляет 20%, что даёт допустимую величину  $0,8 \cdot 20 = 16\%$ . Математическая запись критерия невыхода из строя

отдельных несущих элементов, перегруженных в результате аварийного воздействия, может быть записана в виде следующего неравенства:

$$\varepsilon_{max} = f\left(\sum_{i=1}^m P_i \cdot \alpha_i\right) \leq \varepsilon_{lim} = f(R_{un}; \gamma_c)$$

где  $P_i$  — нагрузка,

$\alpha_i$  — число влияния,

$R_{un}$  — временное сопротивление стали разрыву,

$\gamma_c$  — система коэффициентов надёжности.

Т.к. при неблагоприятных условиях отказ конструктивных элементов происходит с большой скоростью при наличии в них значительных напряжений, а при этом освобождается накопленная ими упругая потенциальная энергия, то происходит значительный динамический всплеск усилий в других элементах покрытия. В связи с чем расчёты выполнялись в динамической постановке с учётом физической и геометрической нелинейности с помощью программного комплекса "Nastran".

Вначале выполнялась серия статических расчётов для указанной комбинации нагрузок с целью определения деформаций и внутренних усилий в "неповрежденной" математической модели. Далее в расчётной схеме для моделирования аварийной ситуации мгновенно удалялся выбранный конструктивный элемент, узел. К местам образовавшегося разрыва прикладывались внешние силы, равные внутренним

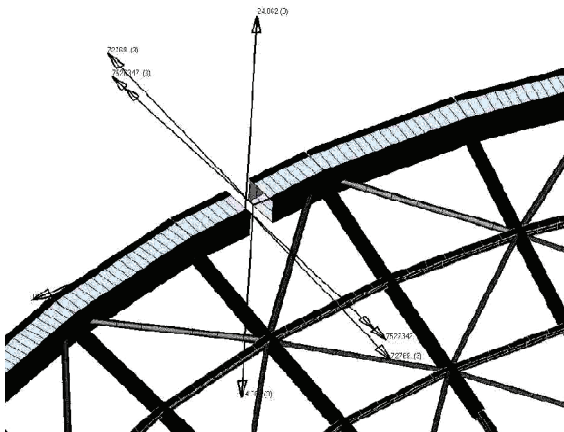


Рис. 5. Фрагмент расчетной схемы модели.

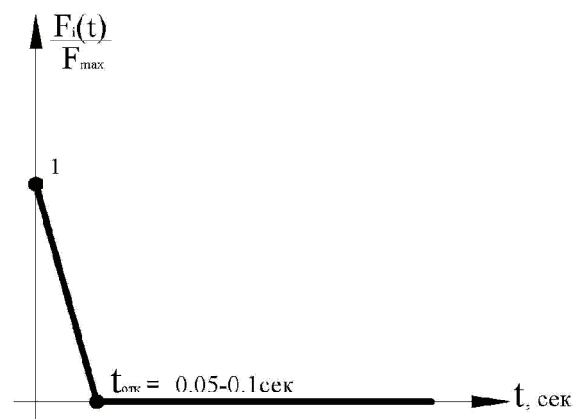


Рис. 6. Временная функция отказа.



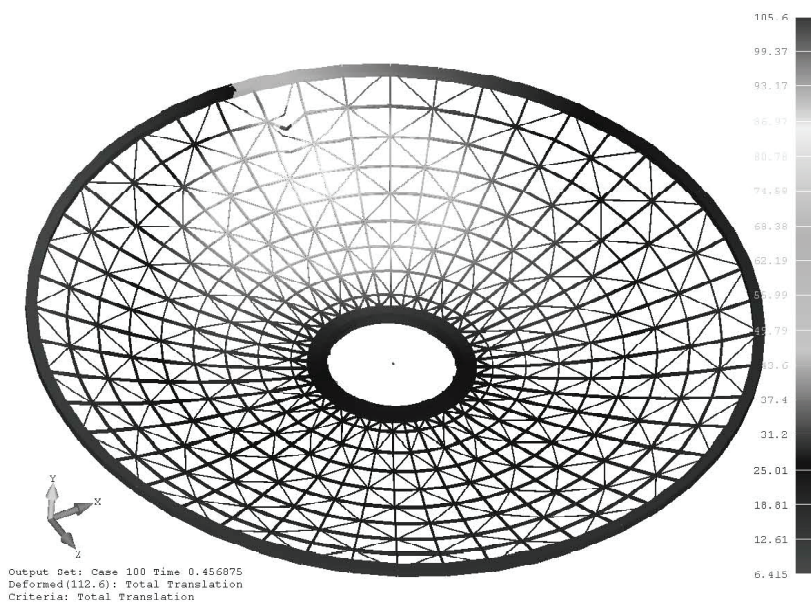
усилиям в удаленном элементе ( $M_i, N, Q_i, M_{кр}$ ), с обратным знаком для восстановления статического равновесия (см. рис. 5). После этого выполнялись проверочные статические расчёты, чтобы убедиться в эквивалентности замены элемента соответствующими внешними силами.

В расчётной программе была создана функция зависимости указанных внешних сил ( $M_i, N, Q_i, M_{кр}$ ) от времени (см. рис. 6). Эта функция служит для моделирования во времени процесса разрушения аварийного элемента. В идеале вид такой зависимости должен устанавливаться экспериментальным путём и быть различным для разных усилий. При проектировании можно принять линейное изменение функции от максимума до нуля в интервалах времени от 0,05 до 0,1 секунды. Заложённая в проверку математическая модель отказа элементов была отработана при испытаниях с взрывами на крупноразмерной модели (см. рис. 4). Другой способ моделирования отказов основан на аналогичном изменении физико-механических характеристик конечных элементов во времени, например, падении до нуля модуля упругости  $E$ .

Далее выполнялись динамические расчёты с опцией Nonlinear Transient Response, реализу-

ющей прямое численное интегрирование дифференциального уравнения переходного динамического процесса во времени. В качестве начальных условий задавались ранее вычисленные деформации системы. Были рассмотрены следующие аварийные ситуации: отказы внешнего и внутреннего колец, отказы расколов, нитей, отказы узлов примыкания различных элементов и т.д.

В результате проверки на живучесть, выполненной еще при разработке покрытия на стадии "Проект", выяснилось, что ключевым элементом оболочки является только внешнее кольцо. Так, его отказ приводил к потере несущей способности покрытия вследствие неограниченного роста пластических деформаций в элементах решетки (см. рис. 7, 8). В результате специалистами проектной организации были выработаны конструктивные меры смягчения возможных последствий аварийных отказов путем внесения изменений в первоначальную конструкцию оболочки. Резервирование внешнего контура было достигнуто за счет системы "ловителей", предназначенных в случае отказа наружного опорного контура, воспринять горизонтальные усилия и передать их на нижележащие ж.б. конструкции перекрытий.

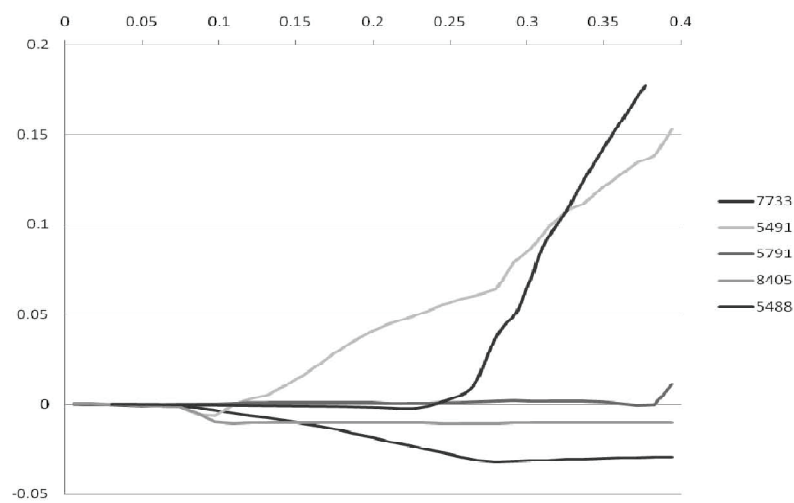


**Рис. 7.** Деформации покрытия (см) в момент времени 0,4 сек после отказа внешнего кольца. Разрушение начинается с крестовой решетки.

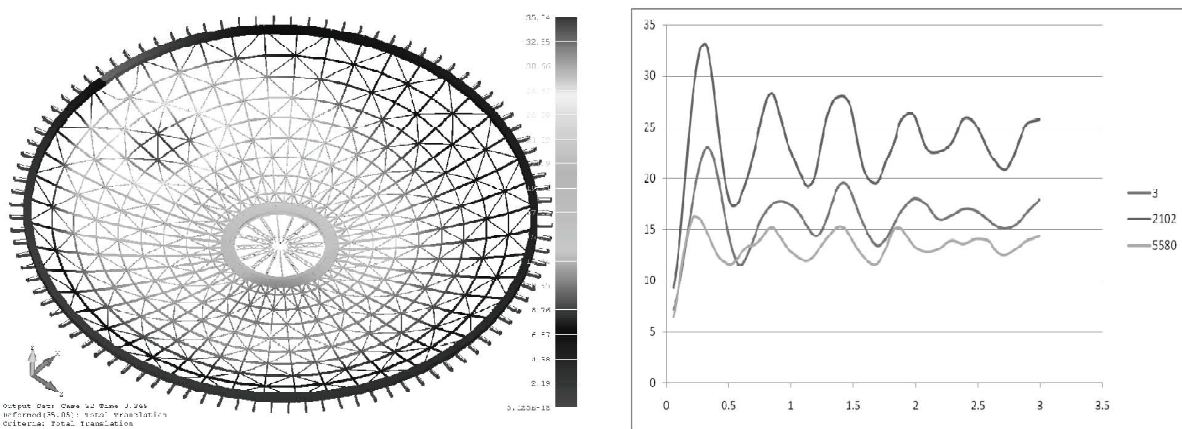
Резервирование внутреннего контура — за счет дополнительного металлического кольца из стального листа толщиной 20мм и дополнительных центральных радиальных ферм, расположенных внутри центрального кольца. Изменения коснулись также и математической модели сооружения, в которой система ловителей была замоделирована контактными элементами зазора типа "gap". Результаты расчетов "обновленной" математической модели показали,

что конструкции резервирования позволяют обеспечить живучесть покрытия, т.к. снижают максимальные пластические деформации элементов до 3-4% при отказе внешнего кольца. При резервировании максимальная величина коэффициента динамичности составила 1.47.

С инженерной точки зрения представляет интерес оценка удельного вклада любого элемента, узла в обеспечение стойкости конструкции к аварийным воздействиям. Для такой оцен-



**Рис. 8.** Неограниченное развитие пластических деформаций для различных элементов покрытия. Резервирование отсутствует (по вертикальной оси отложены относительные деформации, по горизонтальной — время в сек.)



**Рис. 9.** Деформации усиленного покрытия при отказе внешнего кольца. Динамические колебания различных узлов (по вертикальной оси отложены перемещения см, по горизонтальной — время в сек.)

ки могут использоваться данные модального анализа и энергетического портрета конструкции при наличии в ней "тестовых" повреждений. Энергетический портрет представляет собой совокупность данных об изменении потенциальной и кинетической энергии конструкции, энергии рассеивания во время ее повреждения. Современные программные комплексы позволяют вычислить частоты свободных колебаний конструкции с учетом изменения ее жесткости, даже при наличии значительных пластических деформаций в результате повреждения. Результаты анализа изменения частотного отклика конструкции в зависимости от степени повреждений представлены в

таблице 2. В первой строке приведены базовые частоты собственных колебаний покрытия, не имеющего повреждений, при постоянных и длительных временных нормативных нагрузках (при отсутствии снега). В остальных строках приведены значения собственных частот колебаний и их изменения в процентах по отношению к базовым частотам при различных повреждениях и дополнительных нагрузках от снега. Во второй строке таблицы 2 приведены собственные частоты после локального разрушения ключевого элемента покрытия — наружно-опорного кольца. По величине существенно изменилась только первая частота на 27.1%. По формам колебаний изменились практически

Таблица 2.

№	Описание повреждения	f <sub>1</sub> (Гц)	f <sub>2</sub> (Гц)	f <sub>3</sub> (Гц)	f <sub>4</sub> (Гц)	f <sub>5</sub> (Гц)	f <sub>6</sub> (Гц)	f <sub>7</sub> (Гц)	f <sub>8</sub> (Гц)
1	Покрытие без повреждений	1.431	1.449	1.562	1.693	1.786	1.789	1.936	1.938
2	Локальное разрушение наружного кольца	1.043	1.434	1.491	1.594	1.725	1.784	1.810	1.932
		-27.1%	-1%	-4.5%	-5.8%	-3.4%	-0.3%	-6.5%	-0.3%
3	Локальное разрушение внутреннего кольца	1.430	1.446	1.562	1.692	1.785	1.788	1.936	1.937
		-0.1%	-0.2%	0%	-0.1%	-0.1%	-0.1%	0%	-0.3%
4	Разрушение узла соединения нити и двух раскосов с наружным кольцом	0.909	1.411	1.485	1.564	1.702	1.755	1.795	1.904
		-36.5%	-2.6%	-4.9%	-7.6%	-4.7%	-1.9%	-7.3%	-1.8%
5	Отрыв нити от наружного кольца	1.431	1.449	1.561	1.691	1.783	1.788	1.933	1.937
		0%	0%	-0.1%	-0.1%	-0.2%	-0.1%	-0.1%	-0.1%
6	Отрыв нити с двумя раскосами от наружного кольца	1.405	1.448	1.542	1.690	1.772	1.781	1.917	1.931
		-1.8%	0%	-1.3%	-0.2%	-0.8%	-0.4%	-1.0%	-0.4%
7	Разрушен промежуточный узел соединения кольца с нитью и 4-мя раскосами	1.356	1.448	1.533	1.687	1.757	1.776	1.906	1.920
		-5.2%	-0.1%	-1.9%	-0.4%	-1.6%	-0.7%	-1.5%	-0.9%
8	То же, в другом узле (ближе к центру)	1.418	1.437	1.560	1.692	1.783	1.785	1.929	1.934
		-0.9%	-0.8%	-0.1%	-0.1%	-0.2%	-0.2%	-0.4%	-0.2%
9	Разрушено 8 узлов предыдущего типа, равномерно распределённых по покрытию	1.291	1.332	1.394	1.667	1.676	1.678	1.777	1.836
		-9.8%	-8.1%	-10.8%	-1.5%	-6.2%	-6.2%	-8.2%	-5.3%
10	Покрытие без повреждений, с нормативной снеговой нагрузкой (140 кгс/м <sup>2</sup> )	1.115	1.129	1.214	1.275	1.336	1.337	1.441	1.442
		-22.2%	-22.1%	-22.3%	-24.7%	-25.2%	-25.3%	-25.6%	-25.6%
11	То же, с расчётной снеговой нагрузкой (200 кгс/м <sup>2</sup> )	1.020	1.033	1.110	1.159	1.212	1.213	1.307	1.308
		-28.7%	-28.7%	-28.9%	-31.5%	-32.1%	-32.2%	-32.5%	-32.5%

все частоты. Немного более сильное изменение 1-ой частоты отмечается в 4-ой строке таблицы 10 - 36.5%. Здесь разрушается не только кольцо, но и примыкающие к нему нить с раскосами. Это — более сильное повреждение. Остальные частоты при этих повреждениях изменились незначительно: локальное разрушение внутреннего кольца, отрыв нити с раскосами от наружного кольца, удаление отдельных узлов сетки покрытия мало влияет на величины собственных частот колебаний конструкции покрытия — в пределах от 0 до 5%, в большинстве случаев это меньше 1% (см. строки 3, 5-8 табл. 2).

Эти проценты также "плавают" в зависимости от места локального разрушения. От 1.5% до 10.8% меняются собственные частоты колебаний при множественных (до 8 шт.) удалениях промежуточных узлов сетки покрытия (см. строку 9 таблицы 2).

Следует отметить, что при всех локальных повреждениях в той или иной степени меняются формы собственных колебаний покрытия. Также появляются и новые формы. В последних двух строках таблицы 2 приведены изменения собственных частот в зависимости от величины снеговой равномерно распределённой нагрузки на покрытие. Изменения частот здесь относительно существенные и достаточно равномерно распределены по частотам. При нормативной снеговой нагрузке эти изменения колеблются в пределах 22.1% — 25.6%, при расчётной нагрузке 28.7% — 32.5%.

Следует обратить внимание на то, что тестовые повреждения отличаются предельной "жесткостью", практически невероятной в действительности. При этом частотный отклик на эти повреждения оказался относительно небольшим. Это объясняется тем, что конструкция покрытия ЛДС отличается большой живучестью, то есть слабой чувствительностью к отказу отдельных конструктивных элементов, в том числе ключевых.

## Литература

1. Стекольников Ю.И. "Живучесть систем", из-во Политехника, Санкт-Петербург, 2002.
2. Кочкаров А.А., Малинецкий Г.Г. Обеспечение стойкости сложных систем. Структурные аспекты. ИМП им. М.В. Келдыша РАН, Москва, 2005.
3. ГОСТ 27.002-89 "Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения".
4. ГОСТ 27751-88 "Надежность строительных конструкций и оснований".
5. Проект СНиП 20-01-2003 "Надежность строительных конструкций и оснований".
6. Перельмутер А.В. "Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций". АСВ, Москва, 2007г.
7. Перельмутер А.В. "Прогрессирующее обрушение и методология проектирования конструкций". ООО "СКАД Софт".
8. Абовский Н.П., Енджиевский Л.В., Морозов С.В., "Живучесть пространственных конструкций зданий и сооружений". Красноярская архитектурно-строительная академия.
9. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций. НП-031-01
10. Стрелецкий Н.С. "Анализ процесса разрушения упруго-пластической системы". Сборник трудов №5, МИСИ им. Куйбышева, Стройиздат, 1947г.
11. Best practices for reducing the potential for progressive collapse in buildings. USA, NISTIR XXXX, 2006.
12. "Progressive Collapse - Historical Perspective", NAVFAC, Brian Crowder, P.E., 2005.
13. "Definition of Progressive Collapse", NAVFAC, Brian Crowder, P.E., 2005.
14. "Dynamic progressive collapse of frame structures", Griengsak Kaewkulchai and Eric B. Williamson, Member ASCE, 15th ASCE Engineering Mechanics Conference, June 2-5, 2002, Columbia University, New York, NY.
15. "GSA. Progressive Collapse Design Guidelines Applied to Concrete Moment-Resisting Frame Buildings" D. Bilow, Tri-service Infrastructure Systems Conference & Exposition, St. Louis, MO - August 2005.
16. "Development of a Progressive Collapse Analysis Procedure for Concrete Frame Structures", The University of Melbourne, Supervisors: A/Prof. Priyan Mendis A/Prof. Nelson Lam urn.
17. UFC - 4-023-03 "Design of Buildings to Resist Progressive Collapse" 25 January 2005.
18. GSA "Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernization Projects" June 2003.
19. "Retrofit Methods to Mitigate Progressive Collapse" John E. Crawford, National Institute of Standards and technology. July 2002.
20. Design of Long Span Bridges for Cable Loss. T. Zoli. R. Woodward
21. Ellingwood, Bruce, Load and Resistance Factor Criteria for Progressive Collapse Design, Multihazard Mitigation Council of the National Institute of Building Standards, Washington, DC 2003, pp. 1-31.
22. Williamson E. B., and Hjelmstad, K. D. (2001), Nonlinear dynamics of a harmonically-excited

- inelastic inverted pendulum, Journal of Engineering Mechanics, 127(1), 52-57.
23. Robustness of structural systems - a new focus for the Joint Committee on Structural Safety (JCSS). T.D.G. Canisius, J.D. Sørensen, J.W. Baker. Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering - Kanda, Takada & Furuta. 2007 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-45211-3.

**Кудишин Юрий Иванович** является заведующим кафедрой "Металлические конструкции" МГСУ. Научные интересы: эксплуатационная надежность и живучесть строительных металлических конструкций.

**Дробот Дмитрий Юрьевич** является ассистентом, аспирантом кафедры "МК" МГСУ, главным специалистом ЗАО "Курортпроект". Научные интересы: надежность, живучесть, сейсмостойкость строительных конструкций.

**Кудишин Юрій Іванович** є завідувачем кафедри "Металеві конструкції" МГСУ. Наукові інтереси: експлуатаційна надійність та живучість будівельних металевих конструкцій.

**Дробот Дмитро Юрійович** є асистентом, аспірантом кафедри "МК" МГСУ, головним спеціалістом ЗАО "Курортпроект". Наукові інтереси: надійність, живучість, сейсмічностійкість будівельних конструкцій.

**Kudishin Yury Ivanovich** - Dr. Sc., professor, Head of Metal Structures Department MBSU. His research interests include the functional reliability and survivability of metal structures.

**Drobot Dmitry Yur'yevich** is a postgraduate (student), and an assistant (lecturer) of Metal Structures Department, a chief specialist of the ZAO "Kurortproject". His research interests include reliability, survivability, and seismic stability of building structures.