

Живучесть конструкций в аварийных ситуациях



Юрий Кудишин, заведующий кафедрой «Металлические конструкции» МГСУ, доктор технических наук, профессор

Дмитрий Дробот, аспирант МГСУ

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 и т. д. (см. рис. 1).

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 — сегодня отечественные и зарубежные проектировщики даже при работе над обычными зданиями, не говоря уже об уникальных сооружениях, например, большепролетных конструк-

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.

Желание обеспечить свойство живучести

Теория живучести систем находится на стадии становления и оформления в самостоятельную научную дисциплину

циях, не имеют единой и «адекватной» методики расчета на «ПО». Как следствие, существует «сырая» нормативная база в этой области.

Поясним. В нормативной отечественной базе существуют документы, одна часть которых предписывает необходимость расчета на живучесть, например ГОСТ 27751-88, а другая, например серия рекомендаций, разработанная МНИИТЭП, используется для выполнения

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 Стрелецкого Н. С., Абовского Н. П., Шапиро Г. И., Травуша В. И., Перельмутера А. В., Еремеева П. Г., Алмазова В. О., Мкртычева О. В., Расторгуева Б. С., Тамразяна А. Г. и многих других.

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. Мно-



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

ны, 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 ка-

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 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 ее 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

Всякую сложную систему следует изучать в ее диалектическом рассмотрении с трех основных позиций: надежности системы, ее живучести и безопасности.

гие 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 несостоятель-

чество, считающееся неотъемлемым для «ПО», тоже не является обязательным. Обрушение может произойти за достаточно длинный отрезок времени и быть вызвано медленной цепочкой отказов.

Диспропорциональность — также 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 — 70 м² или 15 % площади этажа. Аналогичные положения были заимствованы и в наши нормативные документы. Однако непонятно, что и чему в этом случае является «характеристикой пропорциональности» (ед. измерения для колонн — шт., для плиты перекрытия — кв. м)?

Еще одно из часто встречающихся недоразумений — смешивание терминов живучести и надежности. Есть специалисты, которые

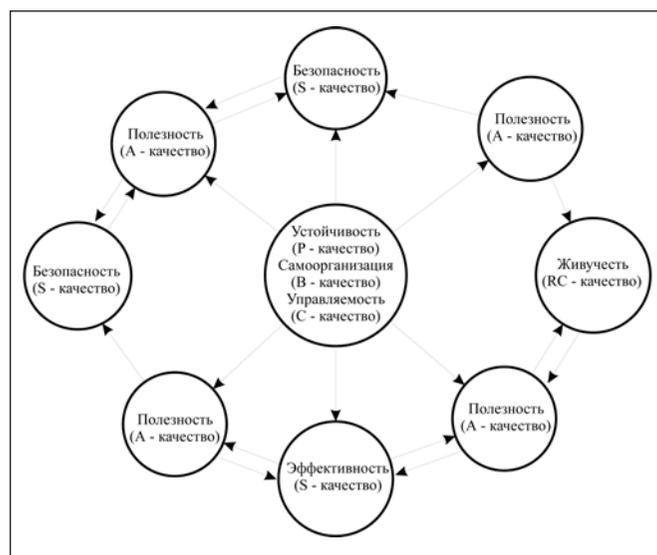


Рис. 2. Взаимосвязь основных интегральных свойств (качеств) сложных динамических систем

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. RC-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 воздействиям, выполняя при этом свою целе-

вую 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.

Некоторые специалисты предлагают разграничить сферы 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 исследований 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

Состояния системы	Воздействия на систему	
	Расчетные	Нерасчетные
Работоспособности	Надежность	Живучесть
Способности	Отказоустойчивость	

Таблица 1. Связь уровня воздействий на систему и качества системы, обеспечивающего ее функциональное назначение

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» в этом случае служит минимальное число элементов системы (реберная связность) или узлов (вершинная связность), выход из строя которых под влиянием внешних воздействий приводит к нарушению функционирования системы. Для коммуникационной сети (графа) без резервного соединения реберная связность равна 2, вершинная — 1 (см. рис. 3). При использовании резервного соединения реберная связность возрастает до 3, а вершинная остается равной 1. Критерием оценки степени повреждения конструкции может выступать индекс живучести — отношение разницы максимально возможного повреждения системы и нанесенного повреждения к первому.

В окончании статьи будут отображены результаты опыта МГСУ в практическом решении задачи живучести строительных металлических конструкций на примере крупных объектов Москвы.

(Окончание следует)

Система не может выполнять свои функции без взаимодействия между всеми или, по крайней мере, жизненно важными элементами.

нормам 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, практически, 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).

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).

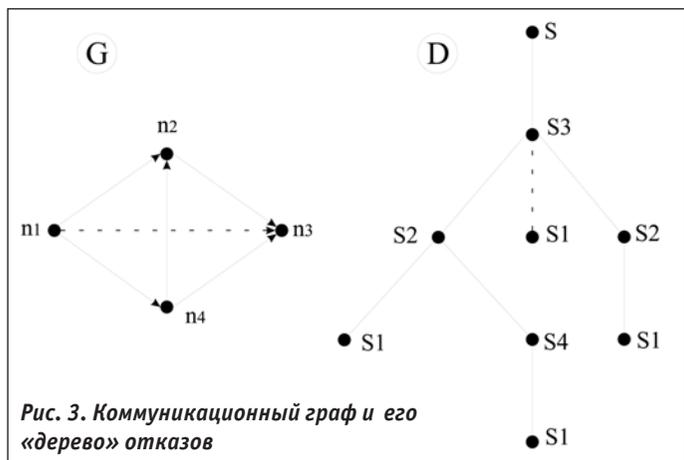


Рис. 3. Коммуникационный граф и его «дерево» отказов

Живучесть конструкций в аварийных ситуациях

Ю. Кудишин, заведующий кафедрой «Металлические конструкции» МГСУ, доктор технических наук, профессор

Д. Дробот, главный специалист ЗАО «Курортпроект», аспирант МГСУ

(Окончание. Начало в «МЗ» № 4(8))

В этой, заключительной части статьи приводится методика проверки на живучесть покрытия Ледового дворца спорта на Ходынском поле (главный конструктор Кельман М. И., ООО «ГК Техстрой»).



В основу методики анализа были заложены следующие предпосылки и положения:

1. Количество стартовых аварийных воздействий ограничивается принципом «единичного отказа». В соответствии с ним, система должна выполнять свои функции при любом исходном, но только одном событии, вызывающем повреждение системы.
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 ($\gamma_{n1} = \gamma_{n2} = 1$).
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 конструк-

ции деформаций близких к предельным, то в качестве критерия надежности 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 ε_{lim} составляет 20 %, что дает 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:

$$\varepsilon_{max} = f(\gamma_n \cdot \sum_{i=1}^m P_i \cdot \alpha_i) \leq \varepsilon_{lim} = f(R_u; \gamma_c)$$

где α_i — число влияния,

R_u — расчетное сопротивление стали по временному сопротивлению,

γ_i — система коэффициентов надежности.

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 расчеты выполнялись

в динамической постановке с учетом физической, и геометрической нелинейности с помощью программного комплекса «Nastran».

Вначале выполнялась серия статических расчетов для указанной комбинации нагрузок с целью определения деформаций и внутренних усилий в «неповрежденной» математической модели. Далее в расчетной схеме для моделирования аварийной ситуации мгновенно удалялся выбранный конструктивный элемент, узел. К местам образовавшегося разрыва прикладывались внешние силы, равные внутренним 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 расчеты, чтобы убедиться в эквивалентности замены элемента соответствующими внешними силами.

В расчетной программе была создана функция зависимости указанных внешних сил ($M_i, N, Q_i, M_{кр}$) от времени (см. рис. 6). Она служит для моделирования во времени процесса разрушения аварийного элемента. В идеале вид такой зависимости должен устанавливаться экспериментальным путем и быть различным для разных усилий. При проектировании можно принять линейное изменение функции от максимума до нуля в интервалах

Рис. 4. Исследование на модели ЛДС в лаборатории ЦННИИС



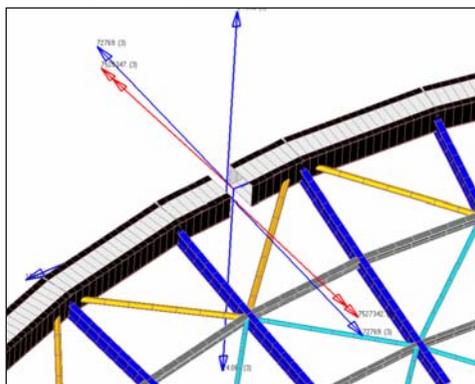
времени от 0,05 до 0,1 секунды. Заложена в проверку математическая модель отказа элементов была отработана при испытаниях с взрывами на крупноразмерной модели (см. рис. 4). Другой способ моделирования отказов основан на аналогичном изменении физико-механических характеристик конечных элементов во времени, например, падении до нуля модуля упругости E .

Далее выполнялись динамические расчеты с опцией Nonlinear Transient Response, реализующей 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 раскосов, 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 дефор-

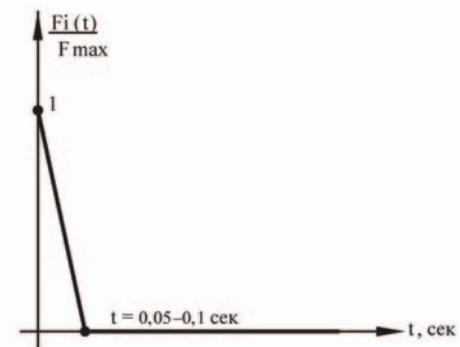
маций в элементах решетки (см. рис. 7, 8). В результате, специалистами пректной организации были выработаны конструктивные меры смягчения возможных последствий аварийных отказов путем внесения изменений в первоначальную конструкцию оболочки. Резервирование внешнего контура было достигнуто за счет системы «ловителей», предназначенных в случае отказа наружного опорного контура, воспринять горизонтальные усилия и передать их на нижележащие ж. б. конструкции перекрытий. Резервирование внутреннего контура — за счет дополнительного металлического кольца из стального листа толщиной 20 мм и дополнительных центральных радиальных ферм, расположенных внутри центрального кольца. Изменения коснулись также и математической модели сооружения, в которой система ловителей была замоделирована контактными элемен-

Рис. 5. Фрагмент расчетной схемы модели



тами зазора типа «гар». 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 величина коэффициента динамичности не превы-

Рис. 6. Временная функция отказа



шала значение в 1,47 раза.

С инженерной точки зрения представляет интерес оценка удельного вклада любого элемента, узла в обеспечение живучести конструкции. Для такой оценки 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 нагруз-

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

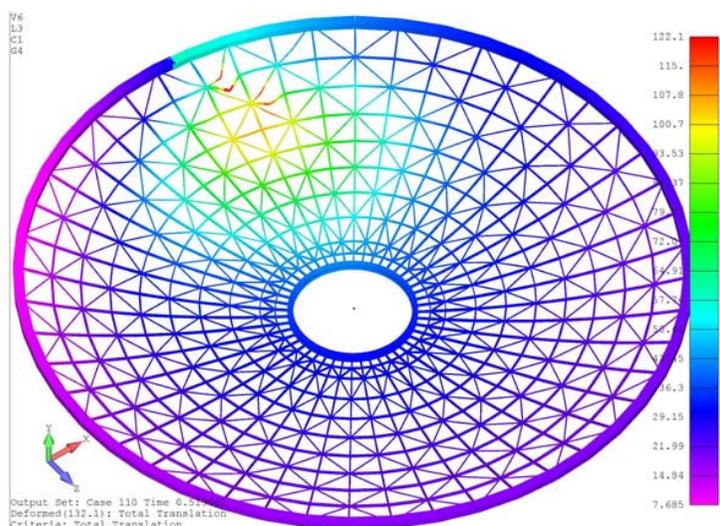


Рис. 8. Неограниченное развитие пластических деформаций для различных элементов покрытия. Резервирование отсутствует

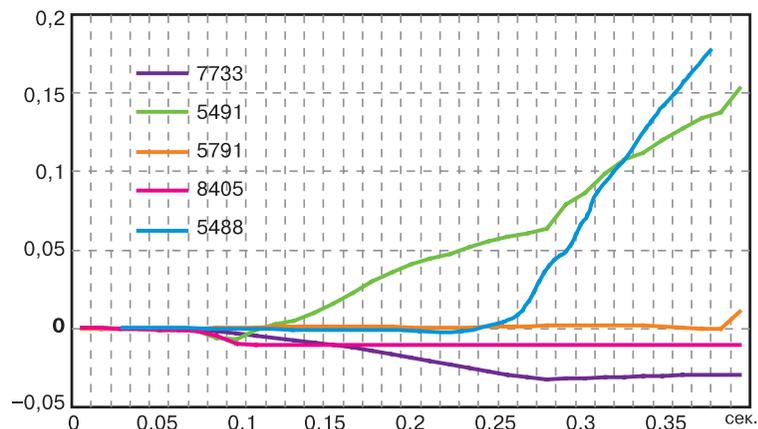
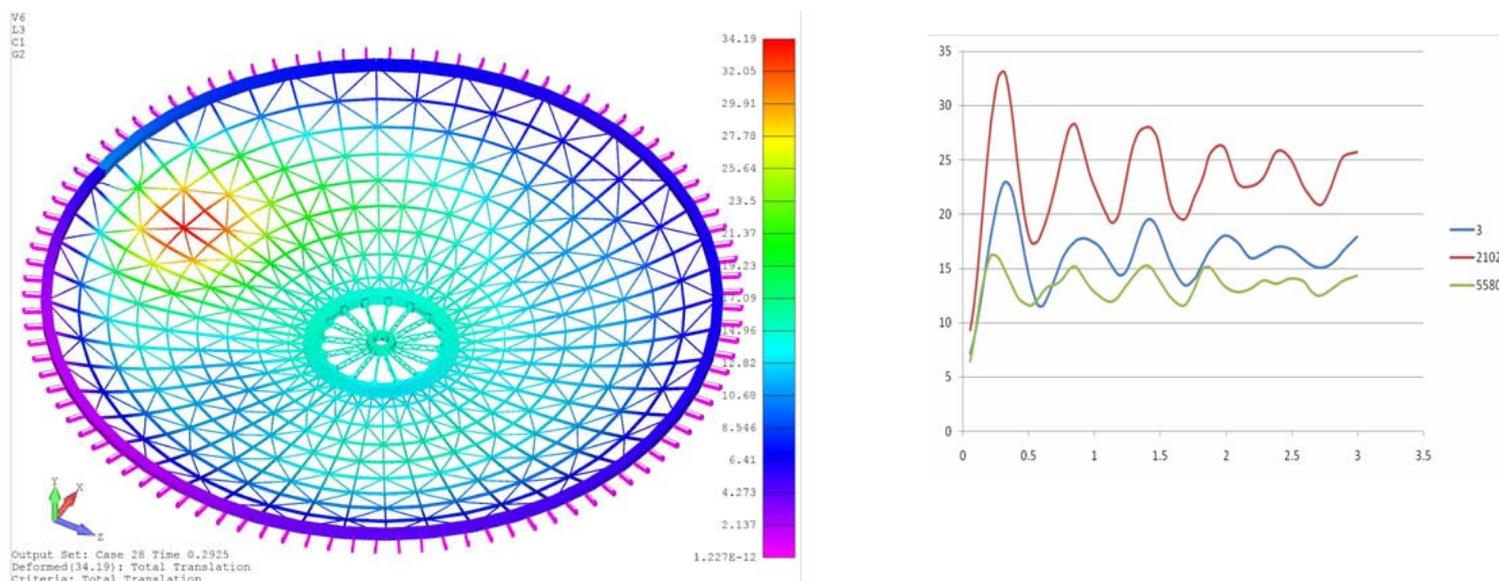


Рис. 9. Деформации усиленного покрытия при отказе внешнего кольца. Динамические колебания различных узлов



ках от снега. Во второй строке таблицы 2 приведены собственные частоты после локального разрушения ключевого элемента покры-

тия — наружного опорного кольца. По величине существенно изменилась только первая частота, на 27,1 %. По формам колебаний из-

менились практически все частоты. Немного более сильное изменение 1-й частоты отмечается в 4-й строке таблицы 10–36,5%. Здесь разрушается не только кольцо, но и примыкающие к нему нити 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. стоки 3, 5-8 табл. 2).

Таблица 2. Результаты анализа изменения частотного отклика конструкции в зависимости от степени повреждений

Описание повреждения	f ₁	f ₂	f ₃	f ₄	f ₅	f ₆	f ₇	f ₈ (Гц)
Покрытие без повреждений	1,431	1,449	1,562	1,693	1,786	1,789	1,936	1,938
Локальное разрушение наружного кольца	1,043	1,434	1,491	1,594	1,725	1,784	1,81	1,932
%	-27,10	-1	-4,50	-5,80	-3,40	-0,30	-6,50	-0,30
Локальное разрушение внутреннего кольца	1,43	1,446	1,562	1,692	1,785	1,788	1,936	1,937
%	-0,10	-0,20	0	-0,10	-0,10	-0,10	0	-0,30
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
%	-36,50	-2,60	-4,90	-7,60	-4,70	-1,90	-7,30	-1,80
Отрыв нити от наружного кольца	1,431	1,449	1,561	1,691	1,783	1,788	1,933	1,937
%	0	0	-0,10	-0,10	-0,20	-0,10	-0,10	-0,10
Отрыв нити с двумя раскосами от наружного кольца	1,405	1,448	1,542	1,69	1,772	1,781	1,917	1,931
%	-1,80	0	-1,30	-0,20	-0,80	-0,40	-1,00	-0,40
Разрушен промежуточный узел соединения кольца с нитью и 4 раскосами	1,356	1,448	1,533	1,687	1,757	1,776	1,906	1,92
%	-5,20	-0,10	-1,90	-0,40	-1,60	-0,70	-1,50	-0,90
То же, в другом узле (ближе к центру)	1,418	1,437	1,56	1,692	1,783	1,785	1,929	1,934
%	-0,90	-0,80	-0,10	-0,10	-0,20	-0,20	-0,40	-0,20
Разрушено 8 узлов предельного типа, равномерно распределенных по покрытию	1,291	1,332	1,394	1,667	1,676	1,678	1,777	1,836
%	-9,80	-8,10	-10,80	-1,50	-6,20	-6,20	-8,20	-5,30
Покрытие без повреждений, с нормативной снеговой нагрузкой (140 кгс/м ²)	1,115	1,129	1,214	1,275	1,336	1,337	1,441	1,442
%	-22,20	-22,10	-22,30	-24,70	-25,20	-25,30	-25,60	-25,60
То же, с расчетной снеговой нагрузкой (200 кгс/м ²)	1,02	1,033	1,11	1,159	1,212	1,213	1,307	1,308
%	-28,70	-28,70	-28,90	-31,50	-32,10	-32,20	-32,50	-32,50

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 распределенной 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 расчетной 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.