



ISSN 1814-5566 print

ISSN 1993-3517 online

МЕТАЛЕВИ КОНСТРУКЦІЇ
МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ
METAL CONSTRUCTIONS

№2, ТОМ 13 (2007) 131-141

УДК 624.014

(07)-0140-1

ПРО ЖИВУЧІСТЬ НЕСУЧИХ КОНСТРУКЦІЙ ПОКРИТТЯ ЛЬДОВОГО ПАЛАЦУ СПОРТУ НА ХОДИНСЬКОМУ ПОЛІ В М. МОСКВА

Ю.І. Кудишин, М.Я. Михальов

Московський державний будівельний університет,

Ярославське шосе, 26, 129337, Москва, Росія.

E-mail: unir@mgsu.ru

Отримана 20 квітня 2007; прийнята 18 червня 2007

Анотація. Розроблені методичні рекомендації з оцінки живучості несучих конструкцій унікальних споруд на прикладі покриття Льодового палацу спорту в м. Москва. Основу методики складає рішення динамічної задачі про поведінку конструкції при раптовій відмові її ключових елементів. Для отримання обґрунтованих передумов динамічних розрахунків виконане фізичне моделювання на моделі в масштабі 1:10. Виконаний динамічний розрахунок конструкції покриття Льодового палацу в різних експлуатаційних умовах, зокрема в стані, викликаному раптовим локальним руйнуванням опорного кільця, ниток і розкосів. Результати розрахунків порівняно з результатами динамічних випробувань моделі покриття. Високий рівень їх збігу в усьому діапазоні виконаних досліджень свідчить про перспективність запропонованої методики перевірки на живучість складних будівельних об'єктів в спорудах 1-го рівня відповідальності.

Ключові слова: живучість, динамічний розрахунок, фізичне моделювання, сталеві конструкції.

О ЖИВУЧЕСТИ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ПОКРЫТИЯ ЛЕДОВОГО ДВОРЦА СПОРТА НА ХОДЫНСКОМ ПОЛЕ В Г. МОСКВА

Ю.И. Кудишин, Н.Я. Михалев

Московский государственный строительный университет,

Ярославское шоссе, 26, 129337, Москва, Россия.

E-mail: unir@mgsu.ru

Получена 20 апреля 2007; принята 18 июня 2007

Аннотация. Разработаны методические рекомендации по оценке живучести несущих конструкций уникальных сооружений на примере покрытия Ледового дворца спорта в г. Москва. Основу методики составляет решение динамической задачи о поведении конструкции при внезапном отказе её ключевых элементов. Для получения обоснованных предпосылок динамических расчетов выполнено физическое моделирование на модели в масштабе 1:10. Выполнен динамический расчет конструкций покрытия Ледового дворца в различных эксплуатационных условиях, в том числе в состоянии, вызванном внезапным локальным разрушением опорного кольца, нитей и раскосов. Результаты расчетов сопоставлены с результатами динамических испытаний модели покрытия. Высокий уровень их совпадения во всем диапазоне выполненных исследований свидетельствуют о перспективности предложенной методики проверки на живучесть сложных строительных объектов в сооружениях 1-го уровня ответственности.

Ключевые слова: живучесть, динамический расчет, физическое моделирование, стальные конструкции.

ON SURVIVABILITY OF BEARING STRUCTURES OF THE ICE STADIUM IN HODYNSKOYE POLE, MOSCOW, RUSSIA

Yu.I. Kudishyn, N.Ya. Mikhalev

*Moscow State University of Civil Engineering,
26, Yaroslavskoye shosse, 129337, Moscow, Russia.
E-mail: unir@mgsu.ru*

Received 20 April 2007; accepted 18 June 2007

Abstract. Methodical recommendations for estimating a survivability of bearing structures were elaborated (the Ice Stadium in Moscow was taken as an example). The essential of the methods is to solve the dynamic equation on the behavior of a structure in case when its key elements suddenly fail. The initial parameters of a mathematical model were obtained by a physical modeling on a scale of one to ten. There was done a dynamic design of a roof structure of the Ice Stadium under different operating conditions including the state caused by a sudden local failure of a supporting ring, fibers and diagonal braces. The design results were compared with the results of dynamic tests of a roof model. Their good agreement in the range of the investigations done indicates perspectives of the suggested procedure of survivability test of complex building objects in the structures of the 1st level of responsibility.

Keywords: survivability, dynamic design, physical modeling, steel structures.

Введение. Постановка задачи

Живучесть – это способность конструкции обеспечивать своё функциональное назначение при отказе отдельных её элементов. Такое требование к несущим конструкциям при аварийных расчётных ситуациях установлено в ГОСТ 27751-88 “Надёжность строительных конструкций и оснований. Основные положения по расчёту”, п. 1.10.

Аварийные расчётные 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).

Ледовый дворец на Ходынском поле в г. Москве определён как уникальное сооружение особой ответственности, где могут одновременно находиться до 15 тысяч человек. Для такого сооружения необходимо рассмотреть аварий-

ную расчётную ситуацию, возникающую, например, в результате подрыва так называемых ключевых элементов, от которых зависит надёжность всего сооружения. В несущей конструкции данного покрытия ключевыми элементами являются наружное и внутреннее контурные кольца. Проверка на живучесть необходима для обеспечения несущей способности покрытия на время экстренной эвакуации людей при практически мгновенном локальном разрушении этих колец в произвольной точке, включая точки присоединения основных висячих нитей. Это разрушение в данном случае и является особым воздействием. При внезапном обрыве контурных колец высвобождается значительная упругая энергия, вызывающая динамический всплеск усилий во всех элементах конструкции.

Учитывая малую вероятность и небольшую продолжительность аварийной ситуации, а также ограниченные требования по продолжительности обеспечения несущей способности покрытия (только на время эвакуации людей), проверку можно осуществлять при нормативных значениях нагрузок и длительных составляющих временных нагрузок, а в качестве критерия

надёжности можно принять наибольшие допустимые пластические деформации на стадии разрушения материала.

Указанные особенности приводят к необходимости решения задачи в динамической постановке с учётом физической и геометрической нелинейности. Такие расчёты можно выполнить с помощью программных комплексов типа ANSYS, NASTRAN, ABACUS.

На кафедре металлических конструкций МГСУ разработаны методические рекомендации по проверке живучести несущих конструкций покрытия Ледового дворца спорта. Такая проверка предусматривает решение достаточно сложной динамической задачи о поведении конструкции при внезапном отказе ключевых элементов. При этом необходимо знать динамические параметры конструкции (например, коэффициент демпфирования), кинетику отказа элементов. Необходимо также убедиться в

корректности математической модели, чтобы гарантировать достоверность компьютерных расчётов. Все эти данные можно получить только путём физического эксперимента. Такой эксперимент на натурном объекте практически невозможен, так как речь идёт о повреждении конструкции в процессе исследования. С другой стороны, физическое моделирование динамического поведения конструкций, к сожалению, до настоящего времени не получило фундаментального решения.

В такой ситуации оптимальным представляется следующий путь. Экспериментальное исследование провести на крупноразмерной модели с параллельным уточнённым расчётом этой модели. Убедившись в корректности методики компьютерного расчёта, применить её для натурной конструкции.

При такой постановке задачи не требуется высокой строгости подобия модели оригиналу,

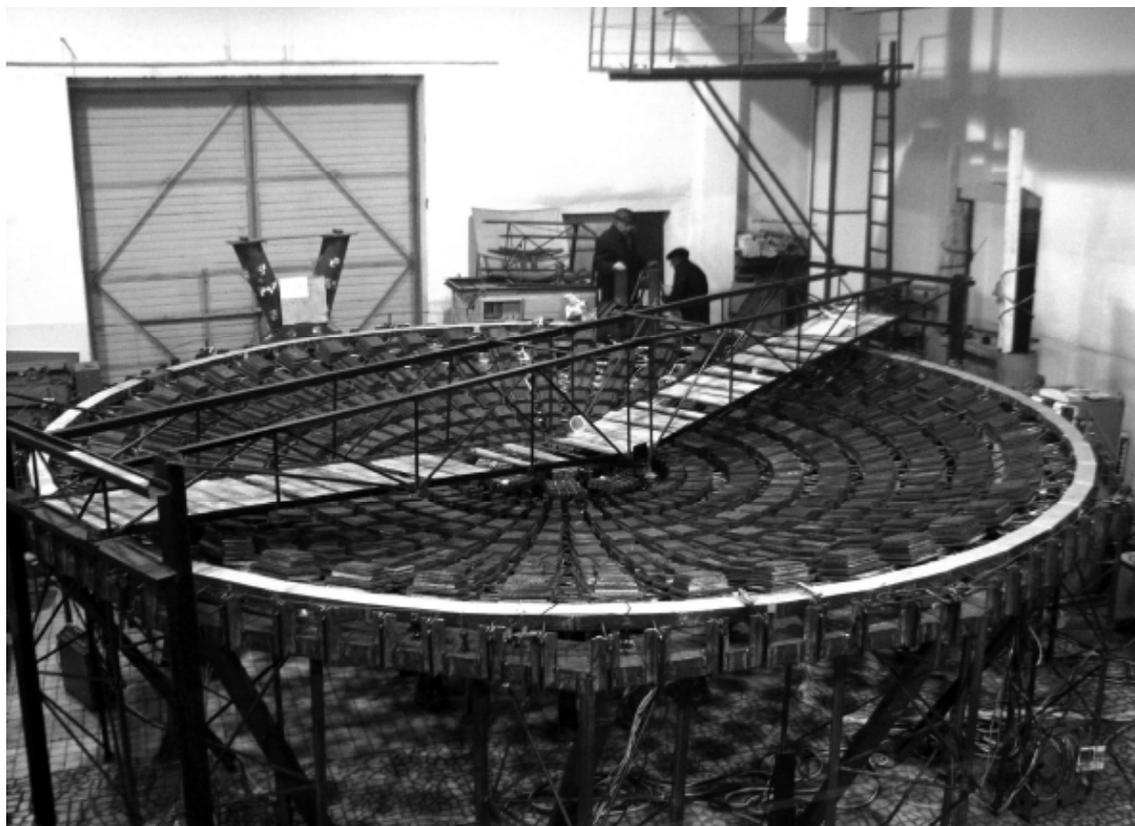


Рис. 1. Модель покрытия ЛДС в лаборатории ЦНИИС.

так как основным результатом экспериментального исследования в данном случае является подтверждение адекватности методики компьютерных расчётов.

При разработке физической модели были выполнены необходимые тестовые компьютерные исследования, позволившие выбрать оптимальные геометрические и физические параметры модели, спрогнозировать её динамическое поведение, определить оптимальный набор измерительного инструментария, разработать методику и программу экспериментального исследования.

В конечном итоге модель была изготовлена и испытана в лаборатории ОАО ЦНИИС Транспортного строительства.

Модель была выполнена из стали в масштабе 1:15 с учётом критериев подобия в статической постановке задачи (рис. 1). Диаметр модели по оси наружного кольца составил 7160 мм. Стрела провеса – 573 мм.

Подготовка экспериментальных исследований модели и сами исследования сопровождались компьютерными расчётами.

Обоснование и проверка методики динамических расчётов на живучесть натурной конструкции является одной из основных задач экспериментальных исследований на физической модели покрытия Ледового дворца.

Расчёты модели выполнялись с применением программного комплекса MSC Nastran for Windows 2004, реализующего алгоритм метода конечных элементов.

Расчётное сопровождение экспериментальных исследований

Задачи динамики в нашем случае сводятся к двум основным типам:

- анализ переходных процессов в конструкциях покрытия при внезапном отказе какого-либо элемента;
- исследование динамической реакции конструкции в форме амплитудно-частотных характеристик напряжённо-деформированного состояния на периодическое внешнее воздействие.

Уравнения динамики при малых смещениях точек конструкции имеют вид:

$$\{M\} \cdot \ddot{\{\lambda\}} + \{B\} \cdot \dot{\{\lambda\}} + \{K\} \cdot \{\lambda\} = \{F(t)\},$$

где $\{M\}$ – матрица масс конструкции; $\{B\}$ – матрица коэффициентов сил вязкого демпфирования; $\{K\}$ – матрица жёсткости; $\{F\}$ – вектор узловых сил в функции времени; $\{\lambda\}$ – вектор узловых смещений; точкой и двумя точками над λ обозначены первая и вторая её производные по времени соответственно.

Матрица жёсткости $\{K\}$ формируется так же, как в задачах статики. Матрица масс $\{M\}$ включает в себя:

- массы конечных элементов, обусловленные плотностью материала; этот способ использовался при задании собственного веса несущих конструкций модели;
- сосредоточенные массы, которые могут быть введены в модель специальными элементами типа Mass; этот способ применялся для задания дополнительного пригруза модели.

Матрица коэффициентов вязкого демпфирования $\{B\}$ учитывает рассеяние энергии в динамической системе. В нашем случае для этого использовался коэффициент конструкционного демпфирования G , который по физическому смыслу является коэффициентом неупругого сопротивления и связан с логарифмическим декрементом затухания s следующим соотношением:

$$G = \sigma/\pi.$$

При решении динамических задач с помощью указанной программы использовался метод прямого интегрирования вышеуказанного дифференциального уравнения в геометрически нелинейной постановке. В качестве начальных условий задавались перемещения всех узлов конечноэлементной модели, получаемые в результате статического расчёта модели при нагрузке соответствующего этапа исследования.

Геометрическая трёхмерная модель подготавливалась с помощью Автокада с последующим импортом в расчётную программу. Расчётная конечноэлементная модель представлена на рис. 2.

Для стержневых конструктивных элементов использовались трёхмерные конечные элементы стержневого типа “bar”. Для конечноэлементного моделирования пластин, расположенных у внутреннего кольца покрытия, использовались плоские конечные элементы оболочечного типа “plate”. Для моделирования страховочных устройств у наружного опорного кольца использовались конечные элементы с односторонними связями и зазором типа “gap”. Всего

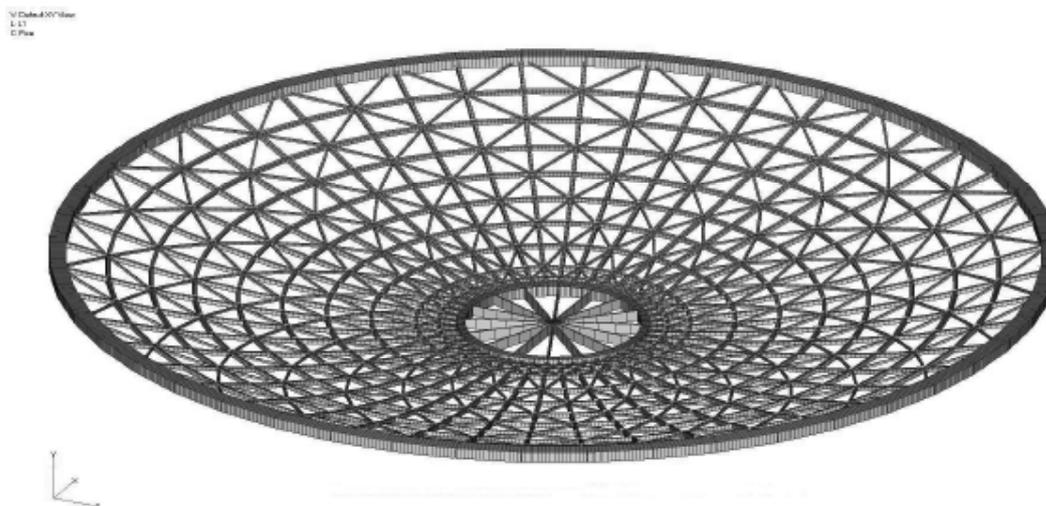


Рис. 2. Расчётная конечноэлементная схема модели покрытия ЛДС (12 812 конечных элементов, 11 025 узлов).

математическая модель состояла из 12 812 конечных элементов и 11025 узлов.

Собственный вес модели рассчитывается автоматически по заданным геометрическим и физическим характеристикам конструктивных элементов. Тестовые нагрузки, моделирующие собственный вес покрытия, снег, технологическую нагрузку, представлялись конечными элементами типа “Mass”, приложенными в местах крепления грузов на сетке модели покрытия. Они позволяют решать задачи динамики с учётом массы соответствующих грузов.

Математическая модель покрытия имеет 45 вертикальных шарнирно подвижных опор (в местах пересечения висячих нитей с наружным кольцом) и три шарнирные опоры (на “севере”, “востоке” и “западе”), имеющие свободу перемещений только в радиальном направлении. Именно такого рода закрепления реализованы в натурном покрытии Ледового дворца.

Моделирование отказа отдельных конструктивных элементов осуществлялось следующим образом. Вначале решается статическая задача для конструкции в исходном (неповреждённом) состоянии. Определяются усилия в элементах, которые надлежит удалить. Удаляются эти элементы из расчётной схемы и их действия заменяются соответствующими силами с обратным знаком для восстановления равновесия. Эти силы подчиняются соответствующей функциональной зависимости от времени. Эксперимен-

ты со взрывом показали, что время удаления конструктивных элементов составляет около 0.0045 сек. Это практически мгновенное разрушение. В расчётах принято линейное изменение сил от максимального значения до нуля в интервале 0.0045 сек. Затем решается динамическая задача при соответствующем изменении указанных сил. В результате получается полная информация об изменении напряжённо-деформированного состояния всех элементов конструкции во времени. Если при этом будет получено удовлетворительное совпадение расчётных и экспериментальных результатов, это будет означать подтверждение расчётной методики проверки на живучесть и её обоснование для применения к натурной конструкции.

В процессе изготовления физической модели выполнены необходимые тестовые статические и динамические расчёты, позволяющие оценить её напряжённо-деформированное состояние под равномерно распределённой нагрузкой различной интенсивности в номинальном и повреждённом состоянии. Так, например, при суммарной величине нагрузки около 4.5 т., моделирующей постоянную нагрузку на покрытие в натуре, наибольшие напряжения в элементах сетки достигают значения 308 кг/см² в номинальном состоянии и около 3400 кг/см² при выходе из работы одного из элементов наружного кольца. Наибольшие вертикальные перемещения модели при этой нагрузке не

превышают 1.4 мм., что свидетельствует о её высокой жёсткости. В повреждённом состоянии (разрыв наружного кольца) амплитуда наибольших перемещений достигает 9.4 мм. Перемещения концов разрыва наружного кольца составляют 3.1 и 3.7 мм. Первая собственная частота колебаний составляет 11.55 гц., что подтвердилось при динамическом испытании модели.

Реакция модели покрытия на удаление отдельных конструктивных элементов изучалась при разрыве наружного кольца и примыкающих к нему элементов (нитей и раскосов). На рис. 3 показаны номера и расположение участков, где производились взрывы для повреждения конструктивных элементов.

В точке 1 производился разрыв только наружного кольца, в точке 2 вместе с наружным кольцом производился разрыв несущей нити и двух примыкающих раскосов. В точке 3 осуществлялся разрыв кольца и примыкающей нити. На этой же схеме показаны места шарнирных закреплений модели в горизонтальной плоскости.

В настоящих исследованиях модель использовалась многократно. Чтобы облегчить восстановление модели после очередного взрыва, дополнительный пригруз выбирался с таким расчётом, чтобы в повреждённом состоянии в элементах конструкции не возникали значительные пластические деформации. Пригруз, удовлетворяющий такому условию, составил 3998 кг. С учётом собственного веса модели (891 кг) общая нагрузка на модель составила 4489 кг или около 4.5 т. Такой уровень загрузки модели соответствует собственному весу натурной несущей конструкции покрытия.

Наиболее стабильными и представительными динамическими характеристиками конструкции являются:

$$\sigma = \frac{2\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \cong 2\pi\xi - \text{логарифмический}$$

декремент затухания,

$G = \sigma/\pi \approx 2\xi$ – общий коэффициент конструкционного демпфирования.

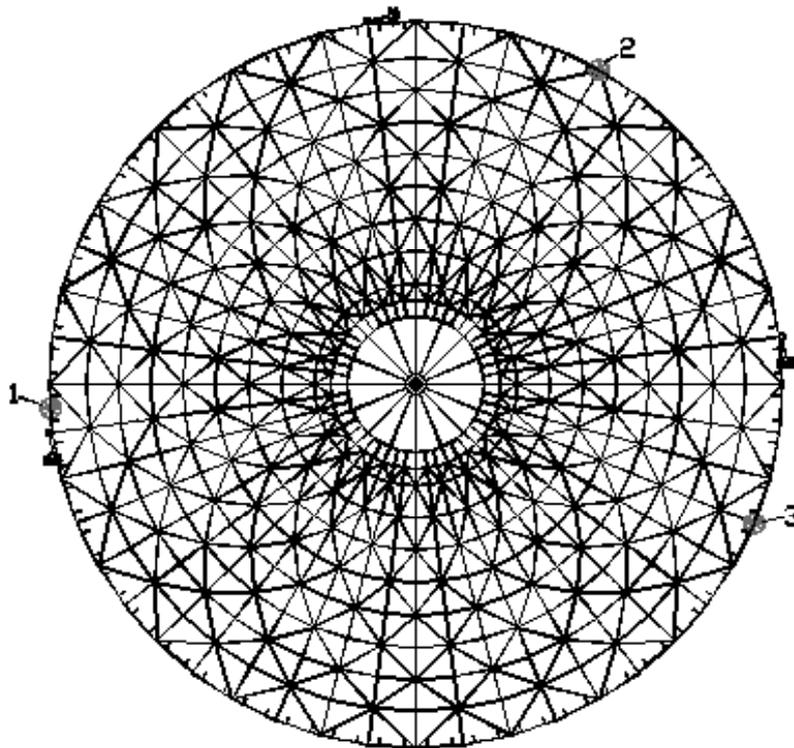


Рис. 3. Схема расположения и последовательность взрывов.

Знаки приближённого равенства здесь обоснованы тем, что $\xi \ll 1$.

f_i – частоты собственных колебаний ($Гц$),
 ξ – коэффициент демпфирования.

Результаты расчётов модели массой 4.5 тонны (модель не повреждённая)

Вначале выполнялся расчёт на собственные колебания модели и эти результаты сравнивались с экспериментальными данными вибродиагностики. Это сравнение приведено в таблице 1.

Здесь не указана вторая частота в эксперименте, так как в силу симметрии модели её значение при обработке опытных данных не является, оно близко к первой частоте.

Ниже приведены три первых формы собственных колебаний модели, полученные расчётным путём.

Результаты расчётов модели массой 4.5 тонны при подрыве наружного кольца в 1-ой точке

По результатам динамического расчёта были вычислены характеристики затухания колебаний после взрыва и совместно с экспериментальными данными представлены в таблице 2.

На рис. 7, 8 показано напряжённо-деформированное состояние модели при разрыве кольца, спустя 0,0575 сек. после взрыва.

После взрыва был выполнен расчёт повреждённой модели на собственные колебания. Эти данные совместно с результатами вибродиагностики приведены в табл. 3.

Ниже приведены три первых формы собственных колебаний модели, полученные расчётным путём.

Таблица 1.

Частоты собственных колебаний	f_1 (Гц)	f_2 (Гц)	f_3 (Гц)
Расчётные	11,55	11,6	12,25
Экспериментальные	11,3	—	12,25
Погрешность	2,2 %	—	0 %

Таблица 2.

Характеристики затухания колебаний	Частота затухающих колебаний (Гц)	Логарифмический декремент затухания γ	Коэффициент демпфирования σ	Коэффициент конструкционного демпфирования G
Расчётные	8,62	0,174	0,028	0,055
Экспериментальные	8,25	0,163	0,026	0,052
Погрешность	4,5 %	6,7 %	7,7 %	5,8 %

Таблица 3.

Частоты собственных колебаний	f_1 (Гц)	f_2 (Гц)	f_3 (Гц)
Расчётные	8,66	11,54	11,99
Экспериментальные	9,0	—	—
Погрешность	3,9 %	—	—

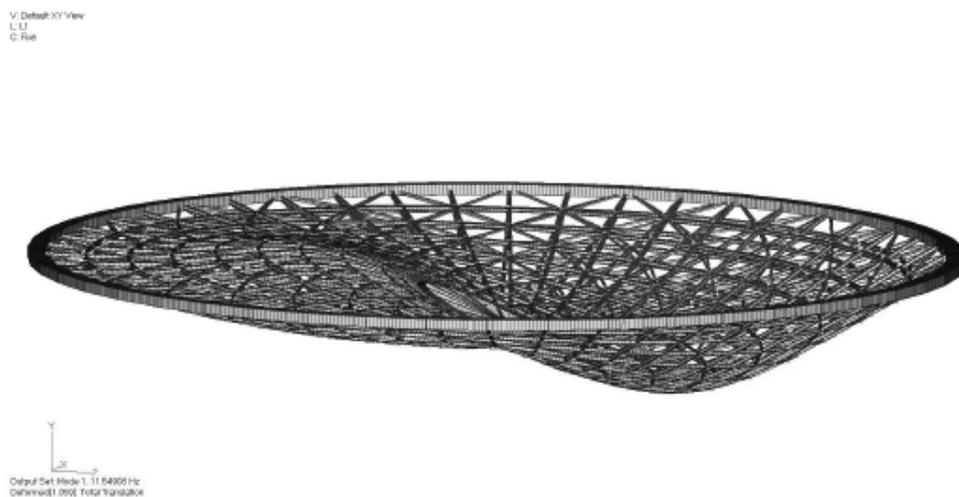


Рис. 4. Первая форма собственных колебаний с частотой 11,55 Гц.

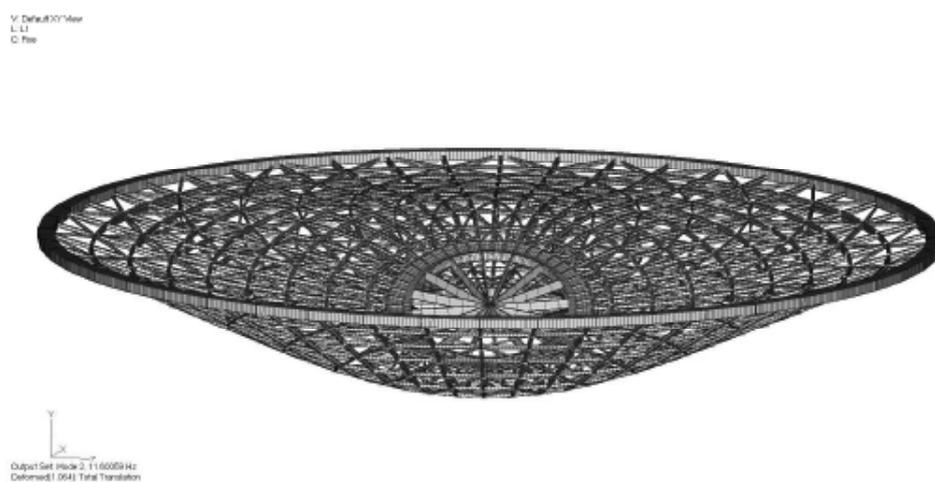


Рис. 5. Вторая форма собственных колебаний с частотой 11,6 Гц.

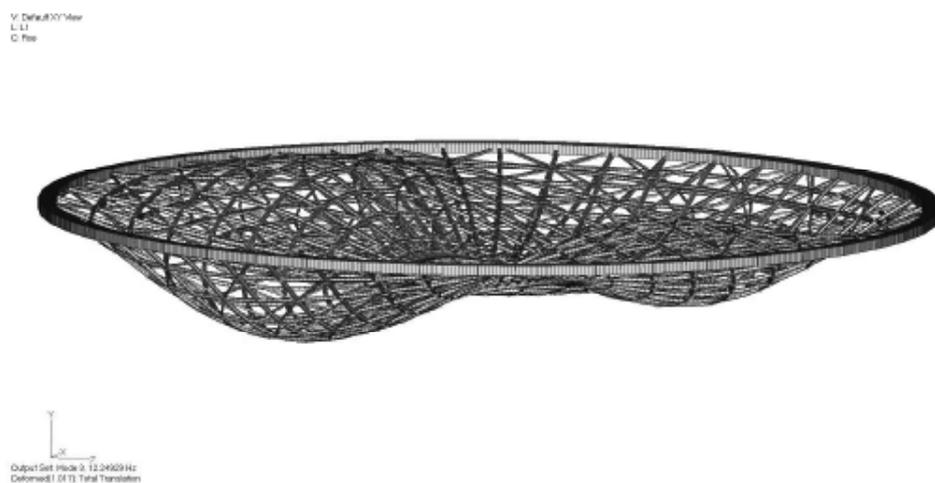


Рис. 6. Третья форма собственных колебаний с частотой 12,25 Гц.

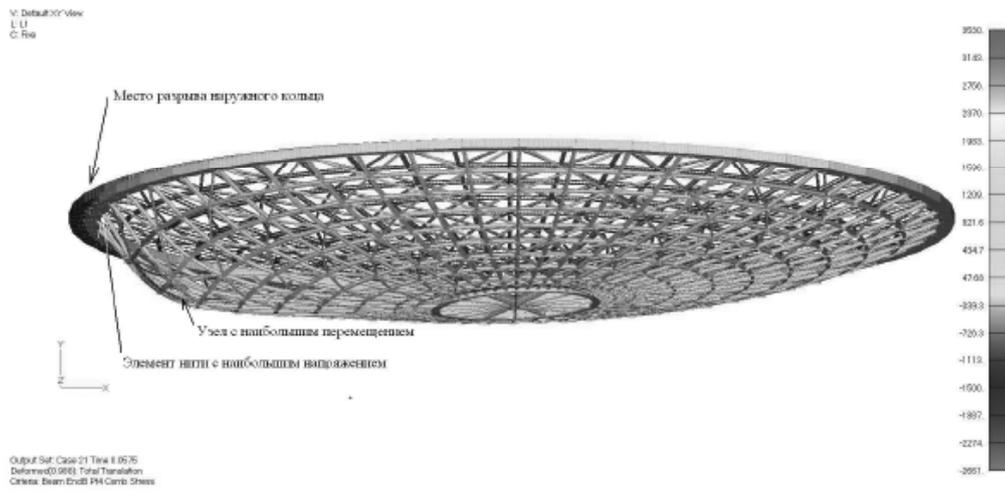


Рис. 7. Вид снизу на модель после разрыва наружного кольца.

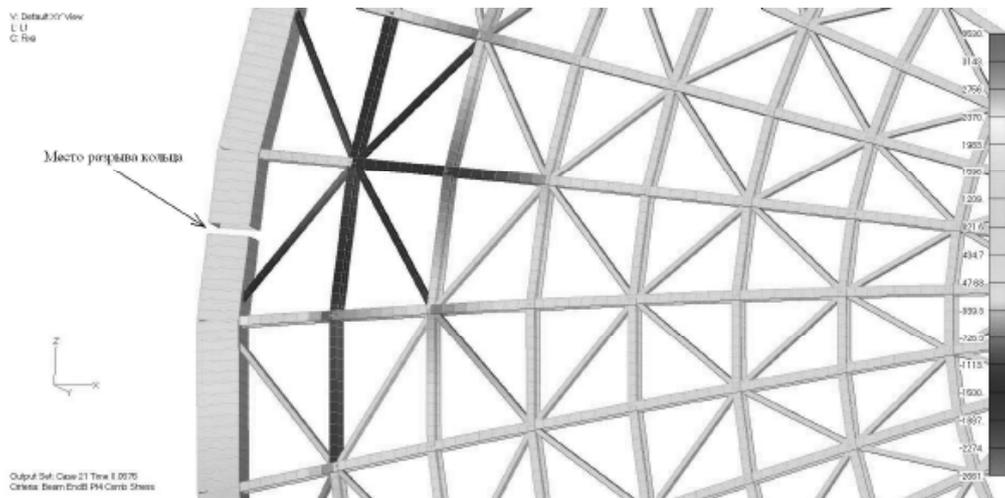


Рис. 8. Фрагмент модели с разорванным кольцом (вид сверху).

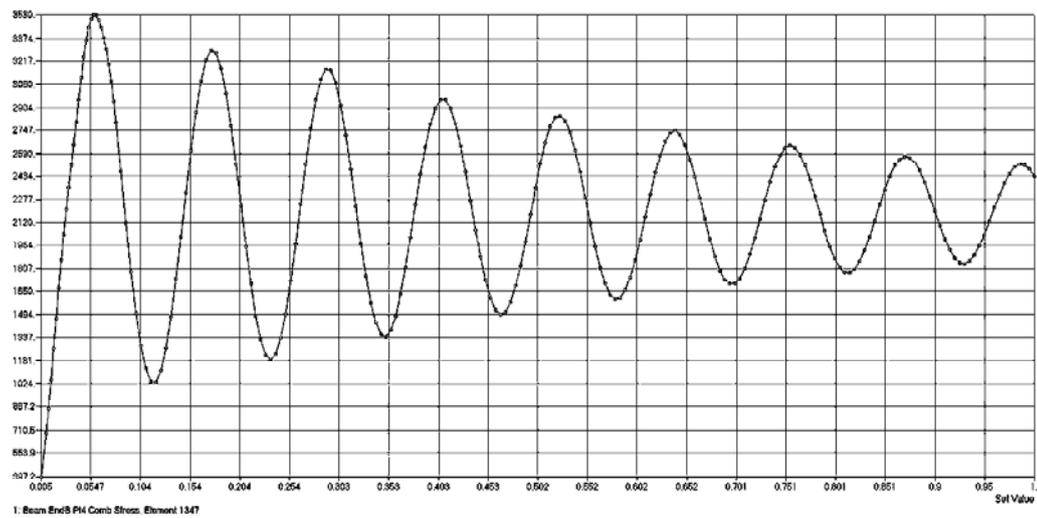


Рис. 9. Динамические колебания максимального напряжения в нити (по вертикальной оси отложены напряжения (кг/см²), по горизонтальной — время в сек).

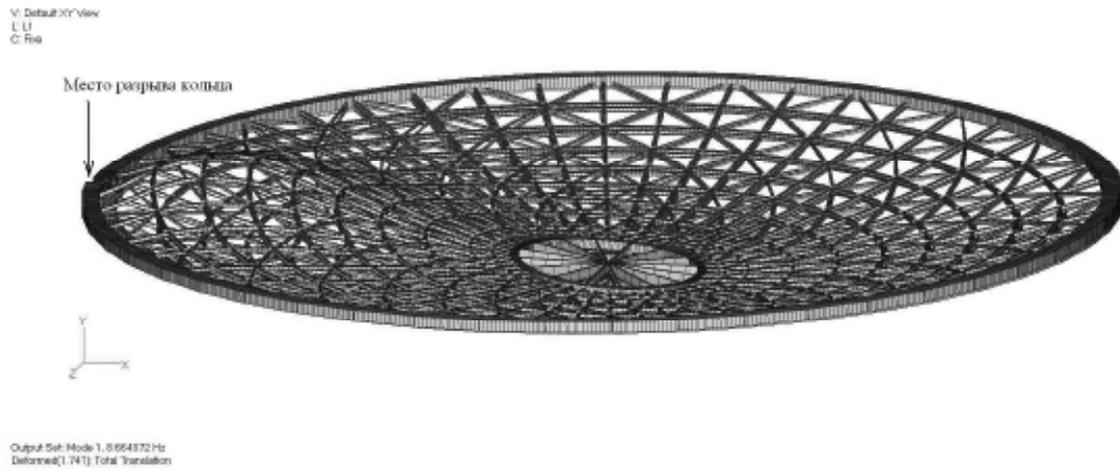


Рис. 10. Первая форма собственных колебаний повреждённой модели с частотой 8,66 Гц.

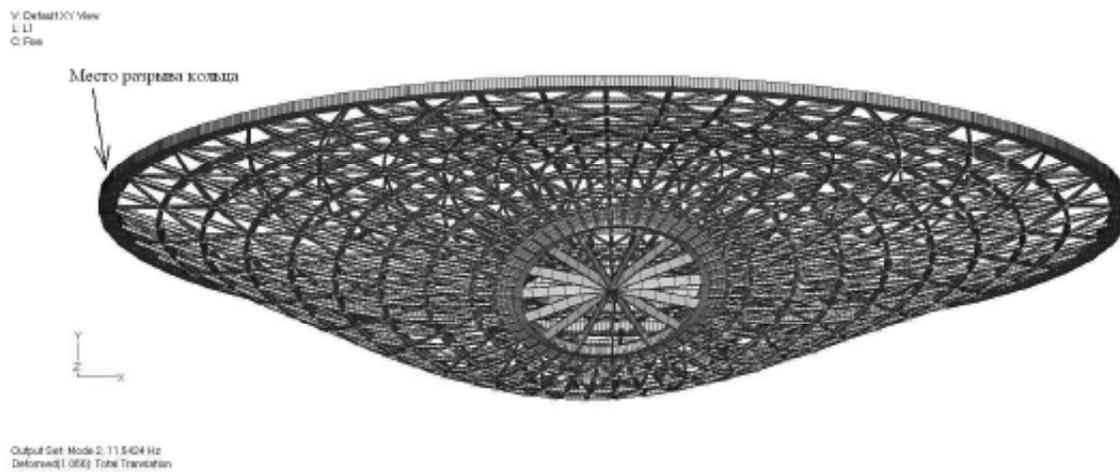


Рис. 11. Вторая форма собственных колебаний повреждённой модели с частотой 11,54 Гц.

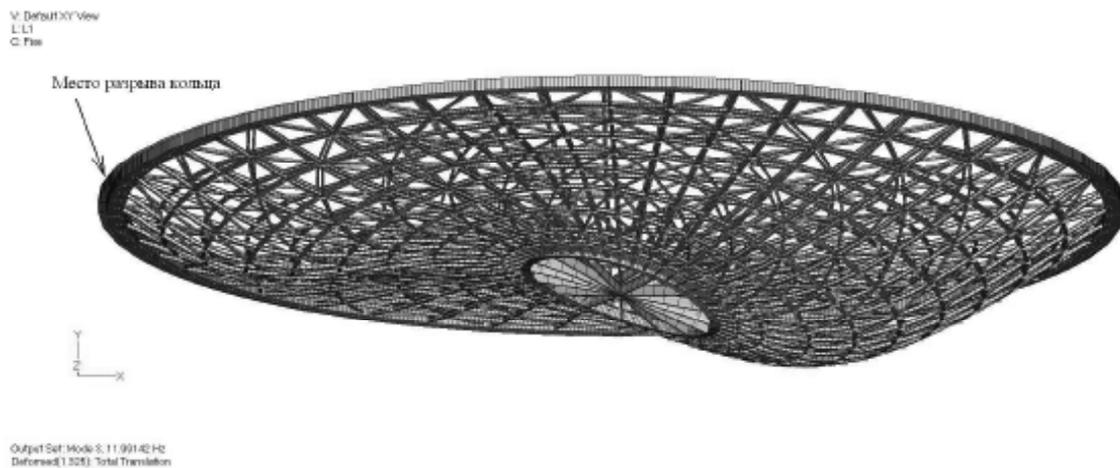


Рис. 12. Третья форма собственных колебаний повреждённой модели с частотой 11,99 Гц.

Выводы

Результаты динамических расчётов модели Ледового дворца спорта имеют хорошее совпадение с экспериментальными данными. Это обстоятельство подтверждает обоснованность принятой в работе методики проверки на живучесть сложных строительных конструкций, в частности, большепролётных стальных покрытий над гражданскими сооружениями 1-го уровня ответственности.

Литература

1. СНиП П-23.81*. Стальные конструкции. – М.: ФГУП ЦПП, 2005.
2. СНиП 2.01.07-85*. Нагрузки и воздействия / Госстрой России. – М.: ГУП ЦПП, 2003.
3. ГОСТ 27751-88. Надёжность строительных конструкций и оснований. Основные положения по расчёту.
4. Распоряжение Правительства Москвы от 9 августа 2005 г. № 1495-РП “О мерах по реализации распоряжения Правительства Москвы от 11 марта 2005 г. № 335-РП”.
5. Специальные технические условия на проектирование, строительство и эксплуатацию Ледового дворца спорта на Ходынском поле. Хорошевское шоссе, вл. 38, САО. (Без согласований и утверждения).
6. Комплект из 17 листов чертежей КМ стальных несущих конструкций покрытия Ледового дворца спорта на Ходынском поле. Том 2, Архитектурно-строительная часть. Книга 4. Конструктивная часть (металлические конструкции). Шифр проекта: 6-04/5378-П. ГУП МНИИП “Моспроект-4”, 2005 г.
7. Статические расчёты стальных несущих конструкций покрытия Ледового дворца спорта на Ходынском поле. Том 1 (107 стр.). Расчёты. Стадия: “Проект”. Шифр: ТС 07/04 КС-Р. ООО “ГК-Техстрой”. Москва 2005 г.
8. Научно-технический отчёт (17 стр.) ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко по договору № 619 от 20 декабря 2005 г. с ГУП МНИИП “Моспроект-4”. “Требования по назначению расчётных снеговых и ветровых нагрузок, действующих на конструкции Ледового дворца спорта и торгово-развлекательного комплекса (НОВКО) на Ходынском поле”. Утверждено: Директор ЦНИИСК им. Кучеренко (В.М. Горпинченко), 2005 г.

Кудишин Юрій Іванович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри металевих конструкцій Московського державного будівельного університету, лауреат премії Уряду Російської Федерації. Наукові інтереси: міцність і надійність будівельних металевих конструкцій.

Михальов Микола Якович – кандидат технічних наук, доцент кафедри металевих конструкцій Московського державного будівельного університету. Наукові інтереси: міцність і надійність будівельних металевих конструкцій.

Кудишин Юрий Иванович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой металлических конструкций Московского государственного строительного университета, лауреат премии Правительства Российской Федерации. Научные интересы: прочность и надёжность строительных металлических конструкций.

Михалев Николай Яковлевич – кандидат технических наук, доцент кафедры металлических конструкций Московского государственного строительного университета. Научные интересы: прочность и надёжность строительных металлических конструкций.

Kudishyn Yuriy Ivanovich is a Dr. Sc. (Eng), Head of the Metal Structures Department at Moscow State University of Civil Engineering. He is a Laureate of the Russian Federation Government Prize. His scientific interests are durability and reliability of building metal structures.

Mikhalev Nikolay Yakovlevich is a Ph.D. (Eng), an Associated Professor of the Metal Structures Department at Moscow State University of Civil Engineering. His scientific interests are durability and reliability of building metal structures.