

УДК 624.04:699.842

ВОЛГИН ГЕРМАН АЛЕКСАНДРОВИЧ, аспирант,
volginga@gmail.com
РОЖКОВ АЛЕКСАНДР ФЕДОРОВИЧ, канд. техн. наук, доцент,
labsfu@yandex.ru
ИНЖУТОВ ИВАН СЕМЕНОВИЧ, докт. техн. наук, профессор,
ivaninzhutov@gmail.com
ГОНЧАРОВ ЮРИЙ МИХАЙЛОВИЧ, докт. техн. наук, профессор,
isi.pzien@sfu-kras.ru
Сибирский федеральный университет,
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79

ЧИСЛЕННО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КРУПНОПАНЕЛЬНОГО ЗДАНИЯ

В статье приведены результаты физического эксперимента по методу стоячих волн и численных исследований собственных частот и форм колебаний крупнопанельного здания. Физический эксперимент позволил определить значения частот собственных колебаний здания, а также их формы. Сравнение результатов экспериментально полученных данных и различных конечно-элементных моделей позволило прийти к выводу о значительном влиянии на динамические характеристики здания жесткости грунтового основания. Кроме того, было установлено, что различные локальные дефекты (снижение жесткости основания на отдельном участке, снижение жесткости отдельных элементов конструкции) не оказывают существенного влияния на частоты и формы колебаний крупнопанельного здания.

Ключевые слова: модальный анализ; собственные колебания; крупнопанельное здание.

GERMAN A. VOLGIN, Research Assistant,
volginga@gmail.com
ALEKSANDR F. ROZHKOV, PhD, A/Professor,
labsfu@yandex.ru
IVAN S. INZHUTOV, DSc, Professor,
ivaninzhutov@gmail.com
YURIY M. GONCHAROV, DSc, Professor,
isi.pzien@sfu-kras.ru
Siberian Federal University,
79, Svobodnyi Ave., 660041, Krasnoyarsk, Russia

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF DYNAMIC PARAMETERS OF LARGE-PANEL BUILDING

This paper presents results of the physical experiment the standing wave method and numerical investigations of eigenfrequencies and vibration modes of large-panel buildings. The physical experiment allows determining the natural the building eigenfrequencies and vibration modes. The obtained experimental findings are compared with the different finite element models of the building that allows detecting the factors having an effect on the dynamic char-

acteristics of the large-panel building. Additionally, it is shown that the different local defects (reduction of foundation at a separate area rigidity and that of the structural elements) do not have a significant effect on eigenfrequencies and vibration modes of large-panel buildings.

Keywords: modal analysis; eigenfrequency; large-panel building.

В рамках спектральной теории одним из важных факторов, определяющих реакцию объекта на динамическое воздействие, являются его динамические параметры. Это связано с явлением резонанса, поскольку максимальные дефекты в здании могут возникнуть при совпадении одной из частот его собственных колебаний с частотой внешнего воздействия.

В нормативной документации расчетам собственных колебаний уделяется сравнительно мало внимания, а рекомендации по расчету пространственных моделей отсутствуют.

Экспериментальное определение частот и форм собственных колебаний может использоваться при обследовании и мониторинге технического состояния зданий и сооружений, а результаты этих испытаний позволяют оценить точность различных расчетных моделей.

На первой стадии работы с помощью физических экспериментов по методу стоячих волн [1–3] определяли динамические параметры исследуемого здания.

Система регистрации здесь представляет собой многомодульную систему из трёхкомпонентных регистраторов расширенного частотного диапазона БАЙКАЛ-АСН8. В качестве сейсмоприемников использовали трехкомпонентные акселерометры А1638 (рис. 1).

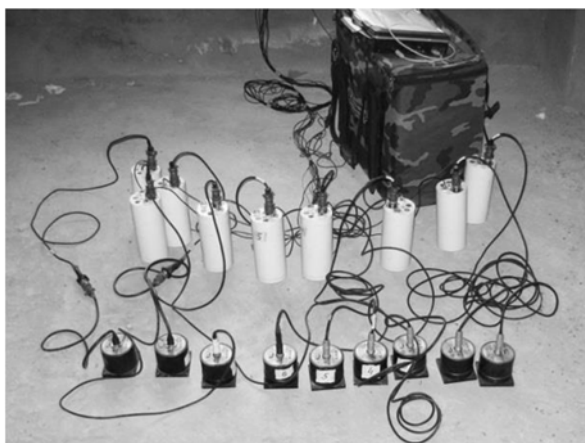


Рис. 1. Регистраторы Байкал-АСН8 с датчиками А1638

Для приведения разновременных записей к единому времени регистрации была установлена одна опорная точка (рис. 2).

Датчик в опорной точке оставался на своем месте во время всего цикла измерений. В остальных точках микросейсмические шумы регистрировали по 15 мин, после чего аппаратуру перемещали в следующие точки регистрации. Таким образом, записи сейсмических шумов в каждой временной точке соответствуют одновременные 15-минутные записи в опорной точке.

На рис. 2 и 3 приведены схемы наблюдений для записи микросейсмических колебаний блока общежития № 22, расположенного по адресу: г. Красноярск, пр. Свободный, 76д.

Жилой блок состоит из двух повторно применяемых рядовых блок-секций на базе серии 111-97. Конструктивная схема здания включает в себя поперечные и продольные несущие стены. Высота этажа 2,8 м. Обе секции планировочно связаны между собой на уровне каждого этажа.

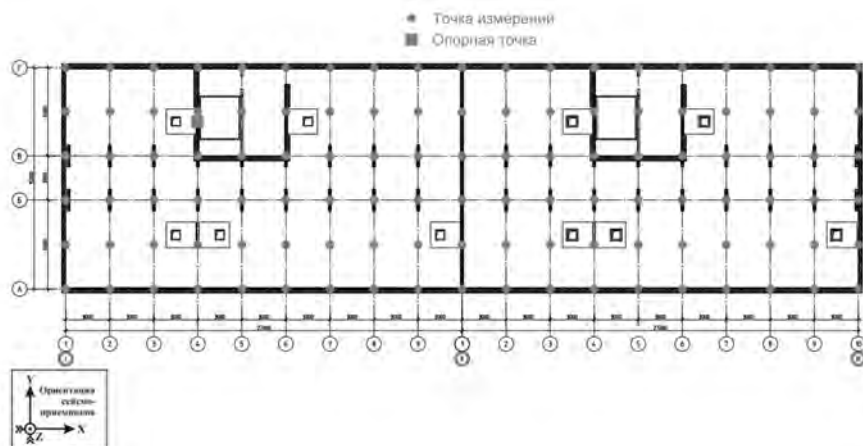


Рис. 2. Схема наблюдений для регистрации микросейсмических колебаний на техническом этаже здания



Рис. 3. Схема наблюдений для регистрации микросейсмических колебаний на типовом этаже здания

Блок-секции прямоугольные по очертанию в плане, выполнены без деформационных швов и с одинаковой относительной отметкой пола первого этажа, имеют межосевые размеры 27×15 м.

Фундаменты здания свайные. По сваям устроены монолитные железобетонные ростверки. В осях I–II сваи длиной 18 м встают на суглинок элювиальный твердый, $E = 6$ МПа. В осях II–III сваи длиной 21 м встают на глину элювиальную твердую $E = 5,5$ МПа.

Стены наружные – трехслойные керамзитобетонные с дискретными связями несущие панели по серии 111-97 толщиной 350 мм.

Стены внутренние несущие – сборные железобетонные панели серии 111-97 толщиной 160 мм. Класс бетона В15.

Перекрытия – сборные железобетонные плоские плиты серии 111-97 толщиной 160 мм. Класс бетона В20.

Кровля – кровельные плиты железобетонные, корытообразные.

Для построения взаимосвязей между точками сооружения и построения модели распространения и передачи волновых эффектов рассчитывали спектры когерентности и спектры погрешностей. Спектр когерентности является мерой линейной связи колебаний между двумя точками инженерного сооружения. Значения спектров когерентности повышаются на частотах нормальных мод и понижаются в промежутках между ними. В спектре погрешностей, наоборот, значения уменьшаются на частотах нормальных мод и повышаются в промежутках между ними. Отношение этих спектров позволяет выделить собственные частоты. На рис. 4 представлены характерные спектры.

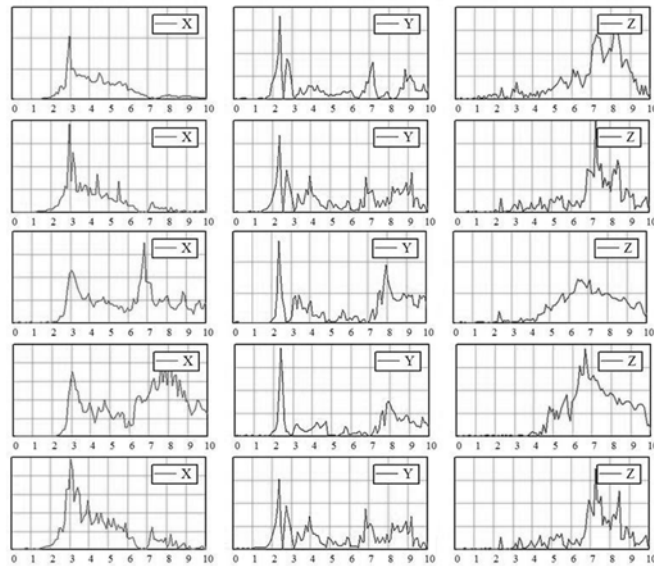


Рис. 4. Спектры когерентности, нормированные на спектры погрешности

Были выявлены три формы собственных колебаний: первая – поступательная в направлении малой оси (Y) на частоте 2,344 Гц; вторая – крутильная на частоте 2,686 Гц; третья – поступательная в направлении большей оси (X) на частоте 2,979 Гц.

Полученные данные о частотах и формах собственных колебаний являются отправной точкой для последующего мониторинга технического состояния здания, а также для анализа результатов расчета.

Вторая стадия работы заключалась в создании численной модели обследованного здания. Конечно-элементную модель данного здания создавали

с использованием ПК SCAD (рис. 5). Стеновые панели и плиты перекрытий моделировали четырехугольными и треугольными пластинами (КЭ-42, 44 в структуре ПК SCAD).

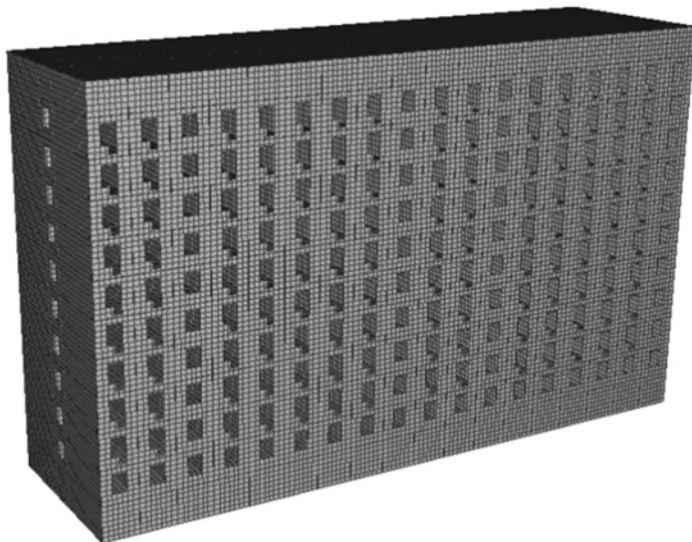


Рис. 5. Пространственная модель здания

На первом этапе расчет производили, моделируя «жесткую заделку» основания. Было создано три модели: первая – с жестким соединением панелей между собой; вторая – с шарнирным соединением панелей, задаваемым при помощи упругих связей (КЭ-55); третья – с заданием податливости стыковых соединений панелей. Податливость стыковых соединений смоделировали в соответствии с рекомендациями [4–8]. В результате расчета для всех трех моделей формы колебаний оказались одинаковыми (рис. 6, 7). Значения частот приведены в табл. 1.

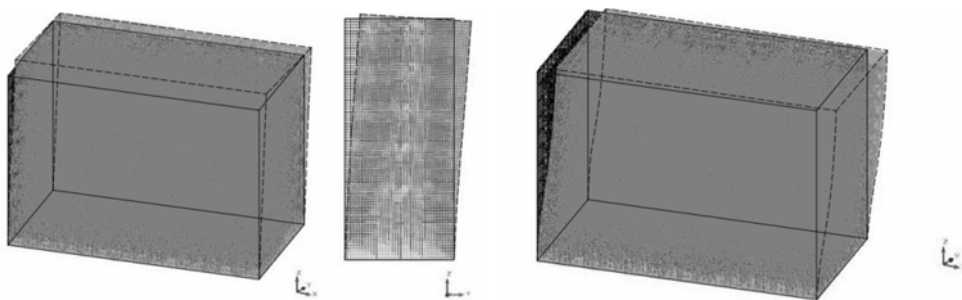


Рис. 6. Первая и вторая формы колебаний

С экспериментальными значениями сравнивались первые три формы колебаний, поскольку следующие, более высокие формы, экспериментальным путем выявлены не были.

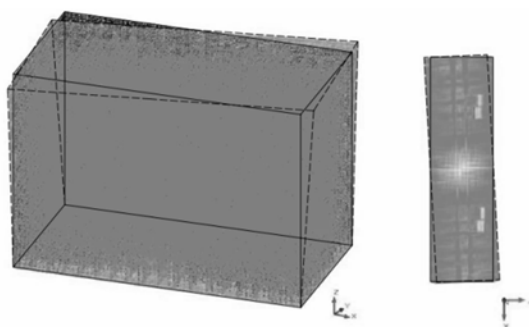


Рис. 7. Третья форма колебаний

Таблица 1

Результаты расчета здания с жесткой заделкой основания

Форма колебаний	Частота, Гц		
	Сопряжение панелей между собой		
	Шарнирное	Жесткое	Податливое
Первая	4,057	4,058	3,939
Вторая	4,418	4,417	4,629
Третья	4,681	4,735	4,885
Расхождение с физическим экспериментом, %	73,08	73,12	68,05
	48,31	48,27	55,38
	74,27	76,28	81,97
Среднее расхождение, %	65,22	65,89	68,43

Отклонение от экспериментально полученных данных в 65–68 %, по мнению авторов, вызвано жесткой заделкой основания.

Следующим этапом был расчет с учетом свайного основания.

Сваи были смоделированы связями конечной жесткости (КЭ-51 в структуре ПК SCAD). Жесткость КЭ-51 вычисляли как отношение нагрузки, действующей на сваю, к осадке сваи от этой нагрузки. Жесткость элементов составила 4516 и 4787 т/м.

Как и на первом этапе, был произведен расчет трех моделей: с жестким, шарнирным и податливым соединением панелей. Формы колебаний всех трех моделей оказались идентичны моделям с «жесткой заделкой» основания (рис. 6, 7), значения частот представлены в табл. 2.

Первая форма колебаний совпадает с экспериментальными данными. Вторая форма соответствует третьей экспериментальной. Третья форма колебаний соответствует второй форме, полученной экспериментально.

Для всех трех моделей значения частот первой формы колебаний оказываются ниже экспериментальных на 22–24 %.

Известно, что динамические свойства грунтов зависят от вида динамических воздействий [9, 10]. Точные данные возможно получить путем проведения соответствующих изысканий.

Таблица 2

Результаты расчета с учетом податливости основания

Форма колебаний	Частота, Гц		
	Сопряжение панелей между собой		
	шарнирное	шарнирное	шарнирное
Первая	1,835	1,836	1,775
Вторая	3,050	3,033	3,031
Третья	3,286	3,365	3,570

В российском СП 14.13330.2011 «Строительство в сейсмических районах» отсутствовали указания по учету характеристик грунтов при расчете собственных колебаний. Однако в СП 14.13330.2014, вступившем в силу 01.07.15, этот момент был учтен: «В РДМ следует учитывать динамическое взаимодействие сооружения с основанием».

В казахстанском СНИП РК 2,03-30-2006 «Строительство в сейсмических районах» при расчете собственных колебаний допускается использовать характеристики статической жесткости грунтов, увеличенные в 10 раз, при отсутствии соответствующих экспериментальных данных.

Также в российском СП 22.13330.2011 «Основания зданий и сооружений» имеются следующие указания: «При расчете оснований высотных зданий по деформациям следует учитывать зависимость деформационных и прочностных характеристик грунтов от длительности приложения нагрузок. Модуль упругости грунта может быть получен с помощью геофизических исследований, при их отсутствии допускается принимать $E_c = 5E$ для скальных грунтов и $E_c = 8E$ для нескальных грунтов».

Ввиду отсутствия соответствующих геофизических испытаний, был произведен расчет моделей здания с жесткостными характеристиками основания, увеличенными в 8 и 10 раз. Результаты расчета приведены в табл. 3, 4.

Таблица 3

Увеличенная в 8 раз жесткость свайного основания

Форма колебаний	Частота, Гц		
	Сопряжение панелей между собой		
	шарнирное	шарнирное	шарнирное
Первая	3,004	3,014	2,920
Вторая	3,938	4,014	4,188
Третья	4,269	4,256	4,396

При десяти- и восьмикратном увеличении жесткости основания все три формы колебаний (рис. 8, 9) совпали с экспериментом. Среднее отклонение от экспериментальных значений составило 45 и 40 % соответственно. Для оценки влияния жесткости основания на динамические характеристики здания были произведены расчеты при других значениях жесткостей свайного основания для модели с шарнирным соединением панелей. Результаты представлены на рис. 10.

Таблица 4

Увеличенная в 10 раз жесткость свайного основания

Форма колебаний	Частота, Гц		
	Сопряжение панелей между собой		
	шарнирное	шарнирное	шарнирное
Первая	3,145	3,153	3,057
Вторая	4,033	4,107	4,278
Третья	4,328	4,316	4,466

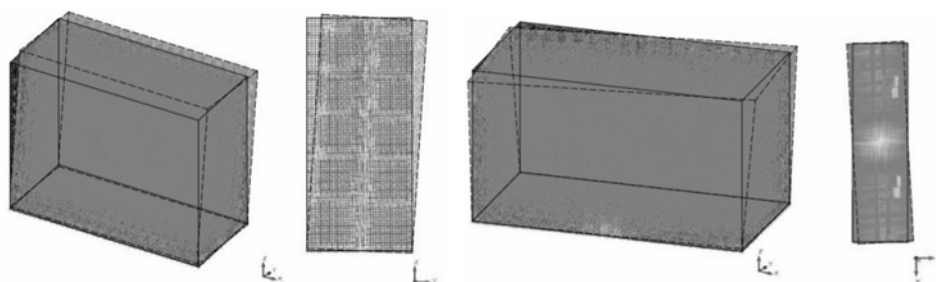


Рис. 8. Первая и вторая формы колебаний

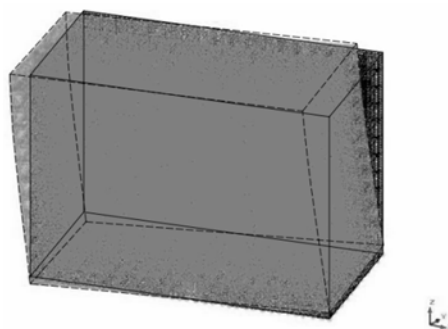


Рис. 9. Третья форма колебаний

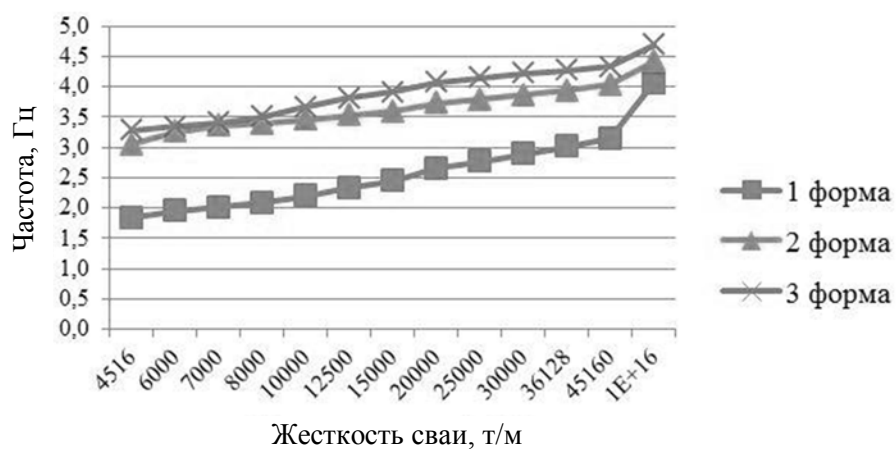


Рис. 10. Влияние жесткости основания на значения частот собственных колебаний

Для данной модели наиболее близкие к экспериментальным данным частоты собственных колебаний были получены при увеличении жесткостных характеристик свайного основания в 2–3 раза.

Также был произведен расчет с различными дефектами. Снижение модуля упругости бетона несущих конструкций на 40 % привело к снижению значений собственных частот на 15 %. Снижение жесткости свай на отдельном участке привело к изменениям менее 2 %. Удаление двух панелей в уровне первого этажа привело к изменениям менее 1 %.

Выводы

1. Изменение жесткости основания влияет как на собственные частоты здания, так и на формы его колебаний. Для получения корректных данных необходим учет податливости основания.

2. Независимо от жесткости основания, различие между моделями с жестким и шарнирным соединением панелей составило менее 1 %. Модель с учетом податливости стыков отличается от них менее чем на 3 %.

3. Динамические параметры (частота и форма собственных колебаний) крупнопанельного здания являются достаточно стабильными характеристиками. Их изменение более чем на 10 % возможно при существенном увеличении податливости основания либо при существенном снижении жесткости большого количества несущих элементов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Пересчет стоячих волн* при детальном сейсмологических исследованиях / А.Ф. Еманов, В.С. Селезнев, А.А. Бах, С.А. Гриценко, А.И. Данилов, А.П. Кузьменко, В.С. Сабуров, Г.И. Татков // Геология и геофизика. – 2002. – Т. 43. – № 2. – С. 192–207.
2. Пат. № 2150684, Российская Федерация. Способ приведения к единому времени регистрации разновременных записей регистрации / В.С. Селезнев, А.Ф. Еманов, А.П. Кузьменко, В.Г. Барышев, В.С. Сабуров. – 2000. – Бюл. № 33.
3. Пат. № 2140625, Российская Федерация. Способ определения физического состояния зданий и сооружений / В.С. Селезнев, А.Ф. Еманов, А.П. Кузьменко, В.Г. Барышев, В.С. Сабуров. – 1999. – Бюл. № 30.
4. Шапиро, Г.И. К вопросу о построении расчетной модели панельного здания / Г.И. Шапиро, Р.Ю. Юрьев // Промышленное и гражданское строительство. – 2004. – № 12. – С. 32–33.
5. Шапиро, Г.И. Расчет зданий и сооружений в МНИИТЭП / Г.И. Шапиро, А.А. Гасанов, Р.В. Юрьев // Промышленное и гражданское строительство. – 2007. – № 6. – С. 31–33.
6. Данель, В.В. Напряженно-деформированное состояние платформенных стыков крупнопанельных зданий с учетом изгибающих моментов от плит перекрытий / В.В. Данель, И.Н. Кузьменко // Бетон и железобетон. – 2010. – № 4. – С. 19–22.
7. Данель, В.В. Параметры 3D-стержней, моделирующих стыки в конечноэлементных моделях / В.В. Данель // Жилищное строительство. – 2012. – № 5. – С. 22–27.
8. Данель, В.В. Определение жесткостей платформенных стыков / В.В. Данель // Жилищное строительство. – 2012. – № 2. – С. 32–35.
9. Цытович, Н.А. Механика грунтов (краткий курс) / Н.А. Цытович. – М. : Высшая школа, 1983. – 288 с.
10. Ишихара, К. Поведение грунтов при землетрясениях : пер. с англ. / К. Ишихара ; под ред. А.Б. Фадеева, М.Б. Лисюка. – СПб. : НПО «Геореконструкция-Фундамент-Проект», 2006. – 384 с.

REFERENCES

1. *Emanov A.F., Seleznev V.S., Bakh A.A., Gritsenko S.A., Danilov A.I., Kuz'menko A.P., Saburov V.S., Tat'kov G.I.* Pereschet stoyachikh voln pri detal'nykh seismologicheskikh issledovaniyakh [Recalculation of standing waves]. *Geology and Geophysics*. 2002. V. 43. No. 2. Pp. 192–207. (rus)
2. *Seleznev V.S., Emanov A. F., Kuz'menko A.P., Baryshev V.G., Saburov V.S.* Sposob privedeniya k edinomu vremeni registratsii raznovremennykh zapisei registratsii [A method of reduction of asynchronical time of recording to universal]. Pat. Rus. Fed. N 2150684. Publ. 10.06.2000. Bul. No. 33. (rus)
3. *Seleznev V.S., Emanov A.F., Kuz'menko A.P., Baryshev V.G., Saburov V.S.* Sposob opredeleniya fizicheskogo sostoyaniya zdaniy i sooruzheniy [A method of identification of physical state of buildings]. Pat. Rus. Fed. N 2140625. Publ. 27.10.1999. Bul. No. 30 (rus)
4. *Shapiro G.I., Yur'ev R.Yu.* K voprosu o postroenii raschetnoi modeli panel'nogo zdaniya [Design model of panel building]. *J. Industrial and Civil Engineering*. 2004. No. 12. Pp. 32–33. (rus)
5. *Shapiro G.I., Gasanov A.A., Yur'ev R.Yu.* Raschet zdaniy i sooruzheniy v MNIITEP [Building design]. *J. Industrial and Civil Engineering*. 2007. No. 6. Pp. 31–33. (rus)
6. *Danel' V.V., Kuz'menko I.N.* Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie platformennykh stykov krupnopanel'nykh zdaniy s uchetom izgibayushchikh momentov ot plit perekrytiy [Stress-strain state of panel joints of buildings accounting for bending moments due to floor panels]. *Beton i zhelezobeton*. 2010. No. 4. Pp. 19–22. (rus)
7. *Danel' V.V.* Parametry 3D-sterzhnei, modeliruyushchikh styki v konechnoelementnykh modelyakh [3D bar parameters for joint finite element modeling]. *Housing Construction*. 2012. No. 5. Pp. 22–27. (rus)
8. *Danel' V.V.* Opredelenie zhestkosti platformennykh stykov [Detection of rigidity of platform joints]. *Housing Construction*. 2012. No. 2. Pp. 32–35. (rus)
9. *Tsytoich N.A.* Mekhanika gruntov [Soil mechanics]. 1983. (rus)
10. *Ishihara K.* Povedenie gruntov pri zemletryaseniyyakh [Soil behaviour in earthquake geotechnics]. St-Petersburg : NPO Georekonstruktsiya-Fundament-Proekt Publ., 2006. 384 p. (transl. from Jap.)