

ДИНАМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ИХ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ

*Московский государственный
строительный университет*

Завалишин Сергей Иосифович
*Директор НИИЭМ,
кандидат технических наук, профессор*

Шаблинский Георгий Эдуардович
Доктор технических наук, профессор

Зубков Дмитрий Авенирович
*Руководитель отдела сейсмостойкости сооружений НИИМосстрой,
кандидат технических наук*

Румянцев Антон Андреевич
Аспирант

Как правило, для зданий и сооружений, проектируемых для строительства в районах повышенной сейсмичности, составляются специальные технические условия (СТУ), включающие, среди других, специальные конструктивные требования. При расчетах сейсмостойкости таких объектов определяются их динамические характеристики (частоты и соответствующие им формы собственных колебаний). В процессе эксплуатации зданий и сооружений их динамические характеристики могут изменяться вследствие нарушения проектных связей между элементами конструкций, что приведет к уменьшению их сейсмостойкости. Таким образом, осуществляя контроль за динамическими характеристиками строительных конструкций (динамический мониторинг), можно контролировать состояние их сейсмостойкости. Такой динамический мониторинг особенно важно проводить для особо ответственных объектов, к которым можно отнести высотные здания, большепролетные конструкции различных спортивных сооружений, строительные конструкции энергетических объектов и др. Методика проведения такого мониторинга может быть различной. Это может быть постоянный мониторинг при стационарной установке специальных виброизмерительных приборов; периодический мониторинг при установке приборов на время проведения измерений. При этом определение собственных колебаний строительных конструкций может производиться за счет выделения их из регистрации фоновых колебаний возбуждаемых ветровыми нагрузками, работой различного оборудования, прохождением вблизи объекта различного вида транспорта. Однако, как показывает практика, наиболее эффективные и полные результаты дает динамический мониторинг с использованием специальной вибромашины направленного действия. В качестве примера, ниже приведены результаты комплексного мониторинга жилого дома возведенного в районе 9-балльной сейсмичности.

Исследованию подлежали две секции 16-этажного здания объемно-блочной конструкции. Общая длина здания составила 48,2 м, высота 44,8 м, ширина 14,46 м. Фундаментная конструкция здания представляет свайный ростверк (свайное поле из железобетонных свай, связанное по верху железобетонной плитой). Общий вид здания в период испытаний представлен на рис.1.



Рис.1. Общий вид здания в период испытаний

На основании общего и собственного опыта проведения таких испытаний были приняты следующие схемы размещения первичных измерительных приборов на здании:

- по высоте посередине длины здания: отметка пола на 1-м этаже – Т1, отметка пола на 7-м этаже – Т2, отметка пола на 13-м этаже – Т3, верхняя отметка 16-го этажа – Т4;
- на верхней отметке 16-го этажа: в четырех точках по длине здания – Т5, Т4, Т6, Т7. Схемы размещения приборов на здании представлены на рис.2. В экспериментах изучались горизонтальные поперечные, горизонтальные продольные и вертикальные колебания здания. В качестве первичных приборов использовались маятниковые магнитоэлектрические велосиметры.

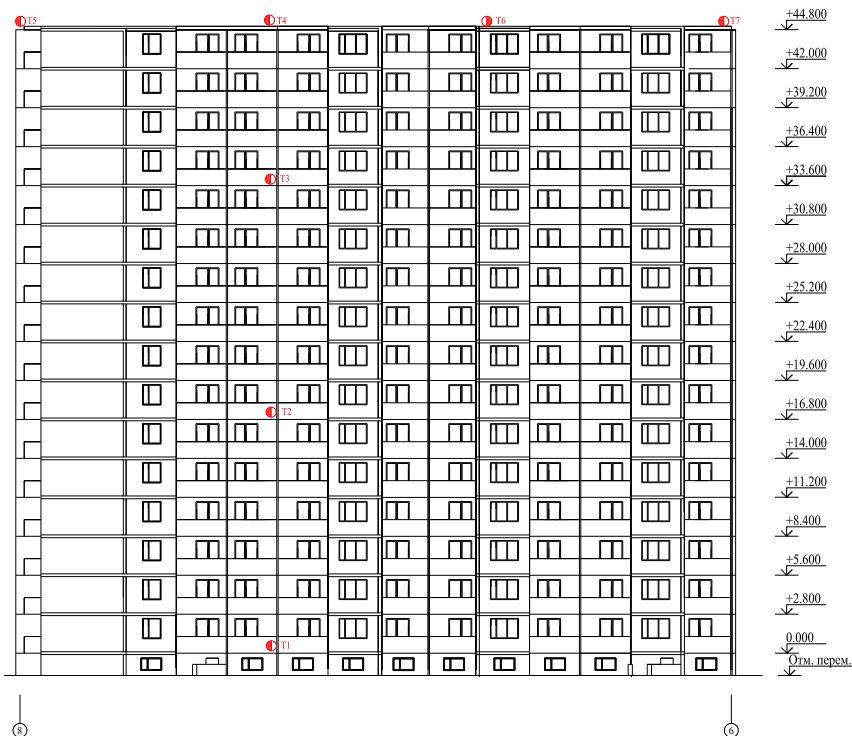


Рис.2. Схема размещения приборов на здании

Вибромашина дебалансного типа направленного действия (рис.3) размещалась на специальном железобетонном фундаментном блоке в пяти метрах от здания (рис.4). Она могла развивать нагрузку до 3000 кН в диапазоне частот 0,5 Гц – 20,0 Гц. В нашем случае с помощью вибромашины было произведено сканирование по частоте в диапазоне 0,5 Гц – 5,0 Гц и по характеру записей были определены резонансные частоты. Затем последовательно на этих частотах вибромашина работала некоторое время в установившемся режиме и делались записи колебаний здания, по которым строились формы колебаний.

Результаты записей поперечных колебаний здания, создаваемых вибромашинной, в режиме набора оборотов до 1,0 Гц и последующего сброса оборотов представлены на рис.5. Характерными для этих записей является резонансное возбуждение колебаний здания на частоте 1,0 Гц при очень слабых силах, создаваемых вибромашинной (12 грузов на валу).



Рис.3. Общий вид вибромашины, подготовленной к испытаниям здания

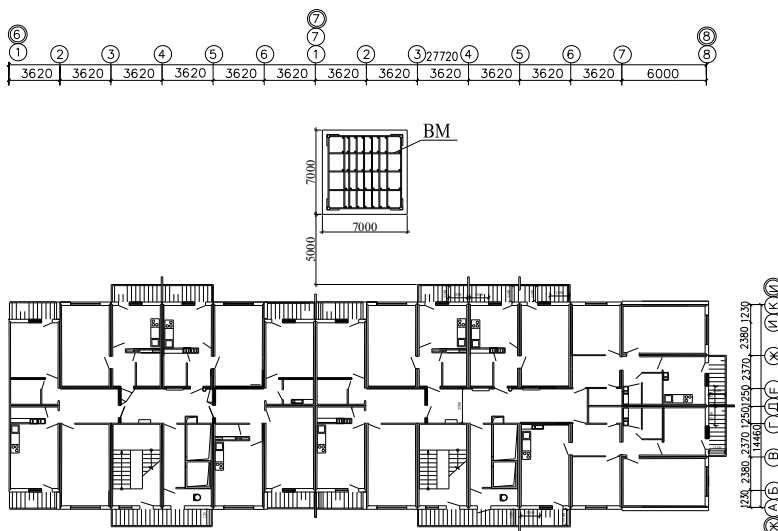


Рис.4. План-схема размещения вибромашины относительно здания

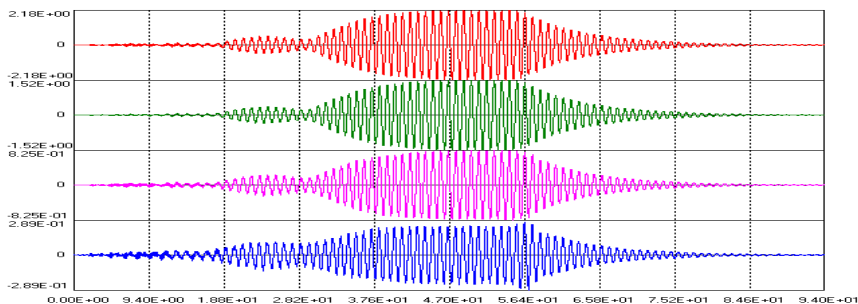
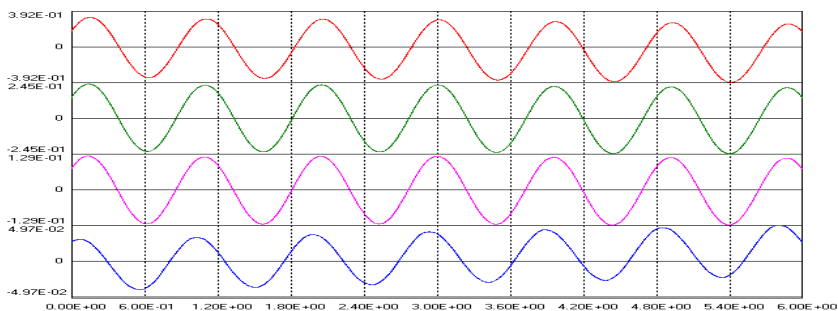


Рис.5. Запись поперечных колебаний по высоте здания (мм/с); сверху вниз: эт.16, эт.13, эт.7, эт.1

Фрагмент записи смещений полученных интегрированием функции скоростей при установившемся режиме работы вибромашины на частоте 1,0 Гц приведен на рис.6. Построенная по смещениям форма колебаний приведена на рис.7.

Аналогичным образом были построены формы колебаний на резонансных частотах 4,2 и 4,6 Гц (рис.7).

Эксперименты показали, что кроме направленного действия вибраторы создают и концентрические сейсмические волны, вызывающие и продольные колебания здания. Полученные две формы продольных колебаний и соответствующие им частоты приведены на рис.8.



Краснодар-2007, ф.216, фрагмент записи смещений (мм) поперечных колебаний по высоте здания при частоте 1,0 Гц; сверху вниз: эт.16, эт.13, эт.7, эт.1.

Рис.6. Фрагмент записи смещений по высоте здания на частоте 1,0 Гц при двенадцати грузах на валу вибромашины

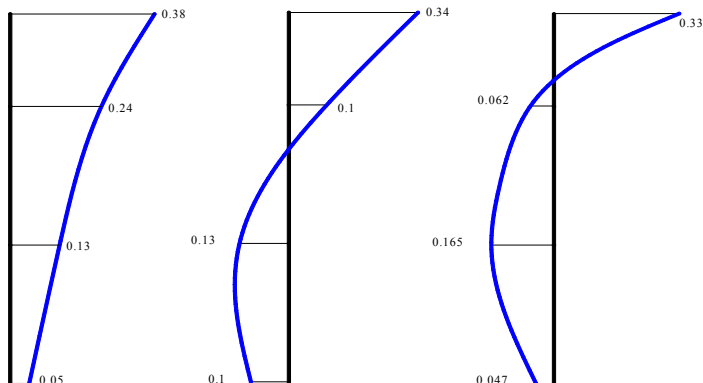


Рис.7. Формы поперечных смещений (мм) по высоте здания (для частот 1,0; 4,2 и 4,6 соответственно)

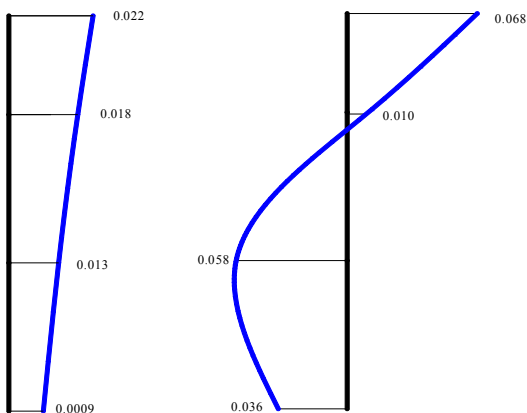


Рис.8. Формы продольных колебаний здания в смещениях (мм) на частотах 1,4 и 4,6 Гц, полученные при возбуждении колебаний вибромашиной (12 грузов на валу)

Результаты измерений фоновых поперечных колебаний здания приведены на рис.9. На рис.9 представлены фрагмент записи смещений и спектральные плотности по высоте здания. В результате получены чистые свободные колебания здания на частоте 1,1 Гц. При этом максимальные амплитуды смещений не превышали 5 мкм на 16-м этаже и 0,6 мкм на 1-м этаже здания.

Предотвращение аварий зданий и сооружений

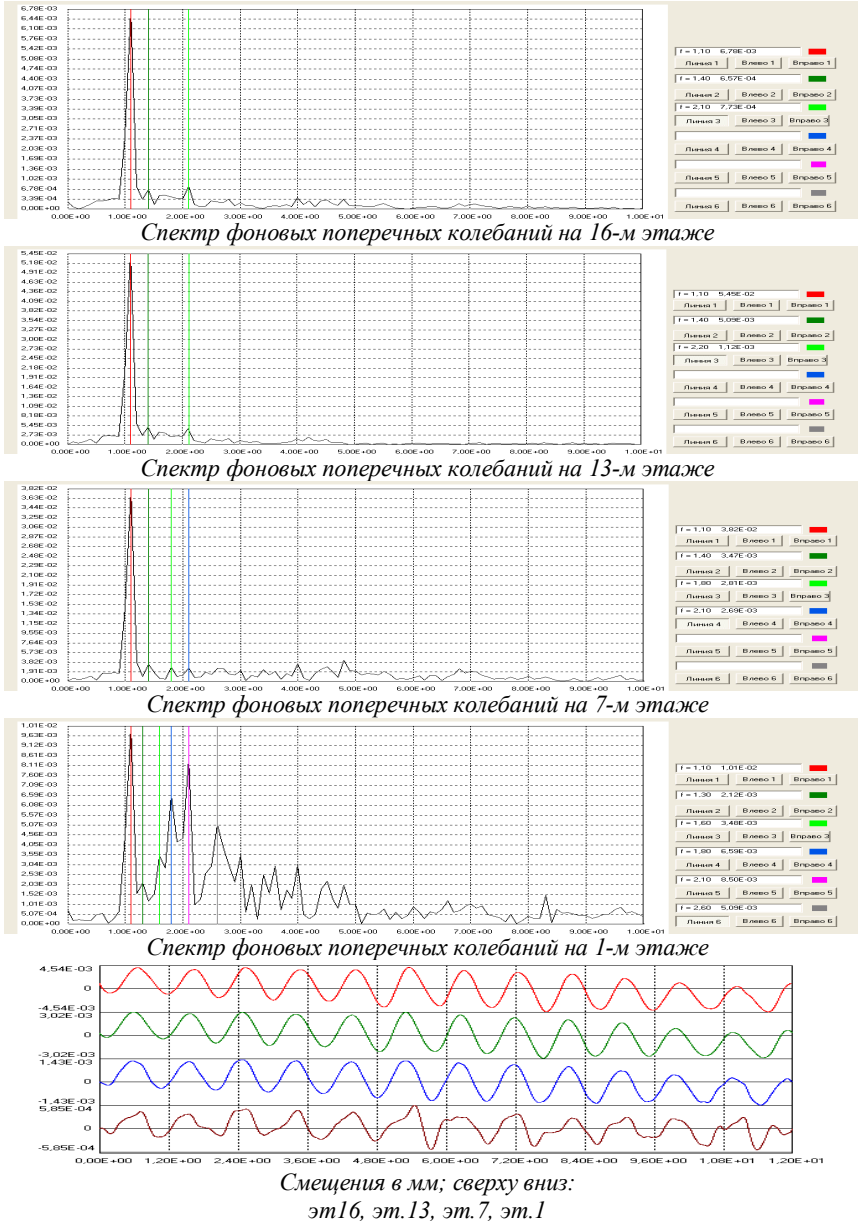


Рис.9. Фрагмент записи смещений фоновых поперечных колебаний по высоте здания и соответствующие спектральные плотности полной записи

При анализе полученных экспериментальных результатов были использованы следующие документы:

- строительные нормы и правила (СНиП-II-7-81, издание 2000 года);
- спектры ускорений максимальных расчетных землетрясений, построенные для города Краснодара в «Центре службы геодинамических наблюдений в электроэнергетической отрасли (ЦСГНЭО)».

В результате динамических испытаний здания с использованием вибромашины получены амплитуды ускорений и смещений по его высоте и длине. Динамические нагрузки от вибромашины к зданию передавались через грунт основания, т.е. путем моделирования сейсмического эффекта. При этом колебания основания здания можно рассматривать как сейсмические колебания, отличающиеся от реального землетрясения гармоническим характером воздействия. Такой характер воздействий при плавном сканировании по частоте позволил выделить резонансные частоты, т.е. определить частоты и формы собственных колебаний здания. Определив частоты собственных колебаний здания и создавая от вибромашины сейсмические эффекты на этих частотах (в резонансном режиме), были получены значения ускорений и смещений, как основания, так и в ряде точек самого здания. Эти значения ускорений и смещений для здания были экстраполированы затем на максимальные расчетные землетрясения путем частичного использования СНиП II.7-81 (издание 2000 года) и спектров ускорений, полученных в ЦСГНЭО для города Краснодара.

Согласно СНиП, расчетная сейсмическая нагрузка, приложенная к точке k и соответствующая i -му тону собственных колебаний здания определяется по формуле

$$S_{ik} = K_1 S_{oik},$$

где K_1 – коэффициент, учитывающий допускаемые повреждения здания и принимаемый по табл.3;

S_{oik} – значение сейсмической нагрузки для i -го тона собственных колебаний здания в предположении упругого деформирования конструкции определяется по формуле (в нашем случае эта величина не вычислялась, а непосредственно учтена в эксперименте);

$K_1 = 0,22$ согласно п.2 таблицы 3 СНиП (здания и сооружения, в конструкциях которых могут быть допущены остаточные деформации и повреждения, затрудняющие нормальную эксплуатацию, при обеспечении безопасности людей и сохранности оборудования, возводимые из железобетонных крупнопанельных или монолитных конструкций).

В результате для каждой частоты собственных колебаний здания по табл.1 были получены значения коэффициентов, на которые следовало умножить ускорения и смещения, полученные в эксперименте, чтобы получить реакцию здания на воздействие максимального расчетного земле-

Предотвращение аварий зданий и сооружений

трясения. Спектры ускорений максимальных расчетных землетрясений для Краснодара (по данным ЦСГНЭО для г. Краснодар) приведены в табл.1. Ускорение, полученное по табл.1 для данной частоты собственных колебаний здания, делилось на ускорение основания в конкретном эксперименте на той же частоте. Полученный коэффициент умножался на $K_1=0,22$ и затем на значения ускорений и смещений в эксперименте. Результаты таких расчетов приведены в табл.2 и 3.

Значения ускорений и смещений по высоте здания для максимальных расчетных землетрясений приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 1

№ п/п	f, Гц	Спектры ускорений, м/с ²		№ п/п	f, Гц	Спектры ускорений, м/с ²	
		a ₁	a ₂			a ₁	a ₂
1	0,25	0,20	0,74	14	3,5	1,21	0,798
2	0,5	0,67	0,25	15	3,7	1,66	0,764
3	0,75	1,71	0,50	16	4,0	1,76	0,686
4	1	1,37	1,55	17	4,2	2,36	0,787
5	1,2	1,19	1,78	18	4,5	2,77	0,985
6	1,5	2,11	1,31	19	4,7	2,49	0,984
7	1,7	2,09	1,37	20	5,0	2,54	0,979
8	2,0	2,09	1,40	21	5,2	2,85	1,33
9	2,2	1,57	1,29	22	5,5	3,35	1,63
10	2,5	1,12	1,21	23	5,7	3,9	1,53
11	2,7	1,21	1,19	24	6,0	3,97	1,24
12	3,0	1,24	1,01	25	6,2	3,27	1,06
13	3,2	1,16	0,865				

Жирным выделены частоты и ускорения, использованные в расчете здания на максимальное расчетное землетрясение.

Таблица 2

Отметка в метрах	Спектр	Частоты собственных поперечных колебаний							
		f ₁ = 1,0 Гц		f ₂ = 2,3 Гц		f ₃ = 3,8 Гц		f ₄ = 4,2 Гц	
		a, см/с ²	A, см	a, см/с ²	A, см	a, см/с ²	A, см	a, см/с ²	A, см
44,8	a ₁	160,6	3,5	93,3	0,82	96,4	0,16	138,8	0,200
	a ₂	180,6	4,0	76,5	0,67	44,0	0,07	46,2	0,067
33,6	a ₁	114,4	2,5	20,7	0,07	35,2	0,06	35,5	0,056
	a ₂	129,6	2,8	16,9	0,06	16,0	0,03	11,7	0,018
16,8	a ₁	64,2	1,4	- 20,7	- 0,07	- 26,6	- 0,4	- 65,0	- 0,11
	a ₂	72,6	1,6	- 16,9	- 0,05	- 12,2	- 0,02	- 21,6	- 0,04
0,0	a ₁	30,1	0,46	-34,5	- 0,15	- 36,5	- 0,06	- 51,9	- 0,08
	a ₂	34,1	0,53	-28,4	- 0,13	- 16,7	- 0,03	- 17,3	- 0,03

Таблица 3

Отметка в метрах	Спектр	Частоты собственных продольных колебаний			
		$f_1= 1,4$ Гц		$f_2= 4,6$ Гц	
		a , см/с ²	A , см	a , см/с ²	A , см
44,8	a_1	111,4	1,02	111,1	0,100
	a_2	69,1	0,63	43,8	0,040
33,6	a_1	92,8	0,83	35,5	0,015
	a_2	57,6	0,52	14,0	0,006
16,8	a_1	69,6	0,60	- 75,5	- 0,085
	a_2	43,2	0,37	- 28,9	- 0,034
0,0	a_1	46,4	0,42	- 54,8	- 0,053
	a_2	28,8	0,26	- 21,6	- 0,021

В табл.2 приведены значения ускорений и смещений при максимальных расчетных землетрясениях силой 9 баллов с очагами средней дальности (a_1) и отдалёнными очагами (a_2) в поперечном направлении к зданию, на 4-х отметках по его высоте и для четырех частот собственных колебаний. Низшей частоте $f_1= 1,0$ Гц соответствует первая консольная форма колебаний; остальным частотам (f_2, f_3, f_4) соответствует по характеру вторая консольная форма колебаний, но это разные формы по распределению ускорений и смещений. Они отражают преобладание разных видов деформаций на каждой частоте (деформации изгиба, сдвига, поступательных смещений на упругом основании с изгибом и сдвигом). Логарифмический декремент колебаний был определён для низшей частоты поперечных колебаний по свободным затухающим колебаниям здания и составил $\delta = 0,05$. Это очень небольшая величина затухания для строительных конструкций и связано это, по нашему мнению, с одной стороны с особенностями самой конструкции здания, состоящего из жестких объемных блоков, с другой стороны – с относительно небольшими амплитудами колебаний здания.

В табл.3 приведены значения ускорений и смещений при максимальных расчетных землетрясениях силой 9 баллов с очагами средней дальности (a_1) и отдалёнными очагами (a_2) в продольном направлении к зданию, на четырех отметках по его высоте и для двух частот собственных колебаний. Низшей частоте $f_1= 1,4$ Гц соответствует первая консольная форма колебаний; второй частоте $f_2= 4,6$ Гц соответствует вторая консольная форма колебаний.

Значения ускорений, приведенные в таблицах, могут быть использованы для расчета нагрузок и напряжений в здании от сейсмических воздействий. Объемно-блочная конструкция здания не позволяет, однако, использовать здесь упрощенные расчеты его напряженного состояния, а расчеты с использованием современных программных комплексов не

входили в программу этой работы. Поэтому оценка сейсмостойкости здания была проведена на основе анализа максимальных смещений, полученных в экспериментах и экстраполированных на максимальное расчетное землетрясение. Эти смещения приведены в табл.2 и 3. Из них следует, что максимальное горизонтальное относительное смещение для поперечных колебаний здания, имело место на отметке 44,8 м и составило 3,5 см, а для продольных колебаний соответственно 1,02 см. Это смещение в первом случае составляет $7,8 \cdot 10^{-4}$, а во втором случае $2,3 \cdot 10^{-4}$ от высоты здания, что намного меньше допускаемых прогибов для различных конструкций (СНиП-2.01.07-85*, «Нагрузки и воздействия», раздел 10.7, табл.19). Следует при этом особо отметить, что поперечные смещения здания по первой форме определяются в основном покачиванием его как жесткого тела на упругом основании, т.е. не связаны с деформациями его конструктивных элементов.

Очевидно, что при столь незначительных смещениях имеют место только упругие деформации здания, не представляющие опасности для его прочности.

При расчетах сейсмостойкости зданий очень важно построить расчетную схему адекватную реальной конструкции. Современные программные комплексы позволяют решать задачи практически любой сложности, но результаты расчета могут сильно зависеть от того насколько точны факторы заложенные в расчетную схему (характеристики материала конструкций и грунтового основания, характеристики связей между элементами конструкций и др.). Практика показывает, что часто заложенные в проекте динамические характеристики сооружения существенно отличаются от замеренных в натуре, а значит и сейсмические нагрузки были определены с большой погрешностью. Отсюда возникает важная проблема идентификации расчетных схем реальной работе натуральных конструкций и ретроспективная оценка их сейсмостойкости, а также накопление опыта в этом направлении для минимизации отклонений расчетных схем от реальных зданий и сооружений.

Библиографический список

1. Исайкин А.С., Шаблинский Г.Э. Ретроспективная оценка сейсмостойкости особо ответственных сооружений на основе их натуральных динамических испытаний. Промышленное и гражданское строительство. №8. –М.: Стройиздат. 1997.
2. Оценка и прогнозирование состояния инженерных сооружений на основе натуральных исследований их динамических характеристик / Г.Э. Шаблинский, С.И. Завалишин, И.В. Жаворонок, Д.А. Зубков. // Сб. тр. «Промышленное и гражданское строительство». – М.: МГСУ 2000.

3. Исследования динамических явлений в инженерных сооружениях и конструкциях / Г.Э. Шаблинский, С.И. Завалишин, Е.М. Швей, И.В. Жаворонок, Д.А. Зубков // Сборник «Экспериментальная механика». – М.: МГСУ. 2001.
4. К использованию специальной мощной вибромашины для исследования динамических явлений в строительных конструкциях / С.И. Завалишин, В.В. Кузнецов, Е.М. Швей, Д.А. Зубков // Сборник «Экспериментальные методы исследования напряжений и деформаций». – М.: МГСУ. 1999.
5. Оценка и прогнозирование состояния инженерных сооружений на основе натурных исследований их динамических характеристик / Завалишин С.И., Шаблинский Г.Э., Жаворонок И.В., Зубков Д.А. // Сборник прикладных научно-технических работ областного факультета «Промышленное и гражданское строительство». –М.: МГСУ. 2000.
6. Исследования динамических явлений в инженерных сооружениях и конструкциях / Г.Э. Шаблинский, С.И. Завалишин, Е.М. Швей, И.В. Жаворонок, Д.А. Зубков // Сборнике«Экспериментальная механика». –М.: МГСУ. 2001.