

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВНУТРЕННИХ УСИЛИЙ В ЭЛЕМЕНТАХ СТРУКТУРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ СИСТЕМЫ «БрГТУ» ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЯ ВИБРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТЕРЖНЕЙ

А. В. Драган¹, В. В. Люстибер²

¹ К. т. н., доцент, зав. каф. архитектуры Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь, alexdragan@yandex.ru

² Ст. преп. кафедры строительных конструкций Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь

Реферат

В статье представлена методика определения внутренних продольных усилий в стержневых элементах структурных конструкций системы «БрГТУ». Представленная методика базируется на зависимости внутреннего усилия в элементе от частоты его собственных поперечных колебаний. В статье описаны оборудование и порядок проведения измерений виброспектральных характеристик, а также представлены результаты, полученные на этапе мониторинга технического состояния структурного покрытия Летнего амфитеатра в г. Витебске, произведенного в мае 2019 года.

Ключевые слова: структурная конструкция системы «БрГТУ», мониторинг, собственная частота поперечных колебаний, продольные усилия.

DETERMINATION OF INTERNAL EFFORTS IN ELEMENTS OF SPACE GRID STRUCTURES «BrGTU» SYSTEM BY MEANS OF MEASURING VIBRATION CHARACTERISTICS

A. V. Drahan, V. V. Lyustiber

Abstract

The article presents the methods for determining the internal efforts in the elements of the space grid structures of the «BrGTU» system. The presented method is based on the dependence of the internal effort in the element on the frequency of its own transverse vibrations. The article uses the equipment and the procedure for measuring vibration characteristics, and also presents the results of measurements at the stage of monitoring the technical condition of space grid structural in Vitebsk, which were made in May 2019.

Keywords: the space grid structure of the «BrGTU» system, monitoring, frequency of its own transverse vibrations, internal efforts.

Введение

Металлическая структурная системы «БрГТУ» получила большое распространение в покрытиях зданий спортивного, зрелищного и торгового назначения. В период с 2006 по 2019 год структурная система «БрГТУ» была использована при проектировании свыше 30 объектов. Ведущее место среди возведенных сооружений занимает большепролетное покрытие Летнего амфитеатра в г. Витебске. Этот объект по критерию технической сложности относится к категории уникальных большепролетных сооружений.

С конструктивной точки зрения покрытие представляет собой комбинированную стержневую систему, состоящую из структурной цилиндрической оболочки, усеченной двумя наклонными плоскостями, и подкрепляющих её девяти вертикальных (пять нижних и четыре верхних) и двух наклонных арок. Пролет покрытия составляет 120,014 м, ширина покрытия переменная и изменяется от 24,0 м на опорах до 71,0 м в средней части покрытия. Высота подъема структурной оболочки составляет 18,5 м, высота структурной конструкции 2,51 м [1] (рисунок 1).

Главная роль для создания архитектурной привлекательности и конструктивной целесообразности сооружения отводится структурной оболочке системы «БрГТУ». Радиус нижней поясной сетки оболочки по центрам узлов $R_{низ}=106.975$ м, радиус верхней поясной сетки по центрам узлов $R_{верх}=109.485$ м, высота сечения оболочки – 2,51 м, размер ячеек верхней поясной сетки – 3,0 х 3,0 м, нижней поясной сетки – 3,0 х 2,931 м.

Структурная оболочка выполняет несколько функций:

- воспринимает внешние нагрузки по всей площади покрытия и передает опорные реакции на колонны, вертикальные и наклонные арки;
- обеспечивает совместную работу колонн, вертикальных и наклонных арок;
- выполняет функцию решетки пространственной арки, образующей нижними и верхними вертикальными арками и частью оболочки, расположенной между ними;

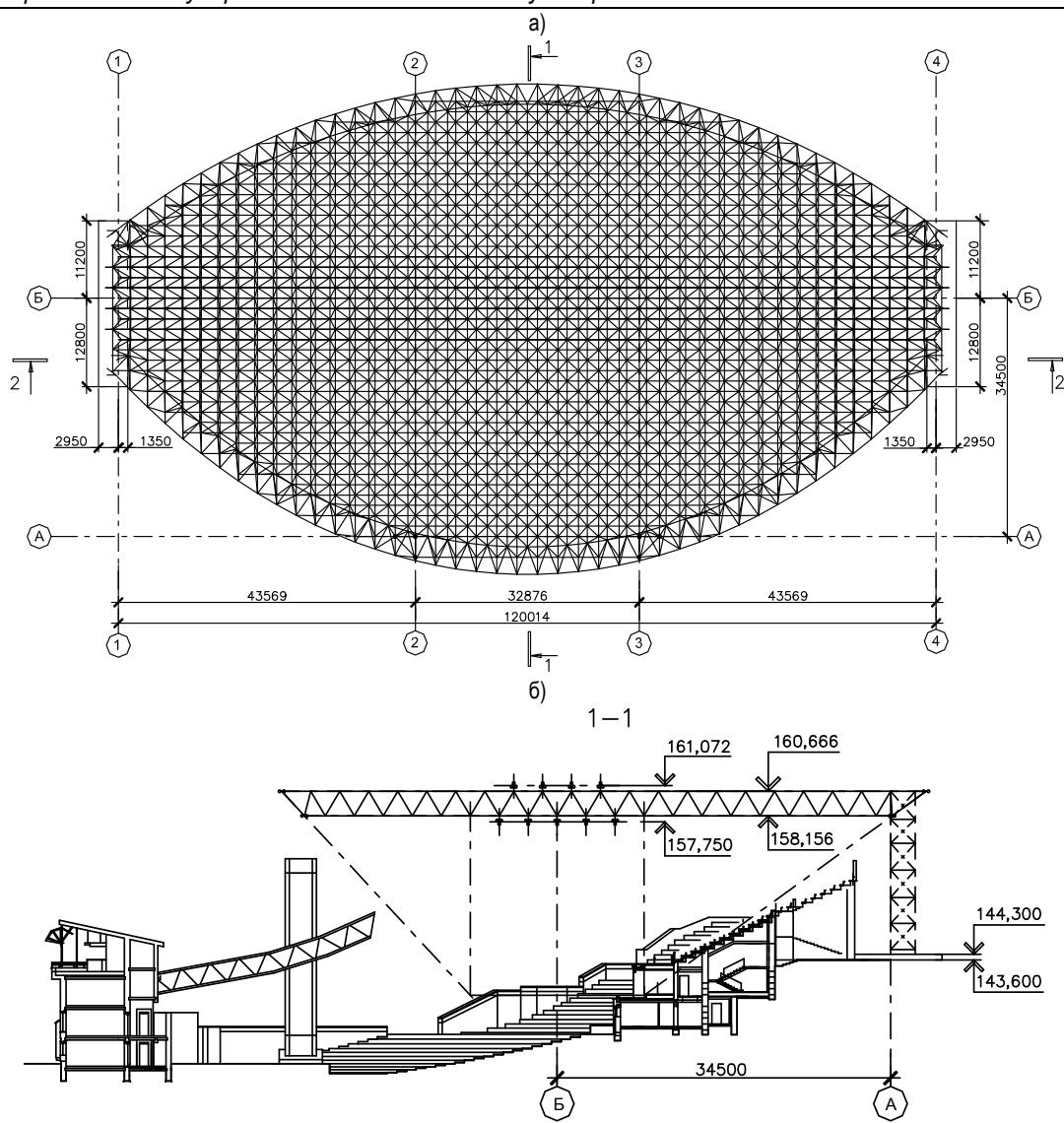
- обеспечивает устойчивость из плоскости поясов наклонных арок. В ходе реализации проекта были применены принципиально новые конструктивные решения, которые подкреплялись научным сопровождением процесса проектирования, включавшим большой объем экспериментальных исследований на физических и натуральных моделях и фрагментах. Кроме того, для указанного сооружения была разработана уникальная методика натурных испытаний путем нагружения всего покрытия полной нормативной нагрузкой. Успешные результаты натурных испытаний подтвердили высокую надежность и безопасность как структурной системы «БрГТУ», так и всего сооружения в целом [2]. Уникальность возведенного сооружения потребовала разработки специальной методики для мониторинга за техническим состоянием конструкций. Данная методика заключается в определении фактических значений внутренних усилий в элементах структурной конструкции с использованием современных методов и средств неразрушающего контроля посредством измерения в них вибрационных характеристик, а именно собственной частоты поперечных колебаний 1-го тона стержней конструкции.

1. Методика определения собственной частоты поперечных колебаний 1-го тона стержней конструкции

1.1. Базовые предпосылки

Уникальность и высокая конструктивная сложность покрытия Летнего амфитеатра в г. Витебске предопределили необходимость осуществления системного научно-технического сопровождения процесса эксплуатации сооружения. Начиная с 2007 года (год возведения покрытия) и до настоящего времени, специалистами университета ежегодно проводится мониторинг технического состояния покрытия. Программой мониторинга, которая выполняется в соответствии с [3], предусматривается выполнения ряда обязательных этапов:

- определение фактических нагрузок и воздействий на сооружение на различных этапах эксплуатации;
- выявление дефектов и повреждений, оценка их влияния на работу конструкции;



а) – план; б) – разрез 1-1

Рисунок 1 – Структурное покрытие Летнего амфитеатра в г. Витебске

- определение фактических значений внутренних усилий в элементах структурной оболочки посредством измерения их амплитудно-частотных характеристик [4, 5];
- анализ полученных результатов, разработка заключения по результатам мониторинга.

Как уже отмечалось ранее, для определения фактических значений внутренних усилий в элементах структурной конструкции покрытия применяется уникальная методика, основанная на измерении собственных частот поперечных колебаний 1-го тона в стержневых элементах конструкции.

Предлагаемая методика основывается на базовых положениях теории колебаний, согласно которым собственная частота поперечных колебаний зависит от величины продольного усилия (растягивающего и сжимающего) в элементах [6]. Согласно теории колебаний [6] зависимости для определения собственной частоты колебаний для физических тел конечной жесткости могут быть записаны в следующем виде:

- для растянутых элементов:

$$\omega = \frac{i \cdot \pi^2}{l^2} \cdot \sqrt{\frac{EI}{\rho F} + \left(1 + \frac{S \cdot l^2}{i^2 \cdot EI \cdot \pi^2}\right)}; \quad (1)$$

- для сжатых элементов:

$$\omega = \frac{i \cdot \pi^2}{l^2} \cdot \sqrt{\frac{EI}{\rho F} + \left(1 - \frac{S \cdot l^2}{i^2 \cdot EI \cdot \pi^2}\right)}, \quad (2)$$

где l – длина элемента;

EI – жесткость элемента;

ρ – плотность материала элемента;

F – площадь поперечного сечения элемента;

S – величина осевого усилия (абсолютное значение);

i – порядковый номер формы колебания элемента.

Как показал анализ результатов [4, 5], полученных экспериментально и с использованием выражений (1) и (2), представленные выражения дают существенные отклонения значений частот собственных колебаний для стержневых элементов системы «БрГТУ» как в случае определения частот на отдельных стержнях, так и в составе фрагмента структурной конструкции. Данный факт можно объяснить тем, что, во-первых, с точки зрения свободы колебаний закрепление стержневых элементов в узлах системы «БрГТУ» не может быть рассмотрено как идеальный шарнир, а во-вторых, зависимости (1) и (2) не учитывают эффект демпфирования, характерный для систем из отдельных элементов, поскольку они были получены на отдельных шарнирно закрепленных стержнях конечной жесткости.

Для получения эмпирических зависимостей, связывающих частоту собственных колебаний с величиной усилия в элементе конструкции, а также учитывающих особенности закрепления стержней в узловом элементе системы «БрГТУ», авторами методики были произведены несколько серий лабораторных испытаний. Измерения собственных частот поперечных колебаний стержневых элементов производились как на отдельных стержнях, так и стержнях в составе полноразмерных структурных фрагментов. Геометрические параметры (поперечное сечение, толщина стенки и длина стержней) соответствовали параметрам элементов, использованных в реальной конструкции. На основании выполненных исследований были установлены эмпирические зависимости «частота – усилие», позволявшие получать качественную оценку продольных усилий в элементах структурных конструкций системы «БрГТУ» при их обследовании. Подробное описание лабораторных испытаний и результатов, полученных в ходе их проведения, представлено в работах [4, 5].



Рисунок 2 – Общий вид измерительной системы анализа вибрационных характеристик ВИКМА-1

1.2. Измерительное оборудование и порядок измерения частот собственных колебаний

Измерение собственных частот поперечных колебаний производится с помощью измерительной системы анализа вибрационных характеристик ВИКМА-1. Система включает в себя следующие основные модули:

- модуль измерения вибрации;
- модуль управления, синхронизации и интерфейса;
- модуль питания и развязки.

Подробное описание основных модулей, а также принципиальная схема измерительной системы описаны в [7]. Общий вид измерительной системы представлен на рисунке 2.

Процесс проведения измерений производится в следующей последовательности:

1. Вибрационный датчик с магнитом крепится к элементу конструкции в средней части по длине.
2. На ЭВМ запускается процесс считывания результатов (порядка 20–25 с), одновременно производится возбуждение поперечных колебаний путем удара по элементу конструкции в направлении, параллельном расположению датчика, на расстоянии 20–30 см от него.
3. По истечении времени считывания результатов строится график колебательного процесса (рисунок 3).
4. Для получения четкого представления о значениях частот собственных колебаний график колебательного процесса программно преобразуется в спектр частот (рисунок 4), по которому определяется собственная частота поперечных колебаний 1-го тона элемента конструкции.
5. По значению частоты собственных колебаний элемента, на основании тарировочных графиков (теоретических формул) [4, 5], определяется осевое усилие в элементе конструкции.

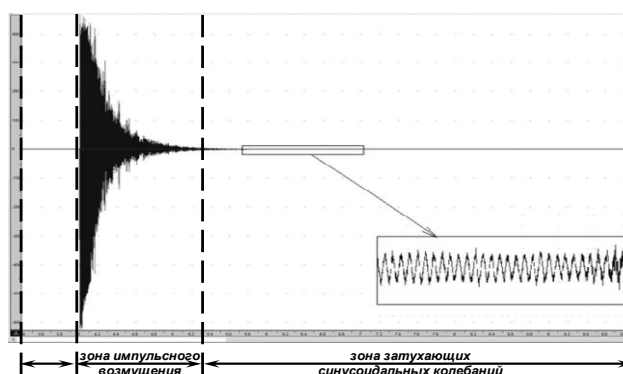


Рисунок 3 – График колебательного процесса (по оси абсцисс – время, (сек); по оси ординат – виброускорение (мм/с²))

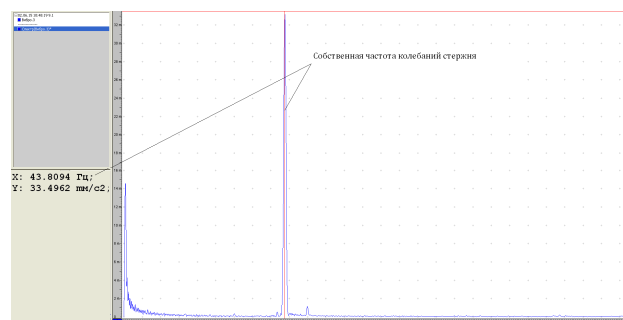


Рисунок 4 – Спектр частот колебательного процесса (ось абсцисс – частота колебаний, (Гц); ось ординат – виброускорение (мм/с²))

2. Определение продольных усилий в элементах структурной конструкции покрытия, по результатам измерения частот собственных колебаний (20 мая 2019 года)

В рамках проведения ежегодного мониторинга технического состояния конструкций покрытия Летнего амфитеатра в г. Витебске, который производился в мае 2019 г., были выполнены выборочные измерения частот собственных колебаний для стержневых элементов нижней поясной сетки (тип элемента С3 – $F=2610$ мм, тр.114×8 мм) и раскосной решетки (тип элемента С5 – $F=2958$ мм, тр.114×8 мм). Всего было произведено 92 измерения (см. рисунок 5) [7].

Во время проведения измерений покрытие было загружено следующими воздействиями:

- собственный вес конструкций покрытия;
- вес технологического оборудования;
- ветровая нагрузка, рассчитанная для скорости ветра 3 м/с;
- температурное воздействие – +20...22°С.

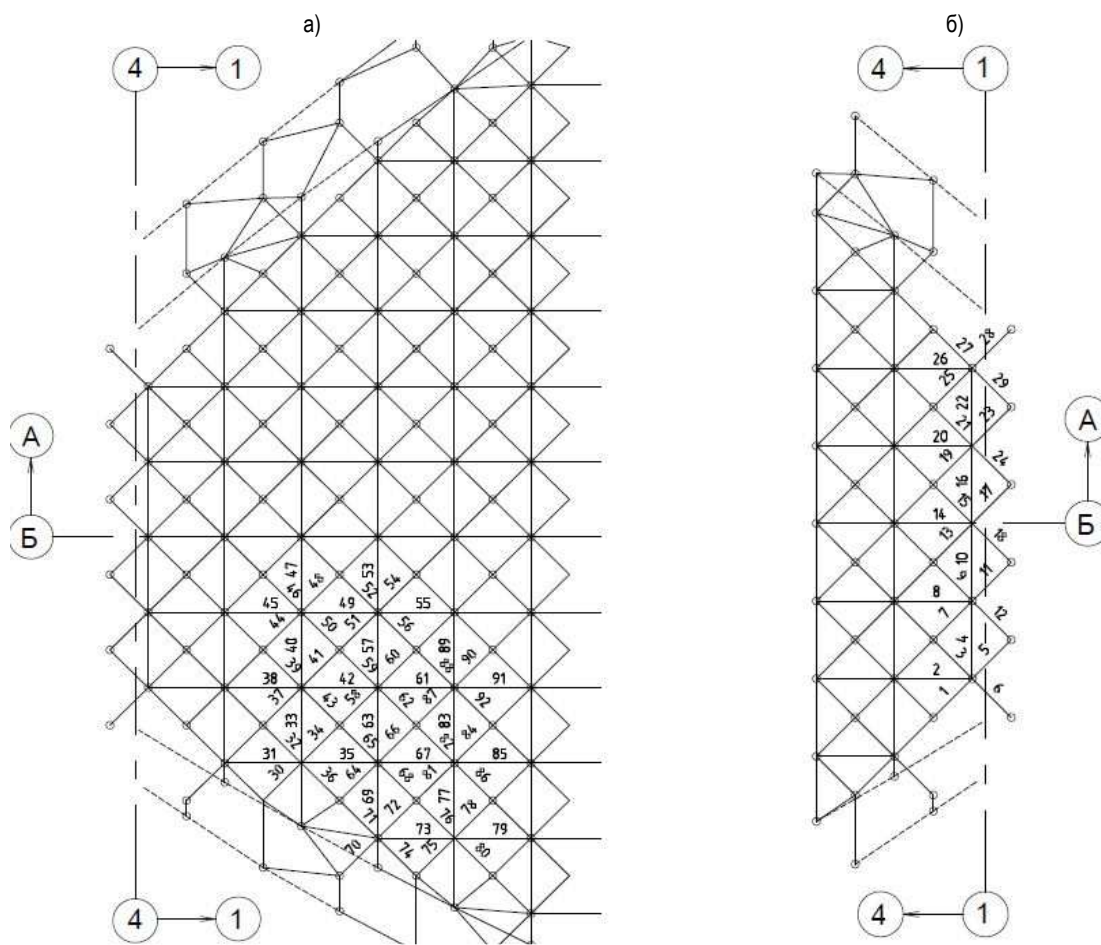
По результатам измерений было зафиксировано, что значения частот собственных колебаний находились в следующих интервалах:

- для стержневых элементов типа С3 – от 43,0502 Гц до 45,3928 Гц;
- для стержневых элементов типа С5 – от 32,2612 Гц до 35,4852 Гц.

По полученным значениям частот собственных колебаний были определены значения продольных усилий по группам элементов:

- для стержневых элементов типа С3 значения внутренних усилий изменялись в диапазоне от 126,4 кН до 94,6 кН;
- для стержневых элементов типа С5 значения внутренних усилий изменялись в диапазоне от 116,7 кН до 91,3 кН.

Полученные значения внутренних продольных усилий в элементах нижней поясной сетки и раскосной решетки были сопоставлены с соответствующими расчетными значениями, которые были вычислены с использованием конечно-элементной модели в программном комплексе Lira с учетом действующих на покрытие нагрузок.



а) – по оси 4; б) – по оси 1

Рисунок 5 – Нумерация элементов, в которых производились измерения собственных частот колебаний [7]

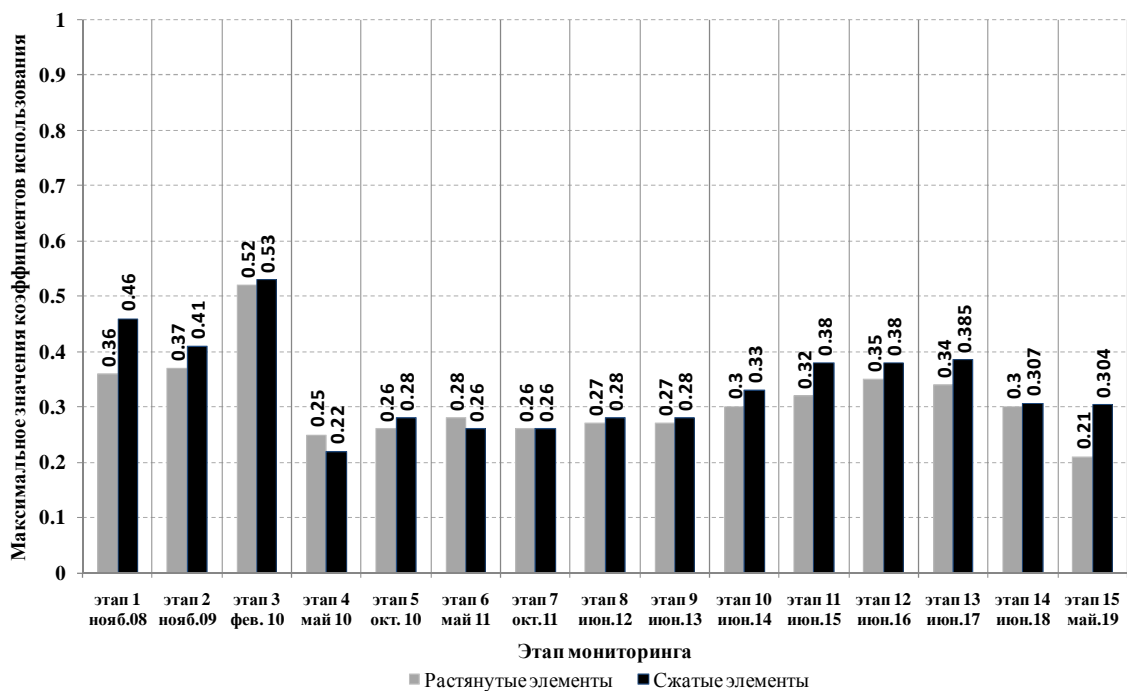


Рисунок 6 – Распределение коэффициентов использования несущей способности элементов структурного покрытия по периодам мониторинга [7]

Минимальные и максимальные коэффициенты использования несущей способности элементов составили:

- для элементов раскосной решетки структурного покрытия – 0,01...0,304;
- для элементов нижней поясной сетки структурного покрытия – 0,014...0,304.

При этом максимальные коэффициенты использования несущей способности элементов в зависимости от знака усилия составили:

- для сжатых элементов структурного покрытия – 0,304;
- для растянутых элементов структурного покрытия – 0,21.

На рисунке 6 представлена диаграмма, показывающая распределение значений коэффициентов использования сечений стержневых элементов, вычисленных по результатам измерений в период с 2008 по 2019 год.

Представленные на рисунке 6 данные показывают практически идентичные значения коэффициентов использования сечений за весь период наблюдений. Исключение составили данные третьего этапа (февраль 2010 года) мониторинга, которые демонстрируют максимальные значения. Пиковые значения коэффициентов использования сечений объясняются максимальными воздействиями на покрытие в момент проведения мониторинга, а именно – равномерно распределенная снеговая нагрузка на покрытие составляла 121 кг/м², температура наружного воздуха – минус 4°С. Анализ результатов измерений, выполняемых на протяжении всего периода наблюдений за состоянием покрытия, свидетельствует об исправном техническом состоянии и высокой эксплуатационной пригодности сооружения. Значения внутренних усилий, определенные более чем за десятилетний период наблюдений хорошо коррелируются между собой, что свидетельствует о правомерности использования предложенной методики. Стабильность значений внутренних усилий (при сопоставимых силовых воздействиях), характеризующих напряженно-деформированное состояние конструкций, убедительно доказывает, что за рассматриваемый период снижения несущей способности конструкций не отмечено, покрытие обладает высоким уровнем надежности, эксплуатационной пригодности и долговечности.

Заключение

Методика определения действительных внутренних продольных усилий в стержневых элементах структурной конструкции системы «БрГТУ», основанная на зависимости величины продольного усилия от частоты свободных колебаний, демонстрирует хорошую сходимость расчетных и измеренных значений на протяжении всего периода проведения наблюдений за техническим состоянием покрытия Летнего амфитеатра в г. Витебске, тем самым подтверждая обоснованность её применения для оценки несущей способности и надежности элементов структурных конструкций системы «БрГТУ».

Список цитированных источников

1. Драган, В. И. Экспериментально-теоретическое обоснование несущей способности металлического покрытия летнего амфитеатра в Витебске / В. И. Драган., В. В. Люстибер // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь: сб. тр. XV Междунар. науч.-метод. сем., Новополоцк, 27–28 ноября 2008 г. / Полоцк, гос. ун-т; редкол.: Т. М. Пецольд [и др.]. – Новополоцк : ПГУ, 2008. – С. 140–145.
2. Драган, В. И. Металлическая структурная конструкция системы «БрГТУ» большепролетного покрытия летнего амфитеатра в г. Витебске / В. И. Драган, В. В. Люстибер // Перспективы разви-

тия новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь: сб. тр. XVII Междунар. науч.-метод. сем., Гродно, 2010 г. / Гродн. Гос. ун-т; редкол.: Т. М. Пецольд [и др.]. – Гродно : ГГУ, 2010. – С. 53–59.

3. Проведение осмотров (обследований) технического состояния структурных конструкций системы «БрГТУ» : Р 1.04.085.11. – Введ. 19.09.11 – Брест : Брестский гос. техн. ун-т, 2011. – 12 с.
4. Драган, В. И. Исследование напряженно-деформированного состояния металлической структурной конструкции системы «БрГТУ» методами теории колебаний / В. И. Драган, А. В. Мигель // Вестник БрГТУ. – 2010. – № 1(61) : Строительство и архитектура. – С. 70–74.
5. Драган, В. И. Методика диагностика технического состояния металлических структурных конструкций «БрГТУ» / В. И. Драган, А. В. Мигель // Дефекты зданий и сооружений. Усиление строительных конструкций: матер. XIV науч.-метод. конф., 18 марта 2010 г. / Воен. инж.-техн. ун-т. – Санкт-Петербург, 2010. – С. 137–141.
6. Тимошенко, С. П. Колебания в инженерном / С. П. Тимошенко [и др.] – М. : Машиностроение, 1985. – 472 с.
7. Проведение технического обследования металлоконструкций арочного покрытия филиала «Летний амфитеатр» по адресу г. Витебск, пр. Фрунзе, 13А : отчет по НИР – №19/42/ БрГТУ; рук. темы А. В. Драган. – Брест, 2019. – 55 с.

References

1. Dragana, V. I. Eksperymental'no-teoretycheskoe obosnovanie nesushchej sposobnosti metallicheskogo pokrytiya letnego amfiteatra v Vitebske / V. I. Dragana, V. V. Lyustiber // Perspektivy razvitiya novyh tekhnologij v stroitel'stve i podgotovke inzhenernyh kadrov Respubliki Belarus': sb. tr. XV Mezhdunar. nauch. metod. sem., Novopolock, 27-28 noyabrya 2008 g. / Poloc. Gos. un-t; redkol. : T. M. Pecol'd [i dr.]. – Novopolock : PGU, 2008. – S. 140–145.
2. Dragana, V. I. Metallicheskaya strukturmaya konstrukciya sistemy «BrGTU» bol'sheproletnogo pokrytiya letnego amfiteatra v g.Vitebske / V. I. Dragana, V. V. Lyustiber // Perspektivy razvitiya novyh tekhnologij v stroitel'stve i podgotovke inzhenernyh kadrov Respubliki Belarus' : sb. tr. XVII Mezhdunar. nauch. metod. sem., Grodno, 2010 g. / Grodno. Gos. un-t; redkol. : T. M. Pecol'd [i dr.]. – Grodno : GGU, 2010. – S. 53–59.
3. Provedenie osmotrov (obsledovaniy) tekhnicheskogo sostoyaniya strukturyh konstrukcij sistemy «BrGTU» : R 1.04.085.11. – Vved. 19.09.11 – Brest : Brestskij gos. tekhn. un-t, 2011. – 12 s.
4. Dragana V. I. Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya metallicheskoj strukturoj konstrukcii sistemy «BrGTU» metodami teorii ko-lebaniy / V. I. Dragana, A. V. Migel' // Vestnik BrGTU. – 2010. – № 1(61) : Stroitel'stvo i arhitektura. – S. 70–74.
5. Dragana, V. I. Metodika diagnostika tekhnicheskogo sostoyaniya metallicheskih strukturyh konstrukcij «BrGTU» / V. I. Dragana, A. V. Migel' // Defekty zdaniy i sooruzhenij. Usilenie stroitel'nyh konstrukcij : mater. XIV nauch.-metod. konf., 18 marta 2010 g. / Voen. inzh.-tekhn. un-t. – Sankt-Peterburg, 2010. – S. 137–141.
6. Timoshenko, S. P. Kolebaniya v inzhenernom / S. P. Timoshenko i dr. – M. : Mashinostroenie, 1985. – 472 s.
7. Provedenie tekhnicheskogo obsledovaniya metallokonstrukcij arochnogo pokrytiya filiala «Letnij amfiteatr» po adresu g. Vitebsk, pr. Frunze, 13A : otchet po NIR – №19/42 / BrGTU; ruk. temy A. V. Dragana. – Brest, 2019. – 55 s.

Материал поступил в редакцию 03.01.2020