

УДК 534.16

В.В. Корепанов, Р.В. Цветков

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

**СЕЗОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ
КОЛЕБАНИЙ ЗДАНИЯ НА СВАЙНОМ ФУНДАМЕНТЕ**

Работа посвящена исследованию динамических характеристик зданий на свайном фундаменте, а именно исследованию вибрационных процессов в здании при естественных внешних «слабых» воздействиях (микросейсмические, ветровые и т.д.). В этом случае требуется специальная аппаратура, способная регистрировать такие динамические процессы. Ветровые или микросейсмические воздействия различных механизмов, например автомобилей, на здания продолжают постоянно, поэтому есть возможность организовать непрерывное наблюдение или мониторинг. Одним из наиболее информативных динамических параметров, оценивающих состояние исследуемой системы, является собственная частота. Так, например, изменение спектра собственных частот может свидетельствовать об изменении жесткостных характеристик элементов здания за счет накопленных повреждений, а также об изменениях в грунте и его связи со свайным фундаментом. В работе на основе непрерывного мониторинга вибрационных характеристик анализируется спектр частот колебаний здания, определяются его собственные частоты, исследуются сезонные изменения собственных частот и проводится численное моделирование, позволяющее описывать эти сезонные изменения. На основе численного эксперимента по определению собственных частот в системе здание–свайный фундамент–грунт, в котором взаимодействие свайного фундамента с грунтом представлено в виде пружин, найдены низшие собственные частоты конструкции здания. Установлено, что сезонные изменения собственных частот конструкции здания связаны с промерзанием грунта, которое влияет на жесткостные свойства системы здание–свайный фундамент–грунт.

Ключевые слова: деформационный мониторинг, собственная частота, велосиметр, вейвлет-спектр, фурье-спектр, численное моделирование, свайный фундамент.

V.V. Korepanov, R.V. Tsvetkov

Institute of Continuous Media Mechanics RAS, Perm, Russian Federation

**SEASONAL CHANGES IN EIGENFREQUENCIES
OF STRUCTURES SUPPORTED ON PILE FOUNDATIONS**

The paper is concerned with studying the dynamic characteristics of constructions and their response to vibrations initiated by weak natural environmental actions (microseismic, wind and other impacts). Such investigations require special equipment capable of recording the development of dynamic processes. Since the structures are constantly exposed to natural impacts of winds and seismic noises, it is reasonable to conduct continued observations or monitoring. The study focuses on the dynamic behavior of structures supported on pile foundations under natural outside impacts, among which the wind action and microseismic actions of different mechanisms, for example, cars are most common to urban environment. The investigation is based on the analysis of eigenfrequency, which is one of the

most informative dynamic parameters for estimating the current state of constructions. Thus, a variation in the spectrum of eigenvalues is indicative of a change in the stiffness properties of the structure elements due to damage accumulation and also suggests the appearance of changes in the soil and contact pressure between the soil and foundation. In this paper, a continuous monitoring technique is used to analyze the frequency spectrum of the structure, to determine its eigenfrequencies and their seasonal changes and to perform numerical simulations allowing an adequate description of seasonal impacts on the structure frequency. The lowest eigenfrequencies of the structure have been determined from the numerical experiment on natural frequencies of the structure-pile foundation-soil system, in which coupled springs are used to model the interactions between the pile foundation and soil. It has been found that seasonal changes in eigenfrequencies of structures supported on pile foundations are caused by frost penetration into the soil, which affects the stiffness properties of the soil-pile foundation-structure system.

Keywords: structural health monitoring, eigenfrequency, velocimeter, wavelet spectrum, Fourier spectrum, numerical simulation, pile foundation.

Введение

Начиная с 50-х гг. прошлого века, когда в СССР началось строительство высотных домов, появилось множество работ, посвященных изучению вибрационных процессов в зданиях [1]. Позднее появились вибрационные методы испытания зданий, описанные в литературе [2]. Можно выделить два основных направления исследования динамических характеристик сооружений: исследование отклика конструкции сооружения на специально индуцированное внешнее воздействие [3] и исследование колебательных процессов в сооружении при естественных «слабых» воздействиях – микросейсмических, ветровых и т.д. В первом случае таким воздействием может быть и землетрясение, которое, надо отметить, случается нечасто и не везде. В случае естественных слабых воздействий требуется специальная аппаратура, способная регистрировать такие динамические процессы [4]. Естественные воздействия от ветра или микросейсмического фона на сооружения продолжают постоянно и благодаря этому можно организовать непрерывное наблюдение или мониторинг. В работах [5–7] представлены результаты измерений колебаний зданий, вызванных ветром.

В данной работе мы коснемся вопроса исследования динамических характеристик сооружения на свайном фундаменте при естественных внешних воздействиях, которыми в условиях городской застройки могут быть как ветровые, так и микросейсмические воздействия от различных механизмов, например автомобилей. Исследование динамической реакции сооружения производилось в рамках организации системы деформационного мониторинга здания [8, 9, 10], поскольку параметры этой реакции являются информативными. В качестве параметров динамической реакции могут выступать: значения и распре-

деления собственных частот; уровни амплитуд ускорений в элементах сооружения; величины, характеризующие диссипативное поведение элементов сооружения и т.п. Одним из наиболее информативных динамических параметров, оценивающих состояние исследуемой системы, является собственная частота. Изменение спектра собственных частот может свидетельствовать об изменении жесткостных характеристик элементов здания за счет накопленных повреждений. Так, например, уменьшение собственной частоты на 5 % может свидетельствовать о наличии повреждений [11]. На динамические параметры исследуемых систем оказывает влияние и окружающая среда [12, 13]. В работе [14], например, наблюдался рост значений низших собственных частот 22-этажного железобетонного здания с ростом температуры в пределах 4–5 %.

Ранее в наших работах [15, 16] с помощью численного моделирования производилась оценка уровня вибраций в грунте под зданием, вызванных естественными природными или техногенными воздействиями.

В данной работе на основе мониторинга вибрационных характеристик определяется спектр частот здания и исследуется эволюция его собственных частот, проводится численное моделирование, позволяющее описывать эволюцию собственных частот здания.

Статья состоит из двух частей. В первой части рассмотрен эксперимент по определению эволюции собственных частот здания на основе проведенного непрерывного мониторинга, а во второй – проведено численное моделирование, описывающее сезонное изменение собственных частот здания.

1. Эксперимент

Объектом исследования является жилой 5-этажный 7-подъездный кирпичный жилой дом, построенный в 1987 г. (рис. 1). Несущие конструкции здания: фундаменты – свайные; наружные стены – из керамического кирпича с облицовкой из силикатного; внутренние стены – из керамического кирпича на цементно-песчаном растворе; перекрытия – сборные железобетонные из многпустотных плит. На протяжении многих лет здание испытывало осадку фундамента, вследствие чего в районе 5-го подъезда в несущих стенах образовались многочисленные трещины, которые ослабили несущую способность.

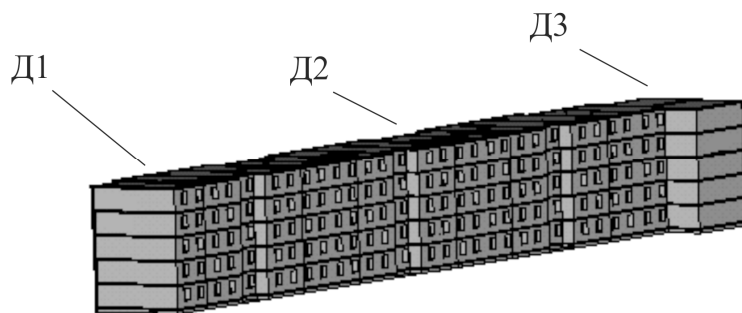


Рис. 1. Места установки датчиков во время разового эксперимента

Перед проведением длительных мониторинговых вибродиагностических наблюдений был проведен разовый эксперимент, в ходе которого одновременно регистрировались динамические характеристики здания тремя сейсмодатчиками.

Датчики были установлены на крыше здания таким образом, что первый датчик (Д1) располагался на крыше в районе 1-го подъезда (левый край дома), второй датчик (Д2) – в районе 4-го подъезда (середина дома) и третий датчик (Д3) – в районе 7-го подъезда (правый край дома) (см. рис. 1). В течение определенного периода времени датчиками производились измерения колебаний конструкции здания, возникающих в результате естественных внешних воздействий.

Измеренные виброскорости были преобразованы путем численного интегрирования в виброперемещения. Найденные виброперемещения были преобразованы в вейвлет-образы с использованием вейвлета Морле. Тоновые изображения модулей вейвлетов от сигналов виброперемещений представлены на рис. 2. Тон на рисунке соответствует интенсивности сигнала определенной частоты в данный момент времени. Анализируя полученные данные (см. рис. 2), приходим к выводу, что нижние собственные частоты спектра находятся в интервале 2,1–2,2 Гц.

Следует отметить, что горизонтальная x -компонента (вдоль дома) в разных частях здания имеет подобный спектр. Анализ виброграмм (см. рис. 2) показывает, что колебания происходят в одной фазе. Горизонтальная y -компонента (поперечная) отличается в разных частях здания, причем нижняя частота, наблюдаемая на датчике в 7-м подъезде здания, существенно отличается от двух других. Это свидетельствует о влиянии повреждений здания между вторым (Д2) и третьим (Д3) датчиками.

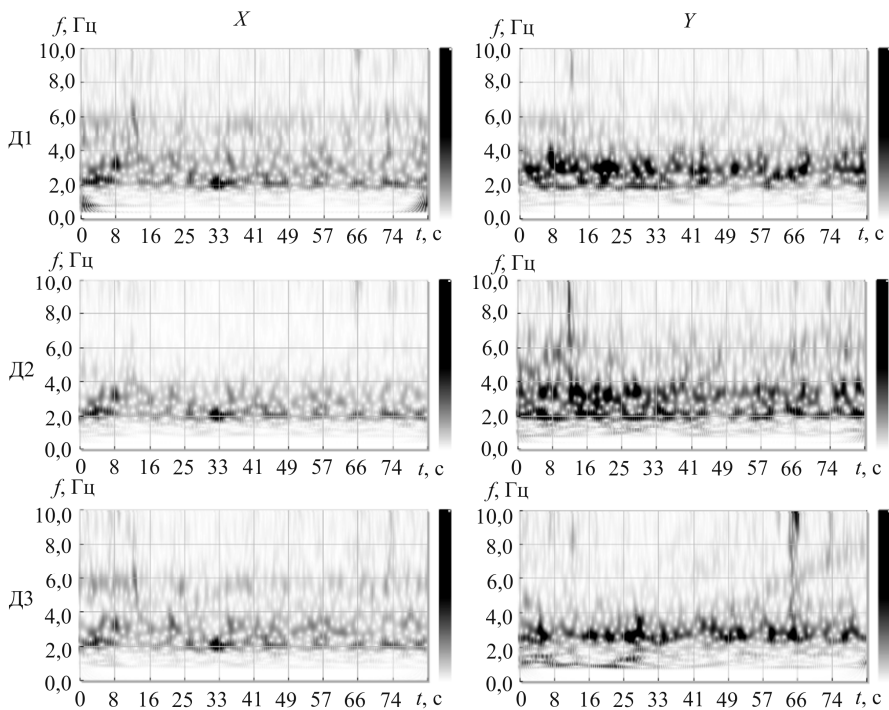


Рис. 2. Вейвлет-спектр компонент виброперемещений на крыше здания

Для проведения длительных вибродиагностических мониторинговых наблюдений один трехкомпонентный велосиметр был помещен в грунт в геометрической середине здания на глубину порядка 1 м. В процессе эксплуатации системы вибродиагностического мониторинга периодически (2 раза в сутки) регистрировались колебания с датчика, который располагался в грунте в подвальном помещении здания. Были получены результаты измерений за период с ноября 2007 г. по апрель 2010 г.

Приведем типичные осциллограммы с сейсмометра и их вейвлет-спектры в диапазоне частот 0,5–10 Гц (рис. 3), а также в диапазоне 0,01–2 Гц (рис. 4). С помощью анализа тоновых значений вейвлет-спектров виброскоростей, представленных на рис. 3 и 4, можно выделить устойчивые доминирующие значения в окрестности частоты 0,2 Гц, и в интервале частот 2–3 Гц. Для более высоких частот не удастся выделить доминирующие значения частот виброскоростей.

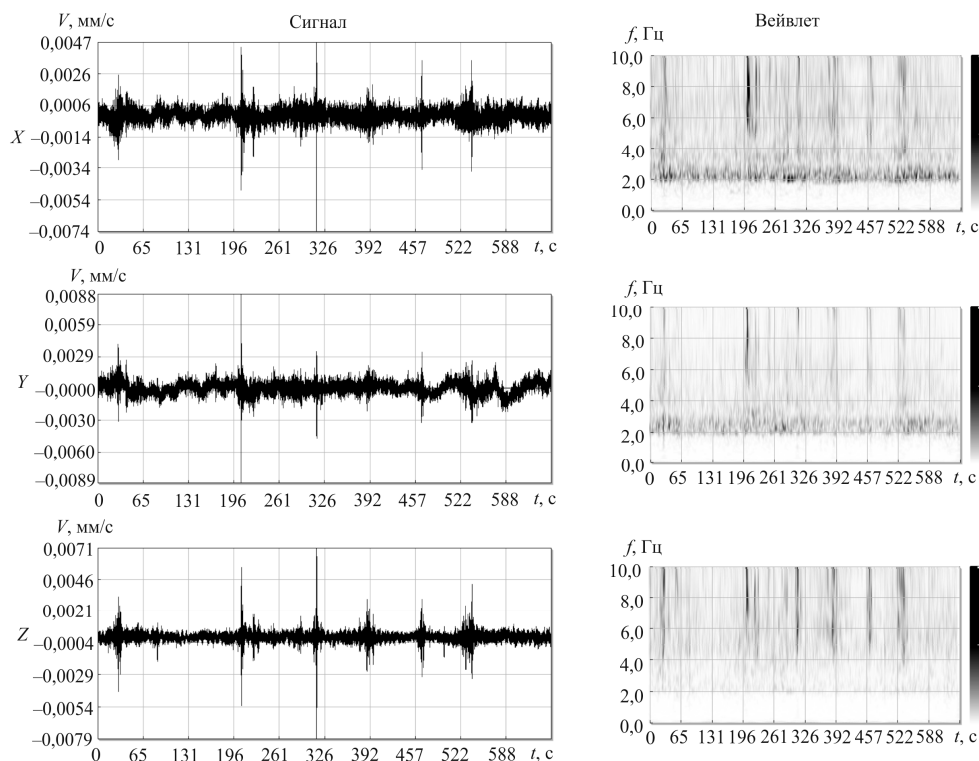


Рис. 3. Компоненты виброскоростей в месте установки датчика и соответствующие им вейвлет-спектры в диапазоне частот 0,5–10 Гц

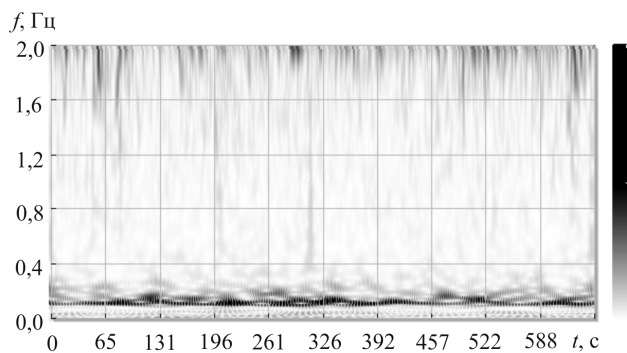


Рис. 4. Вейвлет-спектр вертикальной компоненты виброскорости в диапазоне частот 0–2 Гц

Из всего многообразия полученных вибрационных данных приведем фрагмент длительностью 10 с, на котором зафиксировано внешнее возмущение поперечной компоненты виброскорости (рис. 5). Вейвлет-спектр этого сигнала позволил установить, что доминирую-

щее значение амплитуд колебаний соответствует частотам из диапазона 2–3 Гц, как и в случае эксперимента на крыше здания. Из этого можно сделать вывод, что низшая собственная частота находится в интервале 2–3 Гц.

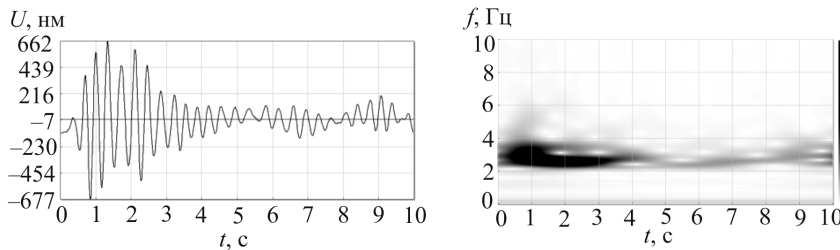


Рис. 5. Фрагмент сигнала по виброперемещениям U_y и его вейвлет-спектра при измерении в мониторинговом режиме 16.12.2009 00 ч 19 мин

Для выделения возможных корреляций динамических характеристик здания с другими факторами были построены зависимости доминирующей частоты в диапазоне 2–2,5 Гц, соответствующей максимальным амплитудам виброперемещений от времени.

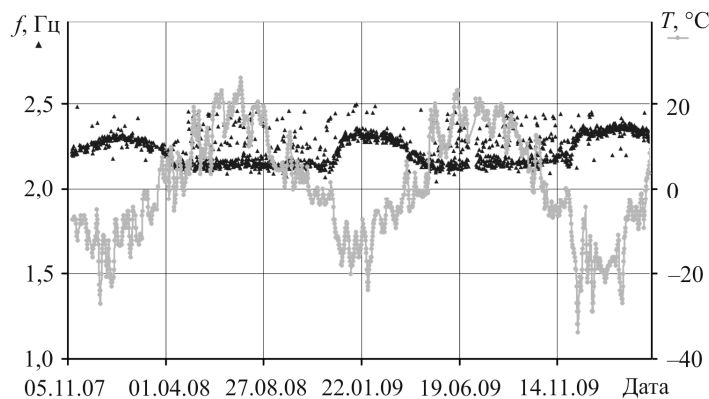


Рис. 6. Эволюция доминирующей частоты поперечной компоненты виброперемещений и температуры воздуха в процессе мониторинга

Анализируя эволюцию доминирующей частоты поперечной компоненты виброперемещений (рис. 6), можно заключить, что в диапазоне частот 2–2,5 Гц явно выделяется одна частота, которая, по всей видимости, является собственной. Можно сделать вывод, что существует зависимость собственной частоты от времени. В летний период частота практически не изменяется. В начале зимы с достижением отрица-

тельных температур частота начинает постепенно расти, а с наступлением весны постепенно снижается и достигает значений, характерных для лета. По всей видимости, на значение собственной частоты оказывает влияние промерзание грунта, которое оказывается существенным для здания со свайным фундаментом.

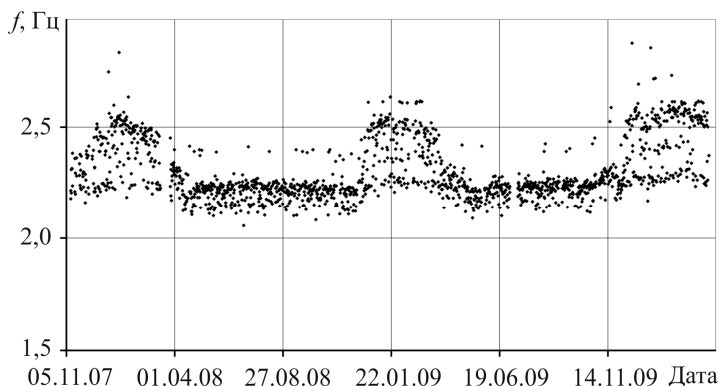


Рис. 7. Зависимость максимума частот Фурье-спектра для продольной компоненты виброперемещения в диапазоне 2–3 Гц

Наблюдая за сезонным изменением доминирующей частоты продольной компоненты виброперемещений в диапазоне 2–3 Гц (рис. 7), мы видим, что в данном диапазоне не выделяется явно одна частота. По всей видимости, существует несколько близких собственных частот. В зимний период также заметен сдвиг частот в сторону больших значений. Характерно, что в зимний период более явно выделяются две-три частоты. Одна из них совпадает с частотой y -компоненты, а другие имеют несколько меньшие и большие значения соответственно. Летом частоты расположены в более узком диапазоне.

2. Численное моделирование

Для описания сезонной эволюции собственной частоты здания была численно решена задача по определению собственных форм и частот колебания системы здание–фундамент. Для учета взаимодействия свайного фундамента с грунтом каждая свая была представлена в виде трех пружин по трем взаимно ортогональным направлениям (рис. 8).

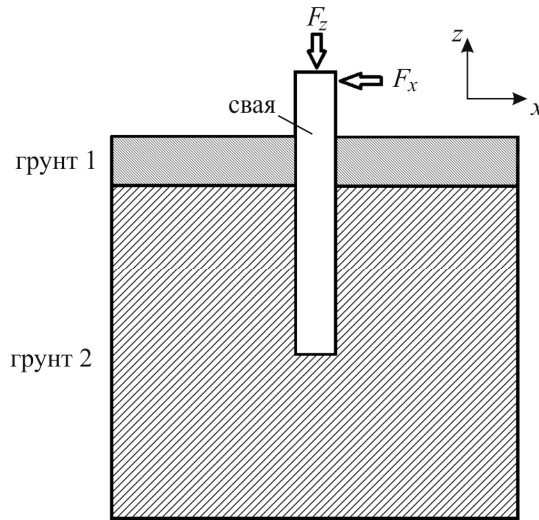


Рис. 8. Схема взаимодействия сваи с грунтом

Для оценки жесткостных свойств сваи в горизонтальных (K_x и K_y) и вертикальном (K_z) направлении решена задача о взаимодействии одиночной сваи с грунтом в рамках линейной упругой модели. Механические характеристики материалов для решения задачи оценки жесткостных свойств сваи приведены в табл. 1.

Таблица 1

Механические характеристики материалов

№ п/п	Материал	Плотность, кг/м ³	E , МПа	ν
1	Свая 10×0,3×0,3	2500	25 000	0.22
2	Грунт 1	1800	60	0.3
3	Грунт 2	1800	60	0.3
4	Бетон	2500	20000	0.22
5	Кирпичная кладка	1900	750	0.25

Следует отметить, что сваи имеют различную длину участка, расположенного между грунтом и ростверком. Так, например, для свай, расположенных в середине здания, расстояние от грунта до верха свай составляет 2 м (тип 1), а по периметру здания и с краев около 1 м (тип 2), что существенно сказывается на значения жесткостных свойств сваи.

Для рассматриваемых свай (тип 1 и тип 2) получены значения упругих коэффициентов, представленных в табл. 2. Следует отметить, что приведенные в табл. 2 значения K_x равны значениям K_y .

Таблица 2

Жесткостные свойства свай

№ п/п	Сваи	K_x , н/м	K_y , н/м
1	Тип 1 (свая на периметре здания)	2,1 E+9	8,4E+6
2	Тип 2 (центральная свая)	2,0 E+9	2,6E+6

На основе численного эксперимента по определению собственных частот в системе здание-фундамент-грунт, в котором взаимодействие свайного фундамента с грунтом было представлено в виде пружин, найдены низшие собственные частоты конструкции здания. С расчетными характеристиками, представленными в табл. 1 и 2, низшие собственные частоты конструкции здания равны 2,1–2,2 Гц, что соответствует наблюдаемым в эксперименте значениям.

Сезонное изменение собственной частоты конструкции здания связано с промерзанием грунта, что приводит к существенному изменению его механических свойств. Другими словами, промерзание грунта оказывает наибольшее влияние на характеристики свай K_x и K_y , расположенных по периметру здания. Подбор значений этих коэффициентов может описать сезонное смещение собственной частоты здания. Так, для увеличения значения K_x в 1,5 раза изменение собственной частоты конструкции здания должно составлять 10 %.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований УрО РАН № 10 (проект 12-П-1-1018).

Библиографический список

1. Корчинский И.Л. Колебания высотных зданий; Центральный институт промышленных сооружений. – М, 1953. – Вып. 11. – 44 с.
2. Вибрационный метод испытания жилых и общественных зданий / Г.А. Шапиро, Ю.А. Симон, Г.Н. Ашкинадзе [и др.]. – М.: Наука, 1972. – 160 с.
3. Пат. РФ 2141635. Российская Федерация. Способ динамических испытаний зданий и сооружений и устройство для его осуществ-

ления / Н.А. Есенина, В.И. Ларионов, М.А. Шахраманьян, Г.М. Нигметов [и др.]; заявитель и патентообладатель ТОО «Центр исследований экстремальных ситуаций». – № 99105726/28; заявл. 30.03.99; опубл. 20.11.99.

4. Аппаратура и методика сейсмических наблюдений в СССР / под ред. З.И. Аранович – М.: Наука, 1975. – 243с.

5. Dalglish W.A., Rainer J.H. Measurements of wind induced displacements and accelerations of a 57-storey building in Toronto, Canada // Proc. 3rd Colloquium Onindustrial Aerodynamics, Aachen, 14–16 June 1978. – Vol. 2. – P. 67–78.

6. Капустян Н.К., Дыховичная Н.А. Сейсмический мониторинг ветровых колебаний высотных зданий // Мониторинг небезопасных геологических процессов и экологического состояния среды; УрО РАН. – Екатеринбург-Пермь, 2005. – 225 с.

7. Юдахин Ф.Н., Капустян Н.К., Антоновская Г.Н. Инженерно-сейсмические исследования геологической среды и строительных конструкций с использованием ветровых колебаний зданий; Ин-т эколог. проблем Севера УрО РАН. – Екатеринбург, 2007. – 156 с.

8. Цветков Р.В., Шардаков И.Н. Автоматизированная система измерения неравномерности осадок сооружения // Вестник ВолгГАСУ. Строительство и архитектура. – Волгоград, 2008. – Вып. 10 (29). – С. 128–134.

9. Пат. № 2378457, Российская федерация, МПК E02D33/00. Система мониторинга здания, находящегося под действием возмущений от его фундамента / И.Н. Шардаков, В.П. Матвеевко, Р.В. Цветков, Л.А. Голотина; заявитель и патентообладатель ИМСС УрО РАН. – №2008145818; заявл. 19.11.2008; опубл. 10.01.2010.

10. Цветков Р.В., Шардаков И.Н. Моделирование деформационных процессов в системе «грунтовое основание–фундамент–здание» при наличии карстовых явлений // Вычислительная механика сплошных сред. – 2010. – Т. 3, № 3. – С. 102–116.

11. Salawu O.S. Detection of structural damage through changes in frequency: a review // Engineering Structures. – 1997. – Vol. 19 (9). – P. 718–723.

12. The observed wander of the natural frequencies in a structure / J.F. Clinton, C.S. Bradford, T.H. Heaton, J. Favela // Bulletin of Seismological Society of America. – 2006. – Vol. 96(1). – P. 237–257.

13. Dynamic monitoring of a stadium suspension roof: Wind and temperature influence on modal parameters and structural response / N. Martins, E. Caetano, S. Diord, F. Magalhaes, A. Cunha // *Engineering Structures*. – 2014. – Vol. 59 – P. 80–94.

14. Yuen K.V., Kuok S.C. Ambient interference in long-term monitoring of buildings // *Engineering Structures*. – 2010. – Vol. 32. – P. 2379–2386.

15. Цветков Р.В., Шардаков И.Н. Оценка вибрационных процессов в системе «грунтовое основание–фундамент–здание» при мониторинге конструкции здания // XVII Зимняя школа по механике сплошных сред: тез. докл. Пермь, 28 февраля – 3 марта 2011 г. – Пермь–Екатеринбург, 2011. – С. 326.

16. Матвеевко В.П., Федорова В.А., Шардаков И.Н. Теоретическое обоснование возможности построения волоконно-оптической системы мониторинга деформаций земной поверхности // *Известия РАН. МТТ*. – 2013. – № 5. – С. 46–52. == Matveenکو V.P., Fedorova V.A., Shardakov I.N. Theoretical Justification of the Possibility of Constructing a Fiber-Optic Earth Surface Deformation Monitoring System // *Mechanics of Solids*. – 2013. – Vol. 48. – No. 5. – P. 520–524.

References

1. Korchinsky I.L. Kolebaniia vysoznykh zdaniy [Vibrations of high-rise buildings]. *Tsentralnyi Institut Promyshlennykh Sooruzheniy*. Moscow, 1953, vol. 11. 44 p.

2. Shapiro G.A., Simon Yu.A., Ashkinadze G.N. [et al.] Vibratsionnyi metod ispytaniia zhilykh i obshchestvennykh zdaniy [Vibrational method for testing residential and public buildings]. Moscow: Nauka, 1972. 160 p.

3. Esenina N.A., Larionov V.I., Shakhramanian M.A., Nigmatov G.M. [et al.] Sposob dinamicheskikh ispytaniy zdaniy i sooruzheniy i ustroystvo dlia ego osushchestvleniya [A method for dynamic testing of buildings and constructions and a set-up for its implementation]. *Patent RF* № 2141635. 1999.

4. Apparatura i metodika seismicheskikh nabludeniy v SSSR [Equipment and methods of seismic observations in USSR], ed. by of Z.I. Aranovich. Moscow: Nauka, 1975. P. 243.

5. Dalglish W.A., Rainer J.H. Measurements of wind induced displacements and accelerations of a 57-storey building in Toronto, Canada.

Proc. 3rd Colloquium Onindustrial Aerodynamics, Aachen, 14–16 June 1978, vol. 2, pp. 67-78.

6. Kapustian N.R., Dykhovichnaya N.A. Seismicheskii monitoring vetrovykh kolebaniy vysotnykh zdaniy [Seismic monitoring of wind-driven vibrations of high-rise buildings]. *Monitoring nebezopasnykh geologicheskikh protsessov i ekologicheskogo sostoianiia sredy*; UB of RAS. Ekaterinburg-Perm, 2005. P. 225.

7. Yudakhin F.N., Kapustian N.K., Antonovskaya G.N. Inzhenerno-seismicheskie issledovaniia geologicheskoi sredy i stroitel'nykh konstruksii s ispol'zovaniem vetrovykh kolebaniy zdaniy [Technical-seismic investigations of geological environment and constructions based on the data of wind-driven structure vibrations]. Institut ekologicheskikh problem Severa Uralskogo otdeleniya RAN, Ekaterinburg, 2007. P. 156.

8. Tsvetkov R.V., Shardakov I.N. Avtomatizirovannaia sistema izmereniia neravnomernosti osadok sooruzheniia [Automated system for measurement of structure settlement non-uniformity]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2008, vol. 10 (29), pp. 128-134.

9. Sharadakov I.N., Matveenko V.P., Tsvetkov R.V., Golotina L.A. Sistema monitoringa zdaniia, nakhodiashchegosia pod deistviem voz-mushchenii ot ego fundamenta [System for monitoring the construction under the action of foundation oscillations]. *Patent RF* no. 2378457 2010.

10. Tsvetkov R.V., Shardakov I.N. Modelirovanie deformatsionnykh protsessov v sisteme «gruntovoe-osnovanie-fundament-zdanie» pri nalichii karstovykh iavlenii [Modeling of deformation processes in the soil-foundation construction system under karstic conditions]. *Computational continuum mechanics*, 2010, vol. 3, no. 3, pp. 102-116.

11. Salawu O.S. Detection of structural damage through changes in frequency: a review. *Engineering Structures*, 1997, vol. 19 (9), pp. 718-723.

12. Clinton J.F., Bradford C.S., Heaton T.H., Favela J. The observed wander of the natural frequencies in a structure. *Bulletin of Seismological Society of America*, 2006, vol. 96(1), pp. 237-257.

13. Martins N., Caetano E., Diord S., Magalhaes F., Cunha A. Dynamic monitoring of a stadium suspension roof: Wind and temperature influence on modal parameters and structural response. *Engineering Structures*, 2014, vol. 59, pp. 80-94.

14. Yuen K.V., Kuok S.C. Ambient interference in long-term monitoring of buildings. *Engineering Structures*, 2010, vol. 32, pp. 2379-2386.

15. Tsvetkov R.V., Shardakov I.N. Otsenka vibratsionnykh protsessov v sisteme «gruntovoe osnovanie-fundament-zdanie» pri monitoringe konstruktсии zdaniia [Estimation of vibrational processes in the soil-foundation-construction system during monitoring of the construction state] // *XVII Zimniaia shkola po mekhanike sploshnykh sred* (XVII Winter School on continuum mechanics), Perm, February 28 – March 3, 2011. Perm-Ekaterinburg, 2011. P. 326.

16. Matveenkov V.P., Fedorova V.A., Shardakov I.N. Theoretical Justification of the Possibility of Constructing a Fiber-Optic Earth Surface Deformation Monitoring System. *Mechanics of Solids*, 2013, vol. 48, no. 5, pp. 520-524.

Об авторах

Корепанов Валерий Валерьевич (Пермь, Россия) – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник отдела комплексных проблем механики деформируемых твердых тел Института механики сплошных сред УрО РАН (614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1, e-mail: kvv@icmm.ru).

Цветков Роман Валерьевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, научный сотрудник отдела комплексных проблем механики деформируемых твердых тел Института механики сплошных сред УрО РАН (614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1, e-mail: flower@icmm.ru).

About the authors

Valeriy V. Korepanov (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Physical and Mathematical Sciences, Research associate, Department of Complex Problems of Mechanics of Deformable Bodies, Institute of Continuous Media Mechanics, Ural Branch of RAS (1, Akademik Korolev st., 614013, Perm, Russian Federation, e-mail: kvv@icmm.ru).

Roman V. Tsvetkov (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Research associate, Department of Complex Problems of Mechanics of Deformable Bodies, Institute of Continuous Media Mechanics, Ural Branch of RAS (1, Akademik Korolev st., 614013, Perm, Russian Federation, e-mail: flower@icmm.ru).

Получено 03.04.2014

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Корепанов В.В., Цветков Р.В. Сезонные изменения собственных частот колебаний здания на свайном фундаменте // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2014. – № 2. – С. 153–167.

Please cite this article in English as:

Korepanov V.V., Tsvetkov R.V. Seasonal changes in eigenfrequencies of structures supported on pile foundations. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2014. No. 2. P. 153-167.