

ОБСЛЕДОВАНИЕ И ДИНАМИЧЕСКАЯ ПАСПОРТИЗАЦИЯ СООРУЖЕНИЙ КАК ИНСТРУМЕНТ ПОИСКА ПОВРЕЖДЕНИЙ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

Кулябко В.В.

ГВУЗ «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры»

Чабан В.П.

ЧП НПП «Днепропетровский научно-исследовательский институт строительного производства»

Макаров А.В.

ООО Проектный институт "Днепропроектстальконструкция"
г. Днепропетровск, Украина

АНОТАЦІЯ: У роботі показано досвід вібродинамічного обстеження та випробувань складних будинків і споруд у частині використання динамічних характеристик (частоти і форми власних коливань) для прогнозу й пошуку місця можливого пошкодження конструкцій.

АННОТАЦИЯ: В работе показан опыт вибродинамического обследования и испытаний сложных зданий и сооружений в части использования динамических характеристик (частоты и формы собственных колебаний) для прогноза и поиска места возможного повреждения конструкций.

ABSTRACT: This paper shows experience in vibrodynamic examination and testing of complex buildings and structures in the use of the dynamic characteristics (frequency and form of natural vibrations) for the prediction and the search space of possible damage to structures

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сооружения, паспортизация, частоты и формы собственных колебаний, повреждения конструкций.

АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Весьма актуальной задачей XXI века, прежде всего, в Украине, остаётся оперативный поиск сильно поврежденных (предаварийных) элементов или частей в составе зданий и сооружений. Быстрое проведение по-

добных работ с применением современной специализированной (**виброизмерительной**) аппаратуры в предлагаемом **комплексном** варианте (*теоретические* исследования по расчетным программным комплексам и *натурные* обследования и динамические испытания) предупреждает возможные **аварии** и **обрушения** с моральным и материальным ущербом, ускоряет нахождение **слабых мест конструкций** и облегчает принятие квалифицированных решений по **усилению** или реконструкции сооружения.

Конечно, наиболее актуальна указанная проблема при «незапланированных» вредных воздействиях либо **природного** характера (землетрясения, цунами, торнадо, тайфун, шторм и т.п.), либо **антропогенного** характера (промышленная и городская **сейсмика**; обрушения конструкций из-за **неграмотной эксплуатации** или **консервации** сооружений; **военные** действия и **террористические** акты, **вандализм** и прочее - из-за неустойчивого развития общества в регионе).

Некоторый собственный опыт авторов по обследованию, нелинейным динамическим расчетам, в том числе - по динамической и сейсмодинамической паспортизации и мониторингу - был изложен в нескольких статьях на предыдущих конференциях Украины по сейсмостойкому строительству (1999-2012) и в различных зарубежных работах – начиная с последней четверти прошлого века.

Эта проблематика стала всё чаще появляться, например, в трудах флагмана украинских исследователей и конструкторов - НИИСКА (Ю.И. Немчинов, Н.Г. Марьенков, Ю.И. Калюх), на форумах расчетчиков всего СНГ (тут полвека флагманами являются коллективы ПК ЛИРА и А.С. Городецкий; SCAD и А.В. Перельмутер), а также в зарубежной литературе.

Задачи динамического обследования зданий и сооружений в настоящее время весьма **актуальны** и так же многообразны, как многообразны и современные высотные и большепролетные строительные объекты, и динамические воздействия. Например, авторы данной работы в статьях, докладах, десятке монографий и диссертаций предлагали **методы динамического: формообразования (МДФ), конструирования (МДК) и диагностики (МДД)** зданий и сооружений.

В них были последовательно показаны отличительные особенности динамического **обследования и испытаний** разнообразных конструкций: и проектируемых, и эксплуатируемых одноэтажных и многоэтажных зданий, высотных и большепролетных сооружений (башен, труб, мостов). А основное внимание уделялось созданию корректных **нелинейных** (поэтому «статико-динамических») расчетных моделей взаимодействия сооружений с основанием, с носителями подвижных (транспортных, сейсмических, ветровых и др.) динамических нагрузок. Это подразумевало состав-

ление пространственных **моделей**, развитие динамической **паспортизации** и **мониторинга** технического состояния конструкций.

Много исследований проводится на эту тему также в известной школе Г.Н. Бугаевского, см., например, диссертацию двухлетней давности Литвиновой Э.В. «Динамическое обследование зданий и сооружений». Хотя эта работа и сконцентрирована только на проблеме сейсмостойкого строительства, но инженеры всего мира проводят динамические обследования сооружений часто и с иными целями. Например, - для анализа **виброэкологического** (*физиологического и психологического*) комфорта помещений - допустимости уровней колебаний (*скоростей и ускорений*) по санитарным нормам, в этих случаях создается виброэкологический **паспорт**. Или - для оценки и подбора параметров **виброизоляции источника** или **виброзащиты приемника** колебаний; для соблюдения требований к вибрации элементов устанавливаемого *оборудования*, вибро-условий *технологии* и др. По-видимому, в настоящее время необходима разработка (после обсуждения практики и опыта) **нормативов** по созданию **паспортов** различных видов и формы: *динамический, сейсמודинамический, виброэкологический, вибротехнологический и т.п.*

ОСОБЕННОСТИ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ СПОСОБОВ ПОИСКА ПОВРЕЖДЕНИЙ КАРКАСНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Одной из наиболее распространенных конструкций является стальная однопролетная шарнирно-опертая балка, нагруженная равномерно распределенной нагрузкой и работающей на изгиб. Такие конструктивные элементы могут использоваться в пространственных каркасных зданиях, эстакадах, галереях, этажерках и пр.

При этом достаточно распространенным повреждением является локальное уменьшение сечения балок – например, за счет вырезов (для пропуска технологических коммуникаций) или за счет коррозионных повреждений.

В качестве примера принята балка пролетом 6,0 м, поперечное сечение – двутавр №24, однопролетная, шарнирно-опертая, нагруженная распределенной погонной нагрузкой 10 кН/м (что весьма близко к несущей способности). На данной балке в модель внесено локальное (длиной 300 мм) уменьшение сечения – отсутствие нижней полки двутавра и стенки на высоту 120 мм. При этом данное повреждение было локализовано: в 1/4 пролета балки, в 1/3 пролета балки, в центре пролета. В табл. 1 приведены сопоставительные величины первых пяти собственных частот балки (в таблице номера формы соответствуют количеству полуволн в форме колебаний балки).

Таблица 1

Собственные частоты балки - без повреждений и с повреждениями

№ формы	Балка без повреждений	Повреждение в 1/4 пролета	Повреждение в 1/3 пролета	Повреждение в 1/2 пролета
1	3,65 Гц	2,80 Гц	2,48 Гц	2,28 Гц
2	14,71 Гц	10,53 Гц	11,63 Гц	14,71 Гц
3	33,33 Гц	28,57 Гц	32,26 Гц	25,64 Гц
4	58,82 Гц	55,56 Гц	50,0 Гц	58,82 Гц
5	91,74 Гц	83,33 Гц	80,65 Гц	76,92 Гц

Наличие подобных повреждений не только снижает собственные частоты (до 40% – табл. 1), но и нарушает форму колебаний – что видно из соотношения значений частот. Например, известно, что соотношения величин собственных частот для неповрежденной балки должны составлять $f_2/f_1=4, f_3/f_1=9, f_4/f_1=16, f_5/f_1=25$. Соотношения составляют:

- балка с повреждением в 1/4 пролета - $f_2/f_1=3,76, f_3/f_1=10,2, f_4/f_1=19,84, f_5/f_1=29,76$;
- балка с повреждением в 1/3 пролета - $f_2/f_1=4,69, f_3/f_1=13,0, f_4/f_1=20,16, f_5/f_1=32,52$;
- балка с повреждением в 1/2 пролета - $f_2/f_1=6,45, f_3/f_1=11,24, f_4/f_1=25,8, f_5/f_1=33,74$.

Поэтому, сопоставляя значения величин спектра собственных частот (а также их соотношений), можно не только определить наличие повреждения, но и точно локализовать его местоположение – что очень важно для диагностики балок, недоступных для визуального осмотра.

Рассмотрим анализ частот каркасных сооружений – для поперечной рамы стального каркаса многоэтажного многопролетного производственного здания (общая ширина здания 72,5 м, наибольшая высота 46,5 м).

В высотной части узлы опирания ригелей перекрытий на колонны выполнены рамные. Особенностью технологического процесса является использование аммиака и сброс отработанной технологической жидкости (с аммиаком) на пол в высотной части – т.е. повышенная агрессивность среды в уровнях обреза фундаментов.

Для данного каркаса анализировались 40 собственных частот и форм колебаний. Четыре первых в спектре форм приведены на рис. 1.

По результатам обследования данного здания наиболее распространенными повреждениями стали коррозионные повреждения колонн в нижней части (с потерей сечения до 40%), а также обрывы сварных швов планок крепления полок ригелей к колоннам (за счет чего рамный узел крепления ригеля к колонне становится шарнирным).

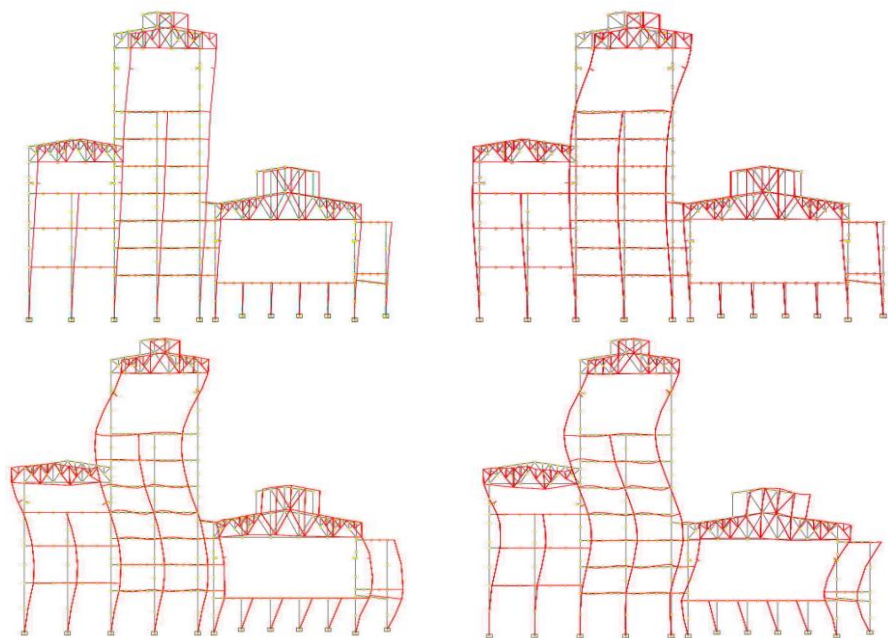


Рис. 1. Низшие формы колебаний поперечной рамы каркаса

В табл. 2 приведены сопоставительные величины некоторых собственных частот рамы (при этом обрывы сварных швов были внесены в расчетную схему в нескольких уровнях перекрытий).

Таблица 2

Собственные частоты поперечной рамы каркаса

№ форм в спектре	Рама без поврежде- ний	Коррозионные повреждения колонн (потеря 40%)	Обрывы сварных швов планок крепления ригелей к колоннам
1	0,51 Гц	0,49 Гц	0,44 Гц
2	0,97 Гц	0,96 Гц	0,87 Гц
3	1,90 Гц	1,86 Гц	1,87 Гц
4	2,64 Гц	2,63 Гц	2,59 Гц
8	4,26 Гц	4,22 Гц	4,0 Гц
18	6,06 Гц	6,06 Гц	5,88 Гц
22	6,90 Гц	6,90 Гц	6,47 Гц

Таким образом, можно оценить степень влияния различных видов повреждений на частоты, а также оценить местоположение повреждения (за счет его попадания в узел колебаний по той или иной форме).

Целенаправленная **активная** вибродиагностика при помощи возбудителя переменной частоты покажет различие форм и *наведёт* на дефект. **Пассивная** вибродиагностика в таких случаях потребует использования возмущающих спектров разнообразных составов и самую современную цифровую обработку сигналов.

ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ СТАЛЬНОЙ МОСТОВОЙ КРАН-ПЕРЕГРУЖАТЕЛЬ С ОДНОЙ ПЛОСКОСТЬЮ СИММЕТРИИ

Инженеру-практику при обследовании металлоконструкций мостового перегружателя длиной порядка до 150 м и высотой до 35 м (рис. 2) надо визуально осмотреть в первую очередь основные несущие элементы сооружения массой порядка 800 т. Эта огромная работа обычно ещё усложняется кратчайшими сроками её выполнения. В данной статье делается попытка облегчения такого поиска путем применения интегральной динамической диагностики всего объекта – здесь предлагается идея составления как бы Атласа (альбома) динамических паспортов перегружателя с повреждениями, которые искусственно наносятся для теоретического прогнозирования последствий (в первую очередь частот и форм собственных колебаний).

Вычислим динамические характеристики металлоконструкций пространственной модели, например, решетчатого перегружателя, с использованием МКЭ, программно-вычислительного комплекса «Selen» [1].



Рис. 2. Мостовой перегружатель решетчатой конструкции с гибкой и жесткой опорами

Проведем расчет собственных колебаний перегружателя при условиях, что грейферная тележка стоит в середине пролета, а обе опоры крана закреплены. Заметим что более подробные динамические исследования данного крана приведены в работе [2].

Например, на рис. 3 в правой колонке представлены две формы кра-на без повреждения, а в левой – с повреждением. Здесь представлен случай разрушения элемента верхнего пояса у гибкой опоры перегружателя. Сравним рисунки 3,а и 3,б. Отсутствие разрушенного элемента привело к новым горизонтально-поперечным перемещениям моста на 0,95 относительных единиц (за единицу примем наибольшее перемещение в этой форме рис. 3,а по горизонтально-продольному направлению в вертикальной плоскости перегружателя). Такого перемещения не было ранее, на рис. 3,б; здесь наибольшее перемещение на **единицу** было по всем сечениям моста в горизонтальном направлении; закручивания рам моста относительно его продольной оси также не было. Аналогично в этой форме появилось и новое заметное закручивание среднего сечения основного пролета моста.

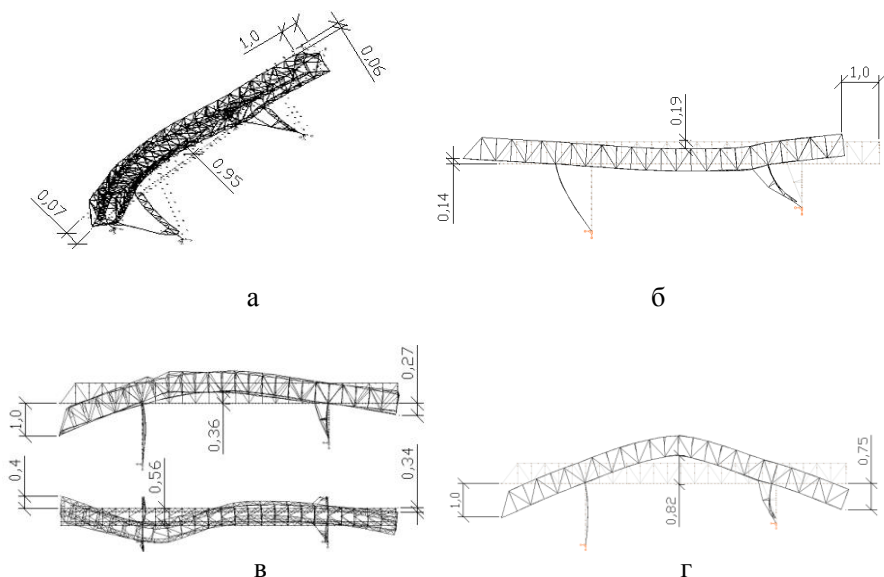


Рис. 3. Формы собственных колебаний перегружателя в двух состояниях: а – низшая форма собственных колебаний на частоте 0,61 Гц с разрушенным элементом верхнего пояса у гибкой опоры; б – низшая форма собственных колебаний (горизонтально-продольных в вертикальной плоскости крана) на частоте 0,61 Гц неповрежденного состояния; в – пятая форма собственных колебаний на частоте 1,43 Гц с разрушенным элементом; г - 1,72 Гц изгибные вертикальные колебания моста неповрежденного состояния

Кроме того, при таком дефекте понизилась частота 3-й формы с 0,83 Гц до 0,72 Гц (горизонтальные колебания консоли) и 5-й – в вертикальной плоскости (рис. 3,г): с 1,72 Гц до 1,43 Гц (с резким добавлением местного изгиба в горизонтальной плоскости в зоне нанесения дефекта, рис. 3,в).

В данной работе для решетчатого перегружателя выполнялись обширные натурные динамические испытания на вынужденные и свободные испытания. А затем, теоретическим путем, устранялись поочередно некоторые характерные стержневые несущие элементы. В итоге составлялся комплексный динамический паспорт, теоретическая часть которого дана на рис. 4. Удобство такого приёма позволяет сравнивать (в форме паспорта) два состояния конструкции: без нанесения повреждения (работоспособное состояние) и повреждённое.

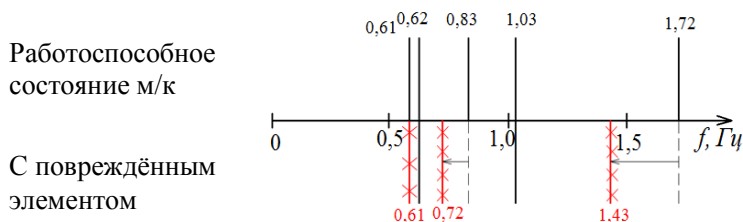


Рис. 4. Динамический частотный паспорт перегружателя

На основании практической статистики дефектов и повреждений создаётся набор всевозможных аварийных ситуаций для каждого типа перегружателя. После проведения массовых теоретических расчётов таких ситуаций можно составить Атлас повреждений несущих стальных конструкций. Это позволит проводить быстрый анализ при обнаружении в эксперименте изменения частот и форм собственных колебаний с последующим определением мест и возможной причины повреждений основных несущих металлоконструкций.

ВЫВОДЫ

К разработке и обсуждению нормативов, инженерных пособий и новых форм документов, конечно, надо **системно** и без авралов **привлекать** все ветви «украинской школы динамики и сейсмики зданий и сооружений»: ученых и проектировщиков.

Например, отдельные нормативы уже предполагают определение (и фиксацию, например, в паспортах технического состояния сооружений

[3]) величин собственных частот – для проведения мониторинга технического состояния.

А ведь ещё далеки от совершенства многие вопросы по динамическим **обследованиям**, по обновлению и улучшению **нормативов**. В том числе по разнообразным динамическим **нагрузкам**; по расчетам и испытаниям с применением адекватных **нелинейных** динамических моделей (ошибочные конструкторские решения при отсутствии **грамотного модального анализа** даже в линейной постановке приводят к авариям и жертвам, см. обрушение покрытия аквапарка в Ясенево); по практическому **конструированию** с научным сопровождением «новаций» - от **предпроектной** стадии и опытной проверки на экспериментальных **полигонах** - до полного завершения эксплуатации и реконструкции; по анализу возможных **ошибок** и применению динамических характеристик разных подсистем, **демпфирующих** устройств, гасителей колебаний и т.п.

ЛИТЕРАТУРА

1. Универсальный программный комплекс для расчета и проектирования строительных конструкций Selena [электронный ресурс]. - Режим доступа : <http://selenasys.com>.
2. Макаров А.В. Динамічна діагностика несних конструкцій грейферного мостового перевантажувача - шлях до запобігання аварій / А. В. Макаров // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. - 2015. - № 1. - С. 51-59. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/j-pdf/Vpabia_2015_1_8.pdf.
3. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния: ГОСТ 31937-2011. [Действует с 2014-01-01]. – М.: Стандартинформ, 2014. – IV, 89 с.

REFERENCES

1. Universal software complex for calculation and projecting of building constructions Selela. - Access mode : <http://selenasys.com>.
2. Makarov A.V. Dynamic diagnostics of bearing construction of wide span gantry – the way to prevent the accidents / A.V. Makarov // Bulletin of Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture. – 2015. - №1. – P. 51-59. - Access mode: http://nbuv.gov.ua/j-pdf/Vpabia_2015_1_8.pdf.
3. Building and construction. Rules of inspections and monitoring of the technical condition: GOST 31937-2011. –M.: Standartinform, 2014. – IV, 89 p.

Статья поступила в редакцию 05.08.2015 г.