

При исследовании работы сжатого опорного раскоса фрагмента I для всех стержней, за исключением стержня теряющего устойчивость, установлена линейная зависимость между продольными усилиями, возникающими в стержнях, и испытательной нагрузкой, прикладываемой к нагружаемому узлам. В стержне, теряющем устойчивость, ближе к моменту наступления его предельного состояния эта зависимость нарушается. Существование линейных зависимостей, указывает на то, что в течение всего времени нагружения расчетная схема конструкции не изменяется.

Как отмечено в [1], узловая податливость влияет только на деформативность конструкций. При испытаниях фрагментов наблюдали превышение экспериментальных прогибов над их значениями определенными численно. При этом увеличение прогибов на начальных этапах нагружения происходило непропорционально росту испытательной нагрузки. Линейная зависимость установилась при значении узловой нагрузки составляющей 25-35% от предельной и сохранялась вплоть до потери устойчивости сжатого стержня. Деформативность пространственной конструкции в данном случае характеризуется особенностью работы узлового элемента на начальных этапах его нагружения.

Заключение. Проверку устойчивости упругих стержней, а также стержней, теряющих устойчивость в области упругопластических деформаций, вполне оправданно проводить в предположении шарнирного закрепления стержней в узлах. Такое допущение ни в коей мере не снижает надежности конструкции. Более того, сравнивая расчетную гибкость и гибкости, полученные для упругих стержней в результате обработки экспериментальных данных, важно отметить незначительную разницу в их значениях, что указывает на высокую экономическую эффективность конструкций системы «БрГТУ».

Список цитированных источников

1. Драган, В.И. Особенности работы структурных металлических конструкций системы «БрГТУ» / В.И. Драган, В.В. Люстибер // Вестник Брест. гос. тех. ун-та. Строительство и архитектура. – 2008. – № 1(49). – С. 80–86.
2. ГОСТ 10006-80 Трубы металлические. Метод испытаний на растяжение – М.: ИПК Издательство стандартов. – 1998. – 8 с.
3. ГОСТ 1497-84 Металлы. Методы испытаний на растяжение – М.: ИПК Издательство стандартов. – 1986. – 25 с.
4. СНиП II-23-81*. Стальные конструкции / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990. – 96 с.
5. Пособие по проектированию стальных конструкций (к СНиП II-23-81* «Стальные конструкции») ЦНИИСК им. Кучеренко Госстроя СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 148 с.

УДК [69.008.6:692.426]:534.1

КОНТРОЛЬ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ БОЛЬШЕПРОЛЕТНОГО СООРУЖЕНИЯ ЛЕТНЕГО АМФИТЕАТРА В Г. ВИТЕБСКЕ ПУТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ ИХ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Мигель А.В.

Введение. Изменение собственной частоты колебания элемента конструкции, в зависимости от внутреннего осевого усилия, положено в основу проведения комплексных мероприятий по мониторингу технического состояния Летнего амфитеатра в г. Витебске, применительно к структурной системе УО «БрГТУ». В ходе проведенного этапа мониторинга было проанализировано свыше 150 элементов нижней поясной сетки и раскосов в опорных частях сооружения.

Из теории колебаний [1] известно о взаимосвязи собственной частоты колебаний от приложенного продольного усилия (сжимающего или растягивающего). Эта зависимость имеет следующий вид:

- для растянутых элементов

$$\omega_i = \frac{i^2 \cdot \pi^2 \cdot a}{l^2} \sqrt{1 + \frac{S \cdot l^2}{i^2 \cdot EI \cdot \pi^2}}, \quad (1)$$

- для сжатых элементов

$$\omega_i = \frac{i^2 \cdot \pi^2 \cdot a}{l^2} \sqrt{1 - \frac{S \cdot l^2}{i^2 \cdot EI \cdot \pi^2}}, \quad (2)$$

где $i=1,2,3,\dots$ - номер формы колебания;

a коэффициент вычисляемый по формуле:

$$a = \sqrt{\frac{EI}{\rho \cdot F}}, \quad (3)$$

l – длина элемента;

EI – жесткость элемента;

ρ – плотность материала элемента;

F – площадь поперечного сечения;

S – осевое усилие.

Из этой зависимости видно, что приложение растягивающего усилия вызывает увеличение значения собственной частоты, а сжимающего снижение. Однако расчетная зависимость применима только для свободного опертого стержня конечной жесткости (идеальный шарнир). В случае структурной конструкции «БрГТУ» данная зависимость будет давать погрешности вследствие следующих основных факторов:

1. Отсутствие идеального шарнирного закрепления стержней в узловых элементах конструкций с точки зрения свободы колебательных движений.

2. Возможность перемещения узловых элементов структурной конструкции и как следствие упругая податливость закрепления.

Полученные расхождения собственных частот колебаний с использованием зависимости теории колебаний и лабораторными испытаниями составляют 20-25 %.

1. Методика определения собственной частоты колебания стержней конструкции.

Для определения собственной частоты колебаний использовалась компьютерная измерительная система анализа характеристик вибрации ВИКМА-1 (рис. 1).

Структурная схема прибора включает в себя следующие основные модули: модуль измерения вибрации МИВ, модуль управления, синхронизации и интерфейса МУСИ, модуль питания и развязки МПР.

Принцип действия устройства следующий: при возбуждении поперечных колебаний в образце модуль измерения вибраций МИВ передает сигнал на модуль управления, синхронизации и интерфейса МУСИ в течение заданного промежутка времени. ЭВМ считывает данные и по окончании измерения строит график колебательного движения, где по оси абсцисс откладывается время измерения, а по оси ординат виброускорение (см рис. 2, 3). Далее программными средствами производится анализ полученных данных (графика колебательного движения), например, построение спектра частот.

Исходя из вышесказанного, предложена методика по определению осевого усилия в элементе:

1. Вибрационный датчик ВД с магнитом крепится к элементу конструкции в средней части по длине.

2. На ЭВМ запускается процесс считывания результатов (порядка 20-25с), одновременно производится возбуждение поперечных колебаний путем удара по элементу конструкции в направлении, параллельном расположению датчика на расстоянии 20-30 см от него.

3. По истечению времени считывания результатов, программным средством, поставляемым с устройством, строится график колебательного процесса.

4. На основе полученного графика колебательного движения строится спектр частот, по которому определяется собственная частота колебаний элемента конструкции.

5. Исходя из ранее полученных зависимостей (торировочных графиков или теоретических формул) определяется осевое усилие в элементе конструкции.

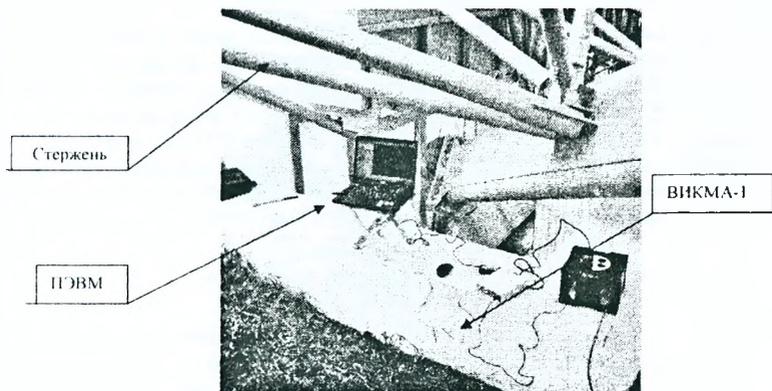


Рисунок 1 – Измерение собственной частоты колебания стержня структурной оболочки Летнего амфитеатра в г. Витебске

2. Построение торировочных зависимостей усилий в стержне от частоты собственных колебаний.

Как отмечалось ранее, о не применимости теоретических зависимостей для оценки осевого усилия по собственной частоте колебаний, были построены торировочные графики и получены зависимости в лабораторных условиях.

Торировочные графики строились для стержней С3 ($l=2610$ мм), С4 ($l=2679$ мм) соответствующих нижним поясам структуры и стержня С5 ($l=2958$ мм), соответствующего раскосам структурной оболочки. Испытательный стенд представляет собой двутавровую балку, в которой в области между стенкой и полкой устанавливается испытуемый стержень с узлами структуры по краям, с целью имитации работы узлового соединения.

Раскрепление узлов осуществлялось путем закрепления болтовых соединений в поперечном направлении испытуемого стержня к стенке испытательного стенда и имитировало работу испытуемых стержней в составе конструкции покрытия. Нагружение стержней проводилось с шагом 50 кН. Усилие контролировалось динамометром с параллельно подсоединенным домкратом.

Измерения собственных частот колебания, на примере стержня С3, при контролируемой нагрузке приведены на рис. 2–4. Результаты измерения представляются собой график колебательного процесса, где по оси абсцисс откладывается время измерения, а по оси ординат виброускорение (см. рис. 2, 3) и спектр частот, где по оси абсцисс откладывается частота, а по оси ординат виброускорение (см. рис. 4).

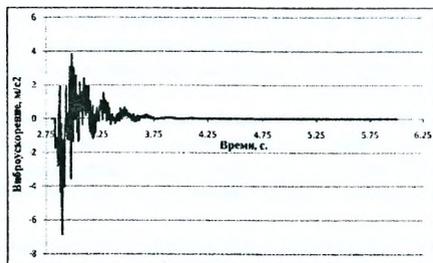


Рисунок 2 – График колебательного движения стержня С3 при нагрузке 300 кН

На графике колебательного движения (см. рис. 2) четко выражена зона импульсного возмущения (удара) – от 2.85с., в момент удара, до 4с., где колебательный процесс уже больше представляет собой синусоиду. Для анализа данный отрезок времени не представляет интереса, так как основное возмущение в этой зоне вызвано ударом. Преобладающая частота этого отрезка 0,71 Гц (приблизительная частота удара), и выявить собственную частоту колебания стержня очень сложно, вследствие высокого значения виброускорения от импульсного возмущения. Собственная частота колебаний стержня находится в зоне 40-50 Гц.

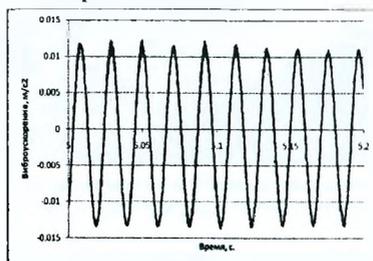


Рисунок 3 – График колебательного движения: зона периодических колебаний

Начиная где-то с 5с, график колебательного движения уже представляет собой ярко выраженную зону затухающих синусоидальных колебаний (см. рис.3), но имеет место и некоторое наложение колебаний, связанное с недостаточной плавностью кривой. Этот отрезок времени представляет практический интерес и при построении спектра позволяет определить собственную частоту колебаний. Согласно построенного спектра частот (см. рис.4) для стержня С3 при нагрузке растяжения 300 кН – собственная частота равна 47,7433 Гц.

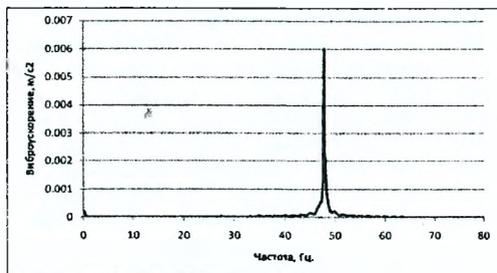


Рисунок 4 – Спектр частот стержня С3 при нагрузке 300 кН

В ходе спектрального анализа, на примере стержня СЗ, были получены значения собственных частот колебаний при фиксированном значении осевого усилия. Полученные значения собственных частот представлены на рис.4 в виде графика, где посредством линейной аппроксимации получена зависимость «усилие-частота».

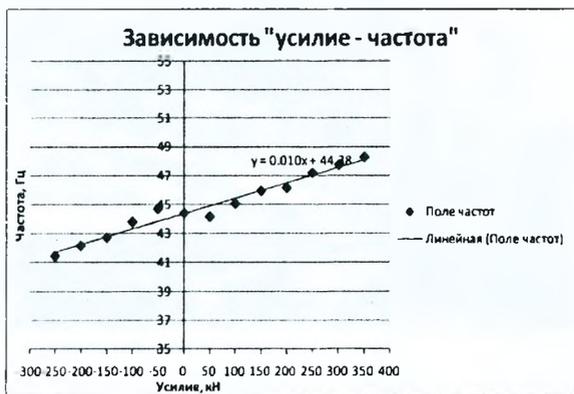


Рисунок 5 – Гаришочная зависимость осевого усилия от собственной частоты колебания элемента СЗ ($l=2610$ мм)

3. Оценка усилий в элементах структурной оболочки.

Металлическое покрытие Летнего амфитеатра в г. Витебске (рис. 6) представляет собой комбинированную систему, состоящую из усечённой двумя наклонными плоскостями пространственной стержневой цилиндрической оболочки регулярной структуры и подкрепляющих её 9-ти вертикальных арок (пять нижних и четыре верхних), двух наклонных арок, а также двух решетчатых колонн из круглых труб, расположенных за трибунами. Пролёт нижних вертикальных арок составляет 120,014 м, длина покрытия по середине составляет 71,0 м, высота подъёма осей нижних вертикальных арок от точки входа в фундамент – 18,5 м, высота покрытия по осям арок – 3,32 м. ОпираНИЕ пространственной конструкции на фундамент происходит через вертикальные и наклонные арки и решетчатые колонны. Вертикальные арки выполнены в виде пучков, состоящих из трех криволинейных труб $\varnothing 273 \times 10$, объединенных между собой в местах примыкания структуры планками и диафрагмами. Таким образом, средняя часть покрытия представляет собой комбинированную решетчатую пространственную арку. Функции решетки арки выполняет решетка структурной оболочки. Наклонные подкрепляющие арки выполнены с поясами из спаренных криволинейных труб $\varnothing 273 \times 10$, соединенных планками с диафрагмами, и решеткой из круглых труб. Пространственная жесткость покрытия обеспечивается защемлением арок в фундаментах, установкой наклонных арок и колонн, совместной работой стержневой оболочки и всех арок покрытия.

Главная роль для решения всех функций, возложенных на покрытие, отводится структурной оболочке системы «БрГТУ». Её высота – 2,51 м, размер ячеек верхней поясной сетки – 3,0 x 3,0 м, нижней поясной стери – 3,0 x 2,931 м.

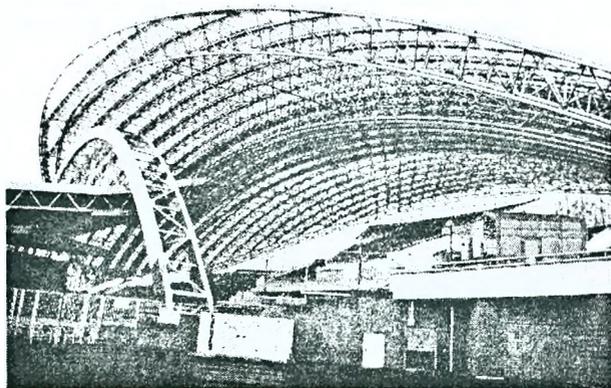


Рисунок 6 – Металлическое покрытие Летнего амфитеатра в г. Витебске

Для сравнительного анализа, полученных в ходе мониторинга данных, использовалась конечно-элементная модель покрытия (рис. 7), которая позволила учесть особенности действительной работы большепролетной конструкции. Элементы вертикальных и наклонных арок, стержни структурной оболочки описаны пространственными стержневыми элементами. В расчетную модель включены фундаменты под арки. Деформации оснований фундаментов задавались жесткостью свай, взятых по результатам испытаний. Фундаменты сооружения моделировались с помощью пластин, имеющих достаточно большую жесткость.

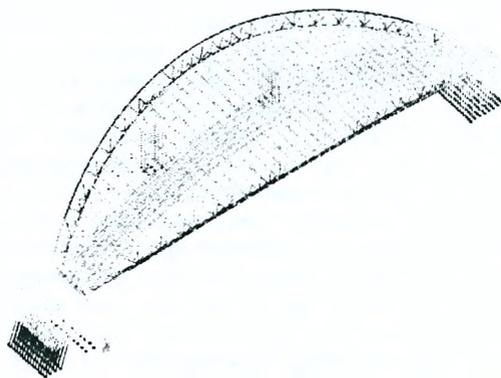


Рисунок 7 – Конечно-элементная модель металлического покрытия

Выполнены расчеты напряженно-деформированного состояния конструкций покрытия на внешние воздействия, действующие в период проведения мониторинга (октябрь 2008 г.).

Оценка усилий в элементах структурной оболочки производилась согласно разработанной методики с использованием полученных торировочных зависи-

мостей «усилие-частота» для стержней нижней поясной сетки С3 ($l=2610$ мм), С4 ($l=2679$ мм) и раскосов С5 ($l=2958$ мм) [2]. Точность определения частоты собственных колебаний составляет 0.17 Гц. В табл. 1 приведены значений усилий в анализируемых элементах, полученных согласно расчетной модели и предлагаемой методики.

Таблица 1 – Усилия в элементах структурной оболочки

Элемент	Собственная частота колебаний, Гц	Усилия в элементе, кН	
		Согласно предлагаемой методике	Согласно расчетной модели
С4	44.1670	-21.3	-49.2
С4	43.9882	-39.18	-41.9
С4	43.8094	-57.06	-45
С3	44.5247	14.47	16.5
С3	44.7035	32.35	29.4
С4	43.8094	-57.06	-65.06
С4	44.3459	-3.41	-35.06
С3	43.9882	-39.18	-36.2
С5	33.9746	-6.36	-20.8
С5	34.3323	17.49	25
С5	34.1535	5.57	30.3
С5	34.5111	29.41	23.2
С5	34.2429	15	11.53
С5	33.9746	-6.36	-42.8
С5	34.8687	53.25	30.2
С5	33.8552	-14.32	-21.1
С5	34.7793	47.29	35.7

Оценка несущей способности элементов структурной оболочки, по предлагаемой методике, выполнена по коэффициентам использования сечения: для растянутых элементов – по прочности, для сжатых элементов – по устойчивости. Анализ полученных результатов показал, что коэффициенты использования сечения для растянутых элементов находятся в интервале 0.009 – 0.258, для сжатых 0.008 – 0.338.

Вывод. Подтверждена качественная и количественная зависимость осевого усилия в стержневом элементе конструкции от собственной частоты колебаний.

1. Разработана методика определения собственной частоты колебания элемента конструкции в натуральных условиях.

2. Конструкция испытательного стенда позволила приблизить условия закрепления испытываемого стержневого элемента к фактическим, открытыми остались вопросы влияния соседних стержней и подкрепляющих элементов сооружения. И если последний не оказывает существенного влияния, то влияние соседних стержней предполагается оценить посредством испытания фрагмента структурной конструкции с контролем осевого усилия в испытываемом образце.

3. Построены торировочные зависимости «усилие-частота» для стержней поясной сетки и раскосов.

4. Произведена оценка несущей способности элементов структурной оболочки, посредством определения фактических значений осевого усилия.

5. Выявлена качественная и количественная сходимость полученных значений усилий по предлагаемой методике и расчетной модели.

Список цитированных источников

1. Тимошенко, С.П., Янг, Д.Х., Уивер, У. Колебания в инженерном деле / Пер. с англ. Л.Г. Корнейчука, под ред. Э.И. Григolloка. – Москва: Машиностроение, – 1985. – 472 с.

2. Мониторинг за поведением металлических конструкций покрытия Летнего амфитеатра «Славянский базар» в г. Витебске при их эксплуатации: отчет о НИР / Брестский государственный технический университет; рук. темы В.И. Драган. – Брест, 2008. – 154 с. – № 08/72

УДК 624.014.27(476.7)

МЕТОДИКА РАСЧЕТА БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫХ КОМБИНИРОВАННЫХ СТРУКТУРНЫХ ПОКРЫТИЙ С ПОДАТЛИВЫМИ УГЛОВЫМИ СОЕДИНЕНИЯМИ

Шурин А.Б.

Введение. Комбинированное структурное покрытие универсального спортивного комплекса «Виктория» разработано на кафедре строительных конструкций УО «БрГТУ» в 2004 году, и представляет собой квадратную в плане структурную плиту, состоящую из двух складок $66 \times 66 \times 93$ м, соединенных в коньке, и создающие два ската с уклонами в 15° .

В средней части структурная плита поддерживается двумя металлическими арками пролетом $80,62$ м. По контуру она опирается на четыре диафрагмы жесткости и сталежелезобетонные колонны, установленные с шагом 6 м. Конструкция покрытия более подробно описана в [1, 2].

Учет податливости болтовых соединений структурной конструкции. Существенным недостатком некоторых применяемых узловых соединений структурных конструкций является их повышенная податливость, приводящая к искажению напряженно-деформированного состояния и дополнительным прогибам. В соответствии с этим, узловые элементы структурных конструкций можно классифицировать по степени их локальной податливости на две группы. К первой группе можно отнести узловые элементы, локальной податливостью которых при расчетах можно пренебречь. Это узлы, выполненные на монтажной сварке, и узлы системы «Меро», «Веймар», «МАрХИ», «БрГТУ». Вторая группа – это, как правило, узловые элементы на пространственных листовых фасонках с болтовыми соединениями, работающими на срез и смятие (рисунок 1). Структурные конструкции с такими соединениями легко собираются и имеют менее жесткие допуски на изготовление.

Общим недостатком таких узлов является податливость соединения, возникающая из-за разности диаметра отверстия в фасонке и диаметра болта, в результате в конструкции появляются дополнительные прогибы. Часть стержней структурной конструкции вступает в работу только после выбора зазоров в соединении. Все это приводит к перераспределению усилий, и действительная картина становится отличной от ожидаемой.