

## К ОЦЕНКЕ БЕЗОПАСНОСТИ БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫХ МЕМБРАННЫХ ПОКРЫТИЙ

Н.В. КАНЧЕЛИ, техн. директор, гл. конструктор ЗАО «Курортпроект», доктор техн. наук;  
Ю.И. КУДИШИН, зав. кафедрой «Металлические конструкции» МГСУ, доктор техн. наук;  
П.А. БАТОВ, начальник ОСК1, зам. гл. конструктора ЗАО «Курортпроект», канд. физ.-мат. наук;  
Д.Ю. ДРОБОТ, гл. специалист ОСК1 ЗАО «Курортпроект»

**В статье рассматривается вопрос живучести мембранных покрытий на основе использования современных вычислительных программных комплексов.**

На сегодняшний день актуальность проблемы безопасности в различных сферах человеческой жизнедеятельности, в том числе и сфере эксплуатации строительных конструкций зданий и сооружений, не вызывает сомнений. Причина в том, что деятельность человеческого общества во второй половине XX столетия связана с развитием больших технических и организационно-технических систем глобального масштаба, обеспечивающих жизнедеятельность в экономической, военной, экологической и других областях. По мере развития подобных систем возрастает их чувствительность к различного рода внешним воздействиям стихийного (землетрясения, наводнения, солнечная активность, погодные катаклизмы, аварийные ситуации, катастрофы и др.) и целенаправленного характера (боевые действия противоборствующей стороны, терроризм и др.). В большинстве областей тематика безопасности вылилась в изучение свойства живучести.

Особый интерес среди всего многообразия строительных конструкций вызывают большепролетные оболочечные покрытия. Общее свойство большепролетных зданий заключается в их уникальности, и, как следствие, в высокой степени ответственности. Из множества большепролетных оболочечных систем

можно выделить подкласс мембранных оболочек, которые помимо основных достоинств оболочек, обладают рядом таких свойств как: совмещение несущей и ограждающей функции, индустриальность изготовления, относительно малая металлоемкость. Важнейшим является безопасность эксплуатации. Безопасность обеспечивается высокой надежностью и живучестью мембранных покрытий. Благодаря высоким резервам надежности мембранных покрытий, возможно следующее многообразие архитектурных форм (см. рис. 1). Под живучестью понимается способность конструкции «адаптироваться» к непредвиденным, как правило, аварийным ситуациям, выполняя при этом свою целевую функцию (например, покрытие здания).

Аварийные ситуации имеют малую вероятность появления и небольшую продолжительность, но являются весьма важными с точки зрения последствий достижения предельных состояний. Для этих ситуаций следует составлять особые сочетания нагрузок, состоящие из постоянных, длительных составляющих временных нагрузок и одного из особых воздействий, например, взрывных, сейсмических и др. (СНиП 2.01.07-85\*, п.п. 1.7 – 1.11).

В п. 1.10 действующего ГОСТ 27751-88 содержится требование о расчете конструкций на аварийную ситуацию, в том числе непосредственно после отказа какого либо элемента конструкции. Также существует серия рекомендаций, разработанная МНИИТЭП,

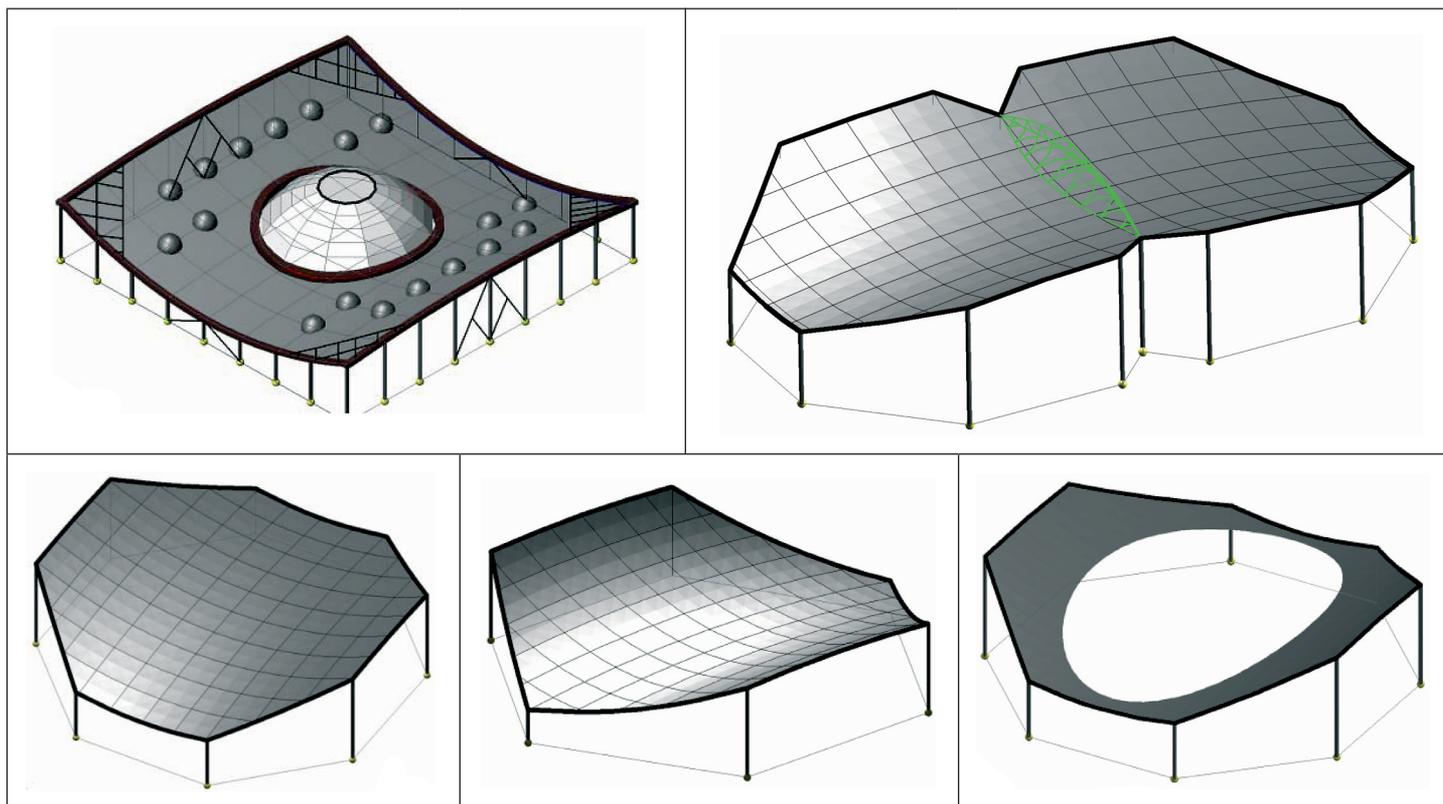


Рис. 1. Новые возможные архитектурные формы мембранных оболочек

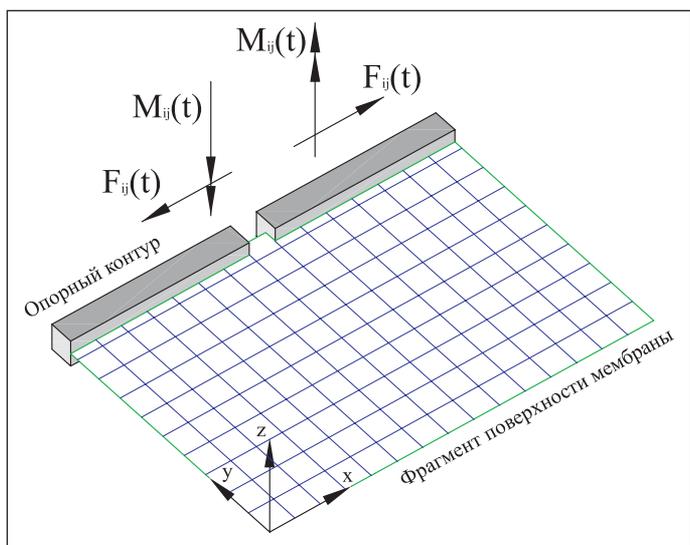


Рис. 2. Принципиальная схема моделирования замены элемента внешними усилиями

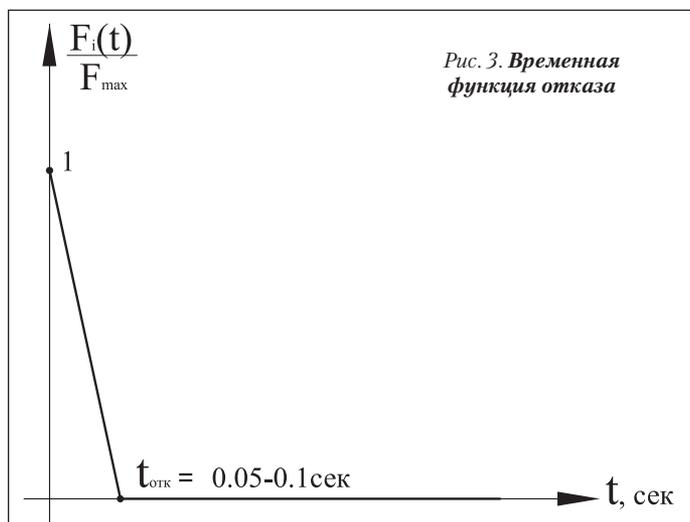


Рис. 3. Временная функция отказа

с помощью которой осуществляется большинство расчетов на прогрессирующее обрушение (далее «ПО») для обычных зданий. Для большепролетных сооружений существует проект «Рекомендаций по обеспечению безопасности большепролетных сооружений от лавиноопасного (прогрессирующего) обрушения при аварийных воздействиях». С одной стороны в этих рекомендациях имеется много противоречий, порождающих путаницу и недоразумения у специалистов, с другой стороны, эти документы носят рекомендательный характер, и проектировщики вынуждены работать вне правового поля. Таким образом, на сегодняшний день не существует единой методики расчета на «ПО» даже для обычных зданий. Это объясняется тем, что теория живучести систем находится на стадии становления и оформления в самостоятельную научную дисциплину. В отече-

ственной и иностранной литературе наблюдается многообразие вариантов определений и терминов, составляющих языковую структуру складывающейся теории. Кроме многообразия, наблюдаются признаки терминологического «голода». 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. За рубежом тематика живучести получила название – «viability» или «life-safety concept». В строительной сфере широко известен ряд работ и научных публикаций, отражающих тематику живучести, следующих авторов: 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., Кудишина Ю.И. и многих других.

Специалистами ЗАО «Курортпроект» (организации накопившей большой опыт проектирования большепролетных конструкций) и МГСУ совместно проводятся исследования живучести мембранных покрытий. Ниже представлены основные положения методики и результаты уже проведенных работ.

Исследования проводились сначала для плоских, затем для «седлообразных» мембран на прямоугольном плане размером 100x100 м. Связано это с тем, что современные программные комплексы с «трудом» справляются с расчетом мембранных покрытий. С увеличением нагрузки на мембрану появляются волны потери местной устойчивости, что приводит к существенному увеличению времени счета на компьютере. Причина появления волн – краевой эффект из-за совместности деформаций сжатого контура и тонкой мембраны, преимущественно работающей на сжатие вблизи опорного контура. Характерный размер «гофра» волны составляет: ширина  $\approx 3$  м, высота  $\approx 50$  мм. Процесс образования волн в мембране представляет собой высокую геометрическую нелинейность с плохой сходимостью итерационного процесса, и расчетные программы «капризно реагируют» на малейшие изменения в настройках расчетов. Например, в процессе исследований выяснилось, что широко известный комплекс «MSC.Nastran» не может рассчитать мембрану размером более 40x40 м при сетке конечных элементов размером менее 0,4 м.

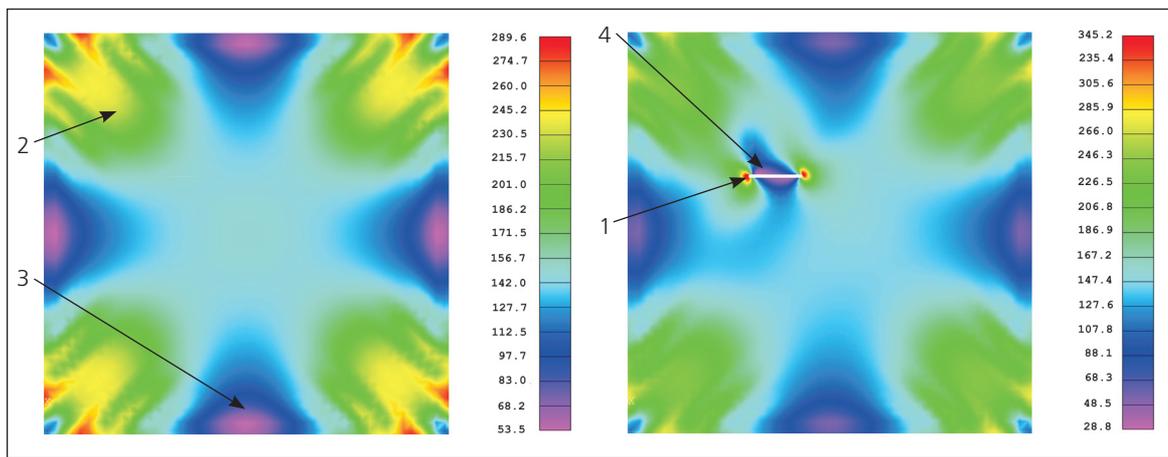


Рис. 4. Изополя приведенных напряжений, МПа до и после разреза

Анализируя расчётную схему мембранной оболочки с позиций системного анализа, ее можно рассматривать как две взаимозависимых системы: мембранное поле, и систему остальных поддерживающих его несущих элементов – опорный контур, колонны, связевые панели, обеспечивающие геометрическую неизменяемость всего сооружения в плане. Если вторая система представляет набор дискретных элементов, формирующих ее топологию, то первая – единый континуальный элемент, обладающий протяженностью в двух направлениях.

Для систем любого вида справедливо утверждение о том, что нарушение функционирования систем возможно при нарушении связности их структур. Система не может выполнять свои функции, когда не существует взаимодействия между всеми или, по крайней мере, жизненно важными (ключевыми) элементами. Для «дискретной» конструкции (системы) **комплексной «мерой живучести»** служит минимальное число элементов (реберная **связность**  $S_{el}$ ) или узлов (вершинная связность  $S_n$ ), выход из строя которых под влиянием внешних воздействий приводит к нарушению функционирования системы. Аварийным воздействием для анализа живучести дискретной системы является отказ колонны, опорного контура и т.д. При определении понятия связности континуальной системы нарушаются базовые положения теории систем (соотношение элемента и системы). Аварийным воздействием для континуальной системы является повреждение полотна мембраны, например образование отверстия или разреза.

Для реального сооружения, учитывая малую вероятность и небольшую продолжительность аварийной ситуации, а также ограниченные требования по продолжительности обеспечения несущей способности сооружения (только на время эвакуации людей), проверку на живучесть можно рекомендовать при действии нормативных значений постоянных нагрузок и длительных составляющих временных нагрузок ( $\gamma_{pi} = \gamma_{fi} = 1$ ). В качестве критерия надёжности для несущих элементов, выполненных из стали, можно принимать наибольшие допустимые пластические деформации на стадии разрушения материала, с коэффициентом запаса 0,8. Например, для стали класса С345 согласно ГОСТ 27772-88\* гарантируемая предельная деформация составляет 20%, что даёт допустимую величину  $\epsilon_{lim} = 0,8 \cdot 20 = 16\%$ .

Окончательно неравенство нового **предельного состояния**, может быть записано в следующем виде:

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

где  $\alpha_i$  – число влияния,

$R_u$  – расчетное сопротивление стали по временному сопротивлению,

$\gamma_n$  – коэффициент надёжности по ответственности,

$\gamma_c$  – коэффициент условий работ,

$\gamma_i$  – система коэффициентов надёжности.

Проверка на живучесть необходима для обеспечения несущей способности покрытия на время экстренной эвакуации людей при практически мгновенном разрушении элементов в произвольной точке. Это разрушение в данном случае и является особым воздействием. При внезапном обрыве элементов высвобождается значительная упругая энергия, вызывающая

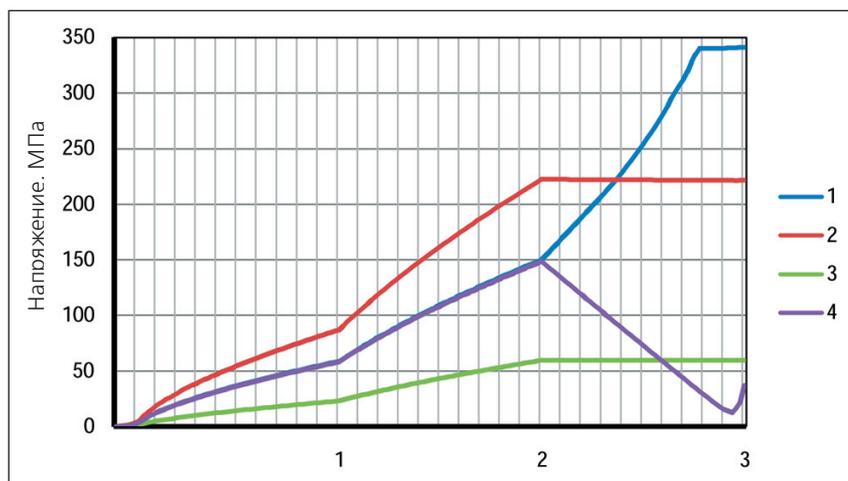


Рис. 5. Изменение приведенного напряжения (МПа) для различных точек мембраны, указанных на рис. 4 (на горизонтальной оси отложены стадии работы конструкции):

«0–1» – стадия нагружения собственным весом; «1–2» – стадия нагружения равномерной нагрузкой – 200 кг/м<sup>2</sup>, «2–3» – стадия «повреждения» в виде разреза

динамический всплеск усилий во всех элементах конструкции.

В расчеты закладывались следующие предпосылки: узловые соединения конструктивных элементов являются равнопрочными основным элементам; живучесть обеспечена, если первичные отказы элементов не приводят к разрушению других элементов конструкции, на которые перераспределяется нагрузка. Расчеты выполнялись при аксиоматичном принципе единичного отказа, заложенного в нормы проектирования сейсмостойких АЭС. В соответствии с этим принципом, система должна выполнять свои функции при любом исходном событии, и при независимом от исходного события отказе любого **одного** элемента этой системы. Это означает, что связность системы должна быть не менее 1.

В связи с «плохой сходимостью» расчетов, исследования на данном этапе выполнялись в статической постановке с учётом физической и геометрической нелинейности. Если элемент будет разрушаться, т.е. величина относительной пластической де-

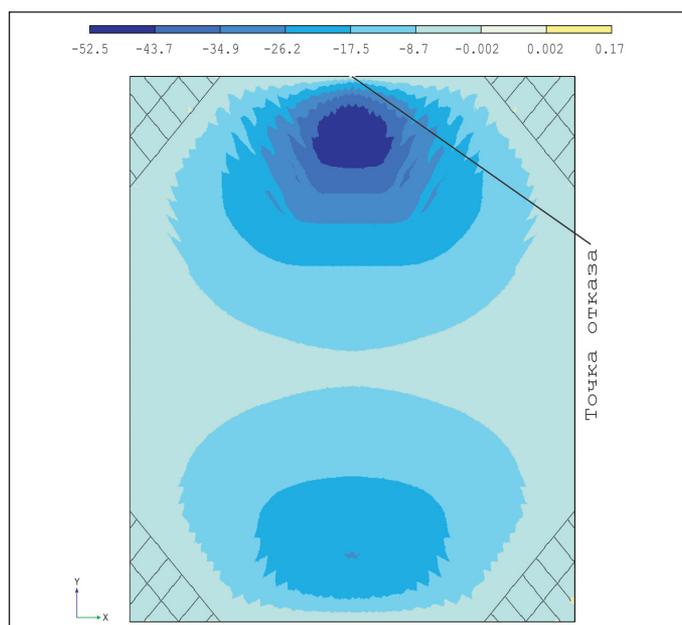


Рис. 6. Мозаика вертикальных перемещений (см) полотна мембраны после отказа элемента опорного контура

формации будет приближаться к установленному предельному значению, тогда будет отсутствовать сходимость итерационного процесса компьютерных вычислений.

Вначале выполнялась серия статических расчётов для указанной комбинации нагрузок с целью определения деформаций и внутренних усилий. Далее в расчётной схеме для моделирования аварийной ситуации удалялся выбранный конструктивный элемент (колонна, элемент опорного контура). К местам образовавшегося разрыва прикладывались внешние силы, равные внутренним усилиям в удаленном элементе (узлах) ( $M_i, N, Q_i, M_{кр}$ ) (см. рис. 2), с обратным знаком для восстановления статического равновесия. После этого выполнялись проверочные расчёты, чтобы убедиться в эквивалентности замены элемента соответствующими внешними силами. Для учета нелинейности внешние силы необходимо подчинить соответствующим нелинейным зависимостям.

В общем случае для учета эффекта динамики в расчётной программе необходимо создать функцию зависимости от времени (см. рис. 3) внешних сил ( $M_i, N, Q_i, M_{кр}$ ). Эта функция служит для моделирования во времени процесса отказа аварийного элемента. В идеале вид такой зависимости должен быть **различным для разных усилий**, и устанавливаться экспериментальным путём. На стадии рабочего проектирования можно принять линейное изменение функции от максимума до нуля в интервалах времени от 0,05 до 0,1 секунды. Другой возможный прием – обнуления во времени жесткости элемента(ов) за счет обнуления модуля упругости  $E$ .

Результаты расчетов при моделировании различных аварийных ситуаций – разрывов полотна мембраны (см. рис. 4–5), отверстий в полотне мембраны, отказа элементов

колонн и опорного контура (см. рис. 6) – позволяют сделать вывод о высокой живучести, и как следствие – безопасности данной конструктивной формы, а также предварительно заключить, что мембранное покрытие не является ключевым элементом.

В ближайшем будущем специалистами МГСУ и ЗАО «Курортпроект» планируется произвести расчёты для анализа НДС мембранных оболочек при различных отказах в динамической постановке, полученные данные сравнить с результатами расчетов в квазистатической постановке. Решение поставленных задач потребует использования возможностей программных комплексов самого высокого порядка, таких как Ls-Dyna, Ansys (опции – EKILL, ELIFE), MSC.Nastran (опция – Death Time DELAY) и др.

#### Библиографический список:

1. Кудишин Ю.И., Дробот Д.Ю. Экспериментально-научные исследования модели покрытия ледового дворца спорта на Ходынском поле в г. Москве // «Строительство – формирование среды жизнедеятельности». – М.: АСВ, с. 61–66.
2. ГОСТ 27751-88 «Надежность строительных конструкций и оснований».
3. Проект СНиП 20-01-2003 «Надежность строительных конструкций и оснований».
4. Перельмутер А.В. «Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций». – М.: АСВ, 2007.
5. Канчели Н.В., Батов П.А., Дробот Д.Ю. Опыт и перспективы проектирования мембранных оболочек на примере реализованных объектов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2008, №2. С. 72–74.

## 12<sup>я</sup> международная промышленно-технологическая выставка



Сантехника. Отопление.  
Кондиционирование.  
Инженерное оборудование

[www.shk.ru](http://www.shk.ru)  
тел.: (495) 256 73 95

МОСКВА

ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»

12 – 15 мая

2008



В сотрудничестве:

Организатор:

Генеральные информационные спонсоры:

При поддержке:



Стройка  
ГРУППА ГАЗЕТ

АВЕНТИЛЯЦИЯ  
ТОПЛЕНИЕ  
КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ

Официальный журнал выставки:

САНТЕХНИКА

