

К. В. Федин^{1,2,3}, Ю. И. Колесников^{1,2}, Л. Нгомайезве²*

Диагностика технического состояния козырька трибуны стадиона «Геолог» (г. Тюмень) пассивным сейсмоакустическим методом

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, г. Новосибирск,
Российская Федерация

² Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация

³ Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск,
Российская Федерация

* e-mail: kolesnikovyi@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Целью настоящего исследования была оценка возможностей применения пассивного сейсмического метода стоячих волн для обследования больших плоских сооружений. В качестве объекта исследования был выбран металлический козырек над западной трибуной стадиона «Геолог» (г. Тюмень) и его 25 также металлических опор. В ходе обследования проводилась регистрация двумя вертикальными геофонами микросейсмических колебаний поверхности козырька и его опор. Один геофон (опорный) был установлен на козырьке стационарно, другой последовательно устанавливался в точках наблюдений на поверхности козырька и его опорах (всего 700 точек наблюдения). Записи опорного геофона использовались для нормировки записей передвижного геофона с целью компенсации изменений интенсивности микросейсм во время проведения измерений. Обработка полученных шумовых записей сводилась к их нормировке с использованием синхронных записей в опорной точке, разбивке записей на блоки, вычислению амплитудных спектров этих блоков, накоплению полученных для каждой точки спектров с целью выделения стоячих волн на собственных частотах исследуемого объекта. В результате обработки были определены частота низшей моды изгибных колебаний козырька и распределение амплитуд этой моды в козырьке и его опорах. Анализ этого распределения позволил сделать вывод об отсутствии существенных дефектов в исследуемом объекте и о его устойчивости.

Ключевые слова: диагностика плоских конструкций, пассивная сейсмика, стоячие волны

K. V. Fedin^{1,2,3}, Yu. I. Kolesnikov^{1,2}, L. Ngomayezwe²*

Diagnostics of the technical condition of the tribune canopy of the stadium «Geolog» (Tyumen) by passive seismoacoustic method

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

² Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

³ Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

* e-mail: kolesnikovyi@ipgg.sbras.ru

Abstract. The purpose of this study was assessing the possibilities of using the passive seismic method of standing waves for surveying large flat structures. The object of the study was a metal canopy over the western stand of the stadium «Geolog» (Tyumen) and its 25 metal supports. During the survey, microseismic vibrations of the surface of the canopy and its supports were recorded by two vertical geophones. One geophone (reference) was permanently installed on the canopy, the other one was sequentially installed at the observation points on the surface of the canopy and its supports

(700 observation points in total). Reference geophone records were used to normalize mobile geophone records to compensate for changes in microseismic intensity during measurements. The processing of the obtained noise records was reduced to their normalization using synchronous records at the reference point, dividing the records into blocks, calculating the amplitude spectra of these blocks, and accumulating the spectra obtained for each point in order to extract standing waves at the natural frequencies of the object under study. As a result of processing, the frequency of the lowest mode of flexural vibrations of the canopy and the distribution of the amplitudes of this mode in the canopy and its supports were determined. An analysis of this distribution made it possible to conclude that there are no significant defects in the object under study and that it is stable.

Keywords: diagnostics of flat structures, passive seismic, standing waves

Введение

Для обеспечения безопасной эксплуатации зданий и сооружений необходимо периодически контролировать их состояние. Такой контроль может осуществляться различными методами. Простейшие из них – визуальный осмотр и геодезический контроль [1] – хотя и дают во многих случаях хорошие результаты, но не несут какую-либо информацию о скрытых дефектах.

Широкое распространение получил метод динамических испытаний сооружений, который основан на анализе колебаний, возбуждаемых ударом массой от нескольких десятков килограммов (например, боксерской грушей [1]) до нескольких тонн [2]. Недостатками этого метода являются его невысокие детальность и точность получаемых результатов.

В качестве источника колебаний также используются мощные вибраторы, установленные рядом со зданием или инженерным сооружением [3-5] или даже на достаточно значительном удалении от исследуемых объектов [6]. Очевидный недостаток этого метода – высокая стоимость необходимого для проведения работ оборудования.

Для испытания зданий и инженерных сооружений помимо вибрационного применяется сейсмозрывное воздействие [3-7]. С помощью этого метода оценивают сейсмостойкость зданий и сооружений и степень их повреждаемости при сейсмических воздействиях различной интенсивности. Однако, как и вибрационные испытания, исследования этим методом требуют больших затрат и практически неприменимы в городских условиях. Более дешевыми методами исследования собственных колебаний зданий являются методы, использующие естественные источники, например, пульсации атмосферного давления и ветровые воздействия [8-10].

Другой постоянно действующий естественный источник, возбуждающий собственные колебания (стоячие волны) в зданиях и сооружениях – микросейсмы различной природы. В последние годы основанный на регистрации микросейсм метод стоячих волн в различных модификациях широко применяется для решения различных задач инженерной сейсмологии – от обследования зданий, плотин, трубопроводов и других инженерных сооружений до определения резонансных свойств верхней части разреза [11-16]. Целью настоящего исследования была оценка возможностей применения пассивного сейсмического метода стоя-

чих волн для обследования технического состояния больших плоских конструкций (на примере козырька трибуны стадиона).

Объект и метод исследования

В качестве объекта исследования был выбран металлический козырек над западной трибуной стадиона «Геолог» (г. Тюмень) и его 25 также металлических опор (рис. 1). Козырек подвесного типа, сооруженный в ходе проведения реконструкции стадиона в период 2008–2011 гг., представляет собой систему жестко скрепленных с опорами наклонных балок, каждая из которых дополнительно поддерживается тремя прикрепленными к опорам выше козырька тросами. Сверху наклонные балки перекрыты стальным покрытием, усиленным ребрами жесткости. Ширина козырька – 26 м, длина – 145 м. Этот объект является потенциально опасным, так как под ним на трибунах могут одновременно находиться более шести тысяч человек, поэтому его периодически необходимо обследовать на предмет появления дефектов в конструкции козырька и опор, а также устойчивости последних.



Рис. 1. Общий вид западной трибуны стадиона «Геолог»

Обследование проводилось пассивным сейсмическим методом стоячих волн в модификации, которая уже использовалась нами как метод картирования пустот под твердым дорожным покрытием [17]. При обследовании козырька на его верхней поверхности проводилась площадная регистрация микросейсмических колебаний двумя вертикальными геофонами GS-20DX с одноканальными автономными цифровыми регистраторами RefTek-125A. Один геофон («опорный») был установлен стационарно в средней части козырька, другой в процессе измерений передвигался по плоскости козырька. Опорный геофон применялся для нормировки уровня шумовых записей передвижного геофона, чтобы компенсировать различия в шумовых трассах, вызванные изменениями уровня внешних шумов при измерениях. В каждой передвижной точке площадной системы наблюдений производилась запись микросейсмических колебаний в течение 5 минут с частотой дискретизации 500 Гц и с синхронной регистрацией колебаний в опорной точке.

При обработке цифровые записи для каждой точки профиля нормировались на уровень синхронной записи в опорной точке, разбивались на блоки по 8192 отсчета, для каждого блока рассчитывался его амплитудный спектр и для каждой точки проводилось осреднение (накопление) спектров всех блоков. Такое накопление приводит к появлению спектральных пиков на собственных частотах исследуемого объекта. Анализ распределения амплитуд в объекте на его собственных частотах позволяет судить о наличии дефектов в конструкции, либо о нарушении его устойчивости.

Результаты и их обсуждение

На рис. 2а показана схема козырька стадиона «Геолог» в плане с местами установки геофонов на его металлическом покрытии (нижний край схемы соответствует местам крепления козырька к опорам). Геофоны устанавливались непосредственно над несущими балками, обеспечивающими жесткость конструкции козырька – по 10 над каждой из 25 балок, всего 250 точек наблюдения. Шаг между точками установки геофонов из-за конструктивных особенностей козырька изменялся в пределах 2.5–3 м по ширине козырька и 3–6 м по его длине.

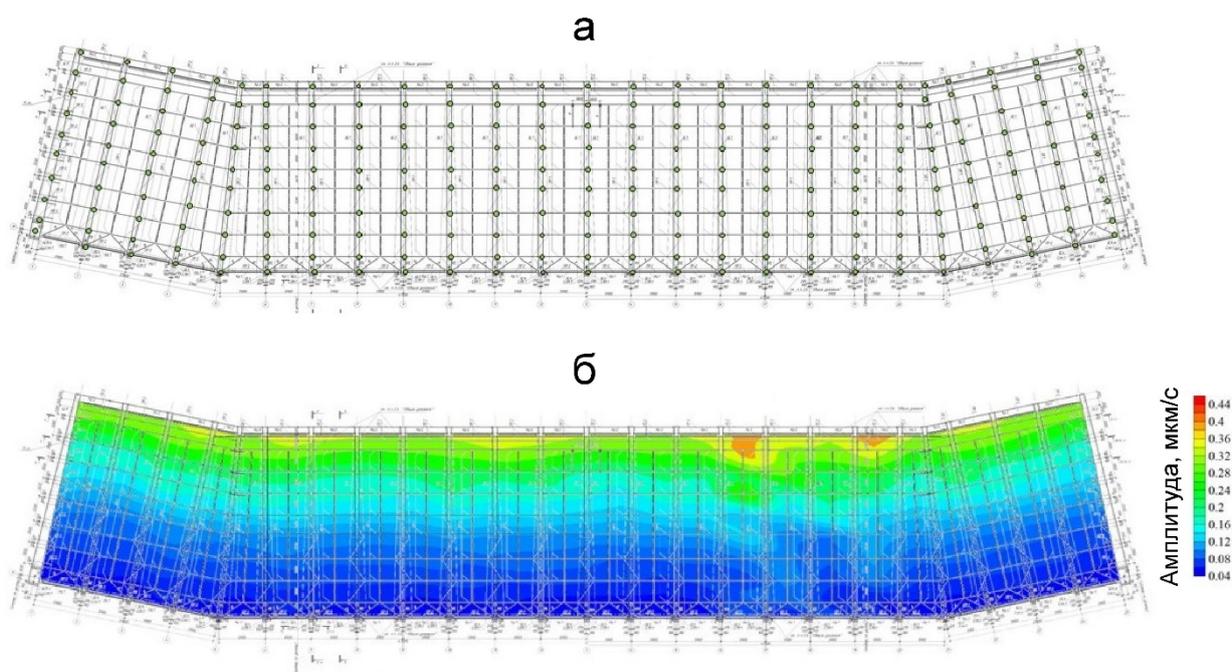


Рис. 2. Схема козырька трибуны в плане с отмеченными зелеными кружками точками установки геофонов над подвесными балками (а); распределение амплитуд низшей моды собственных вертикальных колебаний в козырьке трибуны (б)

Кроме измерений на поверхности козырька, регистрация микросейсмических колебаний была проведена на всех его опорах и подвесных наклонных балках (рис. 3). Схема опор и балок с отмеченными местами установки геофонов приведена на рис. 3а. Высота опор – 17.7 м, длина балок – 26 м. На каждой опоре

с балкой измерения проводились в 18 точках, общее число точек наблюдения – 450.

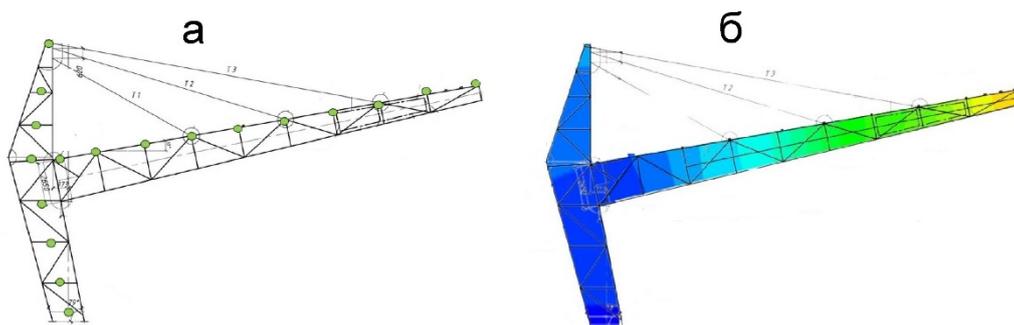


Рис. 2. Схема опоры козырька трибуны с поддерживаемой тремя тросами наклонной балкой и отмеченными зелеными кружками точками установки геофонов (а); пример распределения амплитуд низшей моды собственных вертикальных колебаний в опоре и балке (б)

В результате накопления спектров для всех точек наблюдения, показанных на рис. 2а, была определена частота основной (низшей) моды собственных изгибных колебаний конструкции – 14.8 Гц. Такая же частота низшей моды наблюдалась и на всех опорах, из чего следует, что вся конструкция козырька с покрытием и всеми опорами колеблется на этой собственной частоте как единое целое.

На рис. 2б приведено распределение амплитуд на поверхности козырька для низшей моды изгибных стоячих волн. Как видно из рисунка, колебания на собственной частоте 14.8 Гц действительно являются низшей модой стоячих волн. Это следует из того, что минимальные амплитуды (узловая область изгибной стоячей волны) приурочены к местам жесткого крепления наклонных балок к опорам и в самих опорах (рис. 3б), а максимальные (пучности) – в окрестности противоположного (свободного) края козырька и на свободных концах наклонных балок. Заметим, что на рис. 3б приведен только один пример распределения амплитуд в опоре и наклонной балке, но во всех 25 опорах с балками эти распределения лишь незначительно отличаются друг от друга. Промежуточных областей с повышенными или пониженными значениями амплитуд, характерных для мод более высоких порядков, в приведенных на рис. 2б и рис. 3б распределениях не наблюдается.

Анализируя приведенные на этих рисунках карты амплитуд, можно заметить, что в опорах и примыкающих к ним частях козырька амплитуды колебаний примерно на порядок ниже, чем возле противоположного края козырька, что говорит об устойчивости опор и надежном креплении балок к ним. Относительно монотонное возрастание амплитуд при переходе от узловой области к пучности при отсутствии заметных аномалий свидетельствует о том, что существенных изменений в конструкции козырька за более чем десятилетний период его эксплуатации не произошло. Небольшие аномалии на свободном крае козырька между 6-й и 7-й, а также между 9-й и 10-й балками, возможно, являются арте-

фактами, связанными с особенностями работы программного пакета Surfer, использованного для визуализации данных, так как эти аномалии локализованы между точками, в которых проводились наблюдения (то есть там, где данных нет).

Таким образом, анализ распределения амплитуд низшей моды собственных колебаний в козырьке трибуны и его опорах позволяет сделать заключение об отсутствии каких-либо существенных нарушений в их конструкции и устойчивости сооружения в целом.

Заключение

Результаты, полученные при обследовании козырька трибуны стадиона «Геолог» (г. Тюмень) пассивным сейсмическим методом стоячих волн, подтвердили эффективность данного метода при исследовании технического состояния протяженных двумерных плоских конструкций. Регистрация микросейсмических колебаний датчиками, расположенными на площадной системе наблюдений на поверхности плоского объекта исследований (козырька трибуны) и последующая обработка полученных шумовых данных (накопление их спектров) позволяют выделять из шумового поля изгибные стоячие волны, частоты которых являются собственными частотами исследуемого объекта.

В данном исследовании определена частота низшей моды изгибных стоячих волн сооружения, включающего козырек трибуны и его опоры. Построено распределение амплитуд этой волны в основных конструктивных элементах данного сооружения, показавшее, что существенных нарушений конструкции и устойчивости исследуемого объекта за более чем десятилетний срок эксплуатации не произошло.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта ИНГГ СО РАН FWZZ-2022-0017.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Методика оценки и сертификации инженерной безопасности зданий и сооружений. – М.: МЧС России, 2003 – 85 с.
2. Румянцев А.А., Сергеевцев Е.Ю. Натурные исследования динамических характеристик частично возведенного здания универсального бассейна в г. Анапе // Вестник МГСУ. – 2012. – № 5 – С. 93–97.
3. Бержинский Ю.А., Павленов В.А., Ордынская А.П., Попова Л.П. Оценка повреждаемости зданий и сооружений по результатам сейсмозрывных и вибрационных испытаний опытных объектов // Геофизические исследования в Восточной Сибири на рубеже XXI века: Сб. науч. тр. – Новосибирск: Наука, 1996. – С. 194–199.
4. Вибрационные испытания зданий / Под ред. Г.А. Шапиро. – М.: Стройиздат, 1972 – 160 с.
5. Обследование и испытание сооружений. Учеб. пособие для ВУЗов / Под ред. О. В. Лужина. – М.: Стройиздат, 1987. – 263 с.
6. Еманов А.Ф. О применении вибраторов для определения сейсмостойкости здания и в микросейсморайонировании // Геология и геофизика. – 1995. – Т. 36. – № 7 – С. 87–93.

7. Негматуллаев С.Х, Рождан К., Золотарев А.Е., Акишин А.А. Предварительные результаты испытания опытного образца каркасно-панельного здания сейсмозрывным воздействием // Сборник советско-американских работ по прогнозу землетрясений. Т. 2, кн. 2. – Душанбе: «Дониш», 1979. – С. 102-120.
8. Антоновская Г.Н., Шахова Е.В. Новый способ определения конструктивной целостности инженерных сооружений // Современные наукоемкие технологии. – 2005. – №1 – С. 21–22.
9. Капустян Н.К., Дыховичная Н.А. Сейсмический мониторинг ветровых колебаний высотных зданий // Моніторинг небезпечних геологічних процесів та екологічного стану середовища. – Киев: КНУ, 2003. – С. 30–32.
10. Юдахин Ф.Н., Капустян Н.К., Антоновская Г.Н. Инженерно-сейсмические исследования геологической среды и строительных конструкций с использованием ветровых колебаний зданий. – Екатеринбург: УрО РАН, 2007. – 155 с.
11. Еманов А.Ф., Селезнев В.С., Бах А.А., Гриценко С. А., Данилов И.А., Кузьменко А.П., Сабуров В.С., Татьков Г.И. Пересчет стоячих волн при детальном инженерно-сейсмологических исследованиях // Геология и геофизика. – 2002. – Т. 43. – № 2. – С. 192–207.
12. Еманов А.Ф., Селезнев В.С., Бах А.А. Когерентное восстановление полей стоячих волн как основа детального сейсмологического обследования инженерных сооружений // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2007. – №3. – С. 20–24.
13. Еманов А.Ф., Красников А.А. Применение метода стоячих волн для исследования сейсмоизолированных зданий // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2015. – Т. 42. – №4. – С. 37–64.
14. Еманов А.Ф., Бах А.А., Клецин В.И. Стоячие волны в плотинах Богучанской и Чиркейской ГЭС // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. – 2018. – № 4 (35). – С. 28–33.
15. Колесников Ю.И., Федин К.В., Нгомайезве Л. Экспериментальное обоснование применения акустических шумов для диагностирования надземных трубопроводов // ФТПРПИ. – 2019. – № 2. – С. 49–58.
16. Kolesnikov Y.I., Fedin K.V., Ngomayezwe L. Direct determination of resonant properties of near-surface sediments using microtremor // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 2019. – Vol. 125. – Article 105739 – P. 1–8.
17. Ngomayezwe L., Kolesnikov Y.I., Fedin K.V. Diagnostics of asphalt pavement using elastic standing waves // Near Surface Geophysics. – 2022. – Vol. 20. – No. 1. – P. 82–93.

© К. В. Федин, Ю. И. Колесников, Л. Нгомайезве, 2023