

УДК 550.34:69.032.22

*Н.К. КАПУСТЯН, д-р физ.-мат. наук, А.Н. КЛИМОВ, инженер,
ОАО «Центральный научно-исследовательский и проектный институт жилых
и общественных зданий (ЦНИИЭП жилища)» (Москва); Г.Н. АНТОНОВСКАЯ, канд. техн. наук,
Институт экологических проблем Севера УрО РАН (Архангельск)*
*N.K. KAPUSTYAN, A.N. KLIMOV, Honored Builder of Russia, (TSNIIEP) (Moscow);
G.N. ANTONOVSKAYA, Institute of Ecological Problems of the North,
Ural Branch of Russian Academy of Science*

Высотные здания: опыт мониторинга и пути его использования при проектировании Monitoring of high-rise buildings as an important asset for the construction design

Рассмотрен опыт инструментального мониторинга конструкций высотных зданий с использованием сейсмометрических методов. На экспериментальных примерах показаны новые возможности, позволяющие инженеру на стадии проектирования прогнозировать поведение конструкции после ее возведения. Приведенные материалы могут быть использованы на практике в качестве примеров решения достаточно распространенных задач оценки воздействий, а также лечь в основу научно-исследовательских разработок по выявлению фундаментальных законов работы конструкций.

New applications of seismometric monitoring of high-rise buildings are demonstrated by several experimental examples. The resulting data allows predict of construction behavior. In practice this method can be employed for the common task of impact estimation or in fundamental construction researches.

Ключевые слова: высотное здание, сейсмометрический мониторинг, вибровоздействия, собственные колебания, динамический расчет.

Key words: high-rise building, seismometric monitoring, vibrations, eigenfrequencies, dynamical calculation.

Изучение состояния и закономерностей работы несущих конструкций ответственных сооружений, к которым относятся высотные здания, а также использование полученных знаний в практике проектирования является залогом надежности и безопасности их функционирования. Всякая новация в строительстве при применении на практике проходит ряд стадий, в том числе исследования на моделях, образцах, натурных стендах вплоть до постановки специальных наблюдений при возведении и эксплуатации. Ярким примером последнего являются эксперименты профессора И.Л. Корчинского при строительстве высотных домов в Москве в 1950-х гг. – изучались ветровые воздействия на здания и было доказано, что в основном несущие конструкции массивных сооружений работают на сдвиг.

Возрождение практики высотного строительства в Москве сопровождалось принятием нормативных требований оснащения зданий датчиками инструментального мониторинга, причем не только для традиционного контроля осадок и кренов, но и для наблюдений колебаний сейсмометрами (МГСН 4.19–2005). Более чем десятилетний опыт высотного строительства с сопровождением его мониторингом, в том числе и сейсмометрическим, привел к некото-

The safety and reliability of complex constructions as industrial objects or high-rise buildings depends on a thorough research of the construction behavior of existing buildings. The research results can be incorporated into the design process only after several stages: model study including natural objects and the monitoring of a construction process. A good example is a series of experiments of Prof. I.L. Korchinsky performed during the construction of high-rise buildings in Moscow in 1950-s. The studied impact of a wind has shown that structures of such buildings are mostly under the action of lateral force.

The current renaissance of high-rise construction was conducted with an introduction of new safety building codes that prescribe instrumental monitoring devices to be installed. The traditional position displacement gauges are been installed but also the seismometers are now mandatory (Moscow state building codes – МГСН 4.19–2005). The 10-year experience of high-rise construction accompanied with monitoring (including seismometrical) lead to several corrections of the initial safety building codes. However, the main point prescribing all-stages construction monitoring (including raising and demolition) stayed unchanged (Federal law – ФЗ №384). While the monitoring during the raising or exploitation phase has obvious

рой корректировке нормативов, но осталось главное – требование проведения мониторинга ответственных сооружений на всех этапах, от проектирования до сноса (Закон РФ от 30.12.2009 № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений»). Если выполнение мониторинга для строящегося и существующего здания допускает различные приемы, его цели понятны, то задачи мониторинга на стадии проектирования не столь очевидны. Несомненно, проект мониторинга, определяющий подбор и размещение датчиков в здании, является составной частью комплекта проектной документации, но есть и другие задачи.

Приведем примеры задач мониторинга, которые могут решаться при проектировании. Их можно разделить на две категории: практические – обеспечивающие безопасность здания, и научно-исследовательские – определяющие выбор того или иного конструктивного решения. К последним, в качестве примера, относятся работы по моделированию поведения грунтов основания по их характеристикам, полученным при инженерно-геологических изысканиях на площадке строительства. Накапливаемые при этом научные представления, особенно подтвержденные геотехническим мониторингом [1–3], обогащают строительную науку. Круг проблем большой, остановимся на возможностях менее распространенного вида мониторинга – сейсмометрического для решения практических и научно-исследовательских задач.

Оценка вибровоздействий на проектируемое здание. Высотное строительство в основном ведется в крупных городах, для которых характерны специфические динамические воздействия, из них рассмотрим два: влияние на проектируемое здание колебаний соседних сооружений и воздействие вибраций от транспорта, в частности от метрополитена неглубокого заложения. Учет влияния поясним экспериментальными примерами из практики проектирования.

Пример 1. Влияние на здание колебаний соседних сооружений проиллюстрируем на примере оценки воздействий существующего Ленинградского моста через канал им. Москвы на здание, проектируемое на расстоянии примерно 200 м от него (рис. 1). Эффект усиления колебания здания при наведении на него колебаний от соседнего моста обнаружен при экспериментальном сейсмометрическом изучении собственных частот Башни-2000 в Москва-Сити [4]. Было показано, что расположенный рядом мост «Багратион», развязанный от здания конструктивно, но связанный по грунтам основания, способен наводить на башню колебания, амплитуда которых может превышать значения собственных колебаний башни. Обнаружено, что собственные частоты моста и здания различны, т. е. нет явления резонанса.

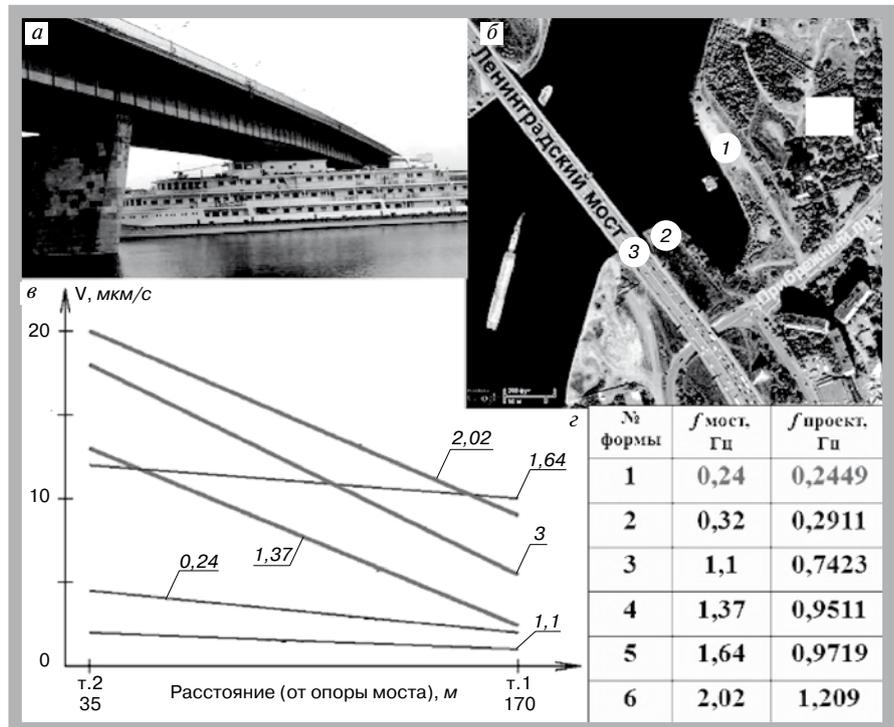


Рис. 1. Сейсмометрическое обследование вибровоздействия моста на проектируемое высотное здание: фото моста (а) и спутниковая карта (б) с точками наблюдений (цифры) и площадкой строительства (квадрат); графики ослабления амплитуд колебаний с расстоянием (в) и таблица сравнения наблюдаемых и расчетных частот колебаний (з). На графике: цифры – значения частот пиков, цвет линий соответствует типу волн: синий – поверхностных, красный – объемных

Fig. 1. The seismometric study of the vibrational influence of the bridge on the future high-rise building: a photo of the bridge (a) and a satellite map (b) with measurement points marked by numbers, square – a future construction site; vibrations amplitudes plotted versus distance (v) and a table with the experimental and simulated vibration frequencies (z). The numbers in graph denote the frequency values. Blue lines are the surface seismic waves and red – body ones

purposes, the task of a monitoring during the project design is not so obvious. Clearly, a project includes the special monitoring design documentation that contains the devices placement and their technical requirements, however this is not a monitoring itself.

The goals of the project-stage monitoring can be split into two groups: the practical one secures safety of an object and the research one aims at the development of a solution for the various constructional designs. The latter includes for example a modeling of the soil behavior using the parameters from the geological investigations at the construction site. Results obtained in such a research can bring new scientific insights especially if confirmed by a geotechnical monitoring [1–3]. Since the amount of objectives is large we focus on a specific monitoring type, namely seismometric.

Estimation of vibrational impact on a building in a project stage. The high-rise buildings are mostly built in large cities and thus have several specific circumstances impacts. The most prominent is an impact of the oscillations produced by a) neighboring objects and b) nearby transport routes including subway lines. The estimation of this impact is demonstrated with the following practical design examples.

Example 1. Constructions mutual interaction. The high-rise building was planned to be built in ~200 m from Leningrad bridge in Moscow (Fig. 1). In our practice was a similar example – Tower-2000 in Moscow-city was built near the “Bagration” bridge, and there was a seismometric observation system installed in

Учитывая возможность резонанса при проектировании здания вблизи Ленинградского моста, выполнены сейсмометрические наблюдения, схема которых показана на рис. 1. Датчики (акселерометры CMG-5T) располагались под мостом у опоры, и последовательным перемещением одного из них был пройден профиль вплоть до предполагаемого места строительства. Необходимость прохождения профиля состояла в следующем. Во-первых, для того, чтобы правильно отделить на получаемой записи собственные колебания моста от прочих сейсмических сигналов. Процедура состоит в расчете спектров мощности записи, выделении пиков спектра (резонансов), расчете их амплитуды и определении законов ослабления амплитуды с удалением от моста. Таким способом из набора пиков спектра были выделены несколько характеризующихся ослаблением с расстоянием, что указывало на принадлежность их постоянно присутствующим колебаниям моста (из-за прохождения транспорта, ветровых пульсаций и пр.).

Во-вторых, изучались закономерности ослабления амплитуд с расстоянием, что выявило две тенденции, характерные для объемных и поверхностных волн (рис. 1). Таким образом, собственные колебания моста через опоры «уходят» в грунты в виде смеси двух типов сейсмических волн с набором характерных частот. Определение типов волн, различающихся траекториями движения частиц при колебаниях, существенно при расчете сейсмических воздействий.

Наблюдаемые значения частот сопоставлялись с величинами, полученными при расчетах собственных колебаний проектируемого здания. Обнаружено, что 1-я форма колебаний дома практически совпадает с собственными колебаниями моста. Был выполнен расчет конечно-элементной модели здания на сейсмические воздействия, задаваемые в виде акселерограммы (программа «Лира»[®]), причем в качестве исходной акселерограммы взяты экспериментальные записи, полученные на площадке строительства. Расчетная картина перемещений (рис. 2) дает наибольшие значения 0,004 мм на верхних этажах, пересчет в ускорения на наведенной частоте, совпадающей с собственной для здания, дает 0,01 мм/с², что существенно ниже допустимых по СП 20.13330.2011 СНиП 2.01.07–85* «Нагрузки и воздействия» (80 мм/с²). Сравнение расчетных параметров динамики здания (перемещений, ускорений) при наведенных колебаниях и при ветровых воздействиях (40 мм/с²) показывает, что ветер оказывает существенно большее влияние на здание, чем вибрации. Приведенный пример демонстрирует, что наведение колебаний от соседних сооружений может представлять опасность не всегда, а при специфических условиях – очень близком расположении зданий и сооружений, особенностях конструктивных схем и пр.

Пример 2. Влияние на проектируемое высотное здание метрополитена неглубокого заложения рассмотрим на примере высотного корпуса, планируемого в 100 м от ветки метро вблизи ст. Мякинино в Москве. На площадке предполагаемого строительства проведены сейсмометрические наблюдения с той же аппаратурой, что в предыдущем примере. На рис. 3 представлены характерные акселерограммы, полученные на грунте площадки для случая двух идущих навстречу поездов, регистрация по трем компонентам (вертикальной и горизонтальным – вдоль линии метро и вкост ее).

Для оценки воздействий рассчитывался спектр записи и затем пересчитывался в скорости смещений (V) с учетом того, что добавочные напряжения $\sigma \sim V$. Сравнение со спек-

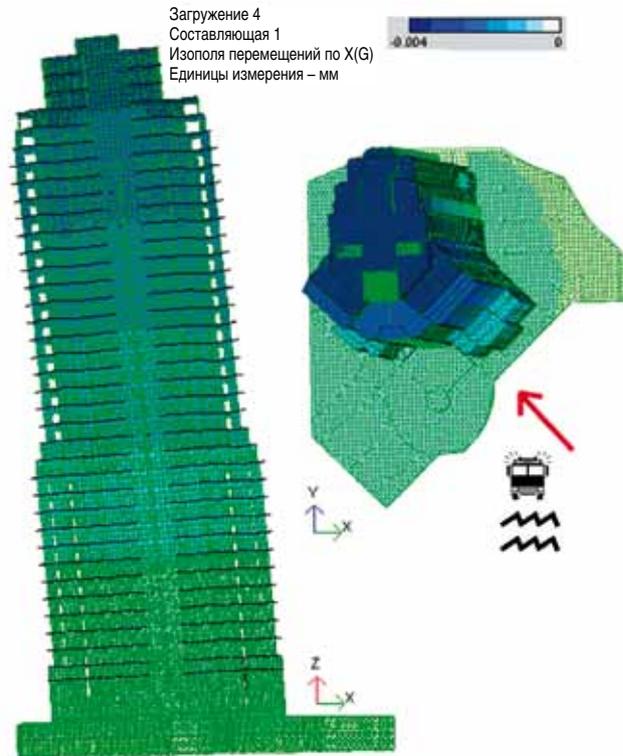


Рис. 2. Фасад и план высотного здания, показывающие перемещения по результатам расчетов его модели на вибровоздействие от моста (направление показано стрелкой)

Fig. 2. The simulation of the high-rise building reaction to the vibrational load generated by the bridge. The arrow gives the direction of vibrational waves

it. The study of tower eigenfrequencies revealed that the oscillations of the bridge amplified the characteristic vibrations of the tower [4]. It was demonstrated that the “Bagration” bridge despite having no structural connection to the tower can induce via soil oscillations with magnitude higher than the inherent to the tower. Luckily, frequencies were not congruent so no resonance took place.

To account for possible resonances of the construction planned near Leningrad bridge a seismic study was conducted at points shown on plan in Fig. 1. CMG-5T accelerometers [5] were placed – one under the bridge near the support and the other moved stepwise along the profile towards the future construction site. This profile was performed to resolve several issues. Firstly, it was needed to separate the bridge oscillations from other seismic signals. The procedure involves power spectra calculation and plotting of resonance-peak amplitudes versus distance to the bridge. Those peaks that are decreased with distance were attributed to the bridge oscillations, though the origins of impacts could be different (due to traffic, wind blows, etc.). Secondly, the law of amplitude decreasing was studied, body and surface waves were identified (Fig. 1). The conclusion is that bridge oscillations are radiated into the soil as a mix of two groups of seismic waves with the specific eigenfrequencies. The identification of wave type (body or surface ones) is important for a calculation of seismic oscillations impact.

The comparison of bridge eigenfrequencies with the ones calculated for the building design shows the bridge eigenfrequency congruent with one for the building’s first form. The finite elements calculation was made with “Lira” software and

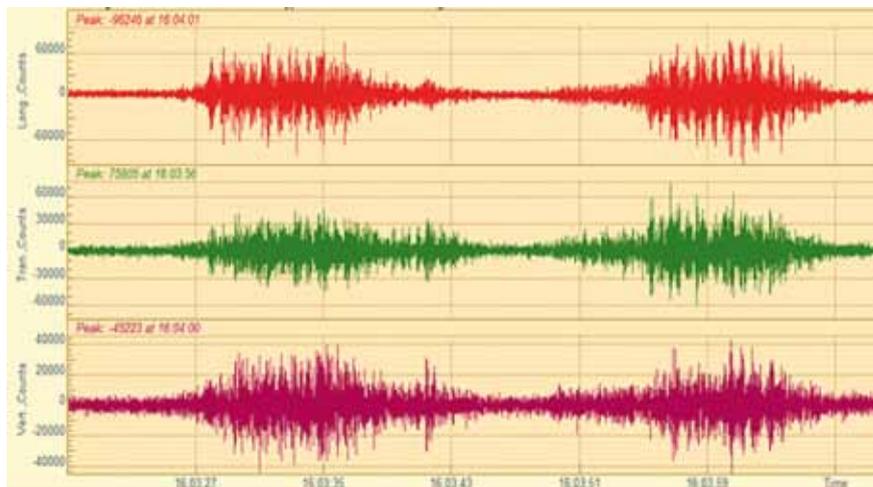


Рис. 3. Типичная акселерограмма для двух встречных поездов легкого метро, запись на грунте по компонентам: вертикальной (внизу) и горизонтальным – вдоль линии метро (в центре) и вкрест ее (вверху)

Fig. 3. The typical accelerogram for the case of two subway trains moving in both directions. The measurement was performed on surface for the components: vertical (bottom) and two horizontal – along (middle) and transverse (top) the subway line

тром для участков записи вне прохождения поезда показывает, что подъем спектра на частотах около 7 Гц и в полосе 20–50 Гц (с максимумом примерно 40 Гц) соответствует частотам вибраций от метро. Отметим, что пик на частоте примерно 7 Гц (точнее $f=6,64$ Гц) определяется диаметром колеса вагона ($d=860$ мм) и средней скоростью $v=65$ км/ч (18 м/с): время оборота колеса $T=\pi d/v \approx 0,15$ с пересчитывается в частоту $f=1/T \approx 6,67$ Гц. Этот пик является типичным для вибраций при движении метропоездов, его следует учитывать для сооружений с близкими по значениям собственными частотами, т. е. для небольших строений или легких конструкций, сооружаемых вблизи линий легкого метро.

В соответствии с ГОСТ Р 52892–2007 «Вибрация и удар. Вибрация зданий. Измерение вибрации и оценка ее воздействия на конструкцию» можно оценить для зданий допусти-

was planned to be built in 100 m proximity to Myakinino subway station in Moscow. The same monitoring procedure was carried out on a future construction area. The characteristic accelerograms obtained at the site are shown in Fig. 3 for the case of two trains coming in both directions. The data is presented for three components: with one vertical and two horizontal – along the subway line and across it.

To estimate the influence of the subway impact the spectra of acceleration records were calculated and convert into displacement velocities (V) considering that stresses $\sigma \sim V$. The comparison of these spectra with ones that were recorded without any train moving shows that the signal generated by the subway lies in frequency band 7 and 20–50 Hz with maximum at 40 Hz. The peak at 6.64 Hz is attributed to be specific to wagon wheels (0,86 m diameter) moving at average velocity of 65 km/h resulting in a wheel rotational period to be $T=\pi d/v \approx 0,15$ s and frequency $f=1/T \approx 6,67$ Hz. This frequency is common for subways and has to be taken into consideration for constructions with similar eigenfrequencies (i. e. small or light constructions), which are to be built near subway lines.

The acceptable velocities that are caused by vibration can be estimated for buildings according to building code ГОСТ Р 52892–2007 (“Vibrations and impact. Vibrations of constructions. Measurement of vibration and estimation of its impact on construction.”). For residential buildings these velocities should not exceed 15 mm/s and for 7 Hz – 5 mm/s in 20–50 Hz frequency band. According to Fig. 4 there is almost a tenfold reserve of how much the vibrations could rise.

This calculation was performed with excluding a possible resonance with the building oscillations and subway vibrations as frequencies differed significantly.

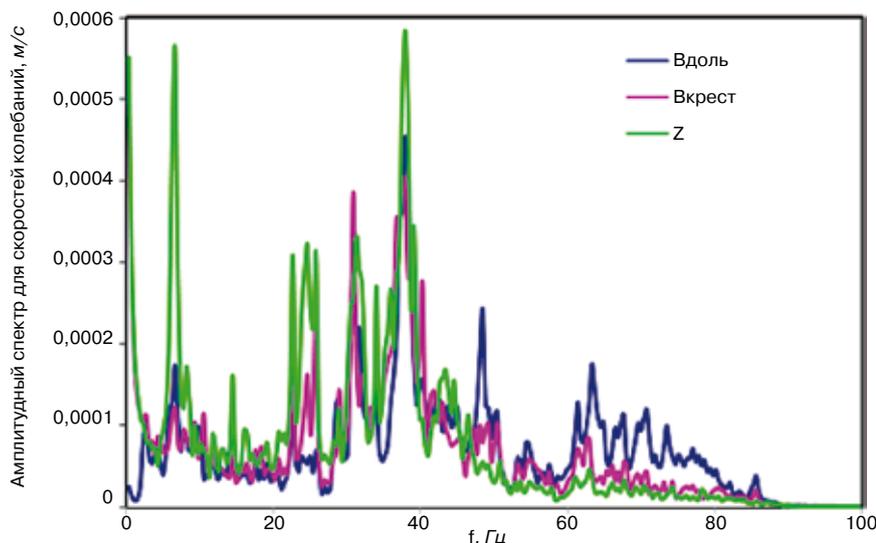


Рис. 4. Типичный амплитудный спектр скоростей смещений вибровоздействий на грунте от прохождения поезда метро

Fig. 4. The typical amplitude spectrum of displacement velocities of vibrational in soil caused by subway train passing influence

мые скорости, создаваемые вибрациями – для жилых зданий в полосе 20–50 Гц они не должны превышать 15 мм/с, для 7 Гц – 5 мм/с, т. е. согласно рис. 4 в нашем случае имеется почти 10-кратный «запас».

Этот расчет сделан без учета возможного резонанса с собственными колебаниями здания. Можно решить задачу, как и в предыдущем примере, путем расчета компьютерной модели здания по реальной акселерограмме, что и было сделано с вычислением параметров для первых 100 форм собственных колебаний. Анализ результатов модального анализа показывает, что получаемые значения собственных частот колебаний здания очень близки: при определении 100 форм колебаний удается «дойти» только до 3 Гц, что ниже доминирующих частот вибровоздействий. Данная особенность расчета связана со сложностью пространственной модели, определяющей появление многочисленных форм крутильных колебаний.

Пример этого расчета выявляет ряд проблем, из них обсудим две. Прежде всего, учитывая, что основные частоты вибраций достаточно высоки, разумно сразу перейти от здания в целом к его элементам. Так, в контексте данной задачи рассмотрено влияние вибрационных нагрузок на ограждающие конструкции. Была задана модель типовой несущей конструкции, поддерживающей элементы архитектурного оформления здания (карниза). Конструкция составлена из прокатных стальных уголков и крепится к железобетонным несущим конструкциям здания при помощи механических анкеров. Собственные частоты колебаний такой конструкции близки к частотам внешнего вибрационного воздействия, что обуславливает возникновение в ее элементах дополнительных усилий. На рис. 5 показана форма колебаний, соответствующая собственной частоте $f=51$ Гц. Максимальные усилия, возникающие в элементах данной конструкции при действии вибрации, составили около 12% усилия, возникающего при действии эксплуатационных нагрузок, что может оказать влияние на ее несущую способность. Рассмотренная конструкция является лишь иллюстрацией, показывающей влияние вибрационных нагрузок на ограждающие конструкции, применяющиеся в современных зданиях. Результаты оценочного расчета показали, что после уточнения архитектурных и конструктивных решений здания следует провести детальный анализ влияния вибрационных воздействий на применяемые ограждающие конструкции.

Вернемся к малому шагу по частотам, полученному при расчете форм колебаний. Опыт сейсмометрического обследования сооружений простых форм убедительно показывает, что близкие по значениям частоты собственных колебаний, как линейных, так и крутильных, при натуральных наблюдениях представлены в спектрах единым пиком с «промежуточной» частотой [5, 6], что является отражением реально существующих нелинейных связей конструктивных элементов. Наиболее яркие проявления этого эффекта отмечаются в исторических зданиях и памятниках архитектуры [5], но наблюдаются также и для железобетонных арочных плотин.

Для учета данного эффекта при оценке вибровоздействий от метро применен следующий прием. Была составлена эквивалентная упрощенная расчетная схема, учитывающая распределение жесткостей и масс по высоте здания. В результате расчета упрощенной модели здания на вибрационное воздействие, заданное в виде акселерограмм,

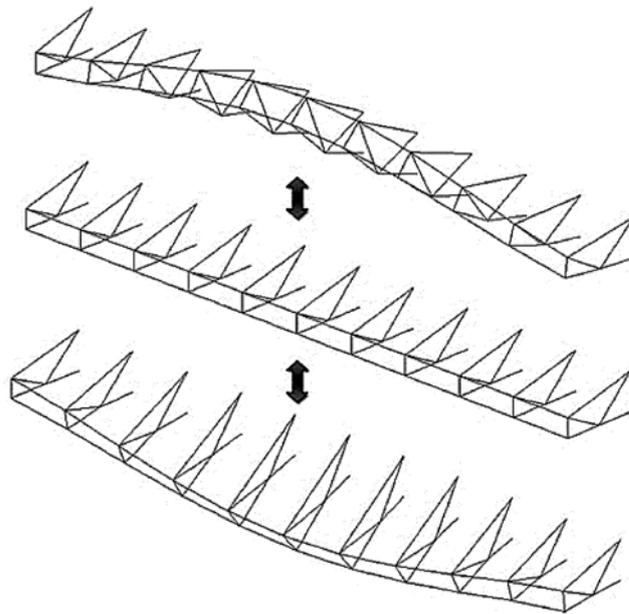


Рис. 5. Вибровоздействия от метро на проектируемое здание – картина вынужденных колебаний конструкции карниза ($f=51$ Гц)
Fig. 5. The subway-induced vibrations of the cornice ($f=51$ Hz)

A simulation with the real accelerogram taken as an initial condition similar to the one in the previous case was performed for the first 100 forms of characteristic oscillations. The modal analysis gives that the resulting building eigenfrequencies are close and the first 100 forms are still below 3 Hz, thus lower than the major external vibration frequencies. This simulation peculiarity is related to the complexity of a spatial model that defines a lot of forms of rotational vibrations.

The given example of a calculation sheds light on several problems. We will discuss two of them. First of all, it is reasonable to focus on construction elements vibration instead on



Рис. 6. Вибровоздействия от метро на проектируемое здание – низшие формы собственных колебаний эквивалентной модели здания
Fig. 6. Lower forms of characteristic oscillations of equivalent construction model with subway vibrations taken into account

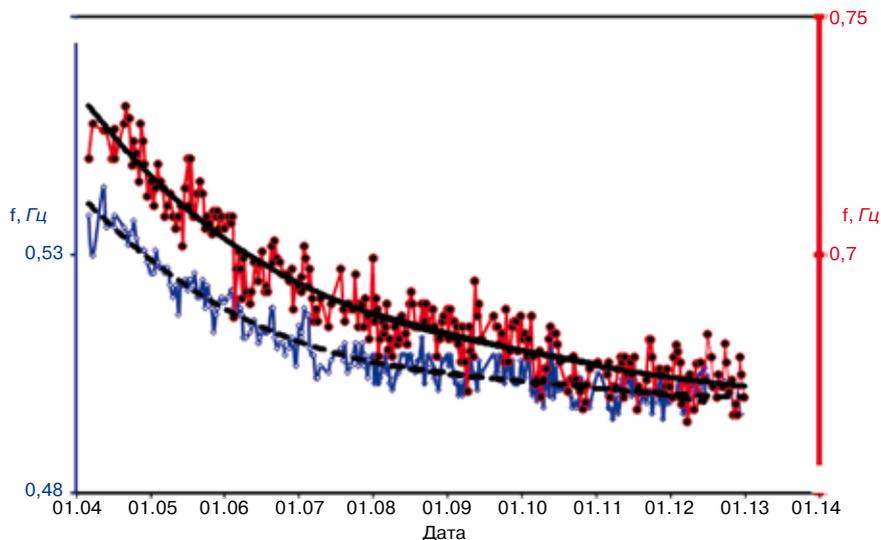


Рис. 7. Результат десятилетнего мониторинга изменений во времени значений собственных частот (синие и красные кривые) 44-этажного жилого дома и их тренд (черные кривые)

Fig. 7. The temporal evolution of eigenfrequencies (black line is the general trend) obtained with 10-year long seismometric monitoring of the 44 floor residential building

получены инерционные силы и амплитуды колебаний здания по всем формам (вплоть до значения собственных частот $f=90$ Гц). На рис. 6 показаны низшие формы колебаний здания – две изгибные и одна крутильная. Максимальные значения амплитуд перемещений, скоростей и ускорений колебаний составили соответственно 0,45 мм; 1,3 мм/с и 36 мм/с², что качественно совпадает с более грубой оценкой по ГОСТ Р 52892–2007 «Вибрация и удар. Измерение вибрации и оценка ее воздействия на конструкцию». Отметим, что были не только уточнены параметры возможных колебаний здания, но также получена оценка дополнительных усилий в несущих конструкциях: значение продольного усилия в колоннах нижнего этажа от вибрационной нагрузки составляет 0,5 т, т. е. менее 0,5% расчетного усилия от вертикальных нагрузок. Таким образом, при составлении сочетаний нагрузок в ходе расчета колонн по прочности и устойчивости вибрационное воздействие можно не учитывать.

Как было показано, научно-исследовательский подход необходим при использовании компьютерного моделирования. Подбор эквивалентной модели для расчета с учетом возможного изменения характеристик материалов конструкций уместно проиллюстрировать примером долговременного (около 10 лет) мониторинга состояния конструкций, начатого ЦНИИЭП жилища в 2000-х гг. при проектировании восьмой московской «высотки» – 44-этажного здания «Эдельвейс». Одним из вопросов было выяснение реальных изменений во времени состояния здания с железобетонным каркасом. Постановка эксперимента, по существу, продолжала традиции научно-исследовательских разработок института.

Выявление изменений состояния конструкций во времени решалось сейсмометрическим методом путем наблюдения собственных колебаний. Учитывая, что к началу эксперимента нормативных документов по мониторингу еще не существовало, наиболее простым способом, практически не затрагивающим интересы заказчика, явилось оборудование на 44-м техническом этаже помещения мониторинга с трехкомпонентной сейсмометрической регистрацией. На рис. 7 представлены изменения во времени значений

the whole building considering because impact frequencies are high enough. An influence of a vibrational load on building envelope and decorative elements was studied. A calculation was made for a typical architectural elements (cornice). The supporting frame is made from hot-rolled steel angles and is attached to the exterior walls with mechanical anchors. The characteristic frequencies of such a construction are close to those of external vibrations causing additional strains. The form of oscillations at eigenfrequency of 51 Hz is shown in Fig. 5. The maximal strains induced by vibrations make up to 12% of service loads and thus can influence the load bearing capacity of the construction. The scheme considered is a good illustration of a vibrational impact on non-bearing structures for modern buildings. The estimation based on the simulation shows that the main construction design phase has to be followed with a detailed analysis of vibrational impact on building envelope and decorative elements.

Let us consider the small frequency differ that was obtained in the oscillation forms simulation. The experience in monitoring of simple constructions convincingly shows that both linear and rotational eigenfrequencies that are close in reality appear in spectrum as a single peak at the intermediate frequency [5, 6]. This reflects the non-linear nature of links between constructional elements. The effect becomes most prominently apparent in historical buildings [5] and was registered for reinforced concrete dams.

To take this effect into account when the subway influence is considered the following procedure takes place. A simplified calculation model was created that takes into account the distribution of stiffness and weight over the building height. The vibration impact simulation was performed with the real accelerogram as an initial condition. The inertial forces and vibrational amplitudes for all forms were obtained up to eigenfrequency value of 90 Hz. The lowest vibration forms of the building in Fig. 6 are: two linear and one rotational. The maximum values of displacement, velocities and accelerations are 0.45 mm, 1.3 mm/s and 36 mm/s² respectively matching qualitatively the crude estimation based on the code ГОСТ Р 52892–2007. Notably, not only the parameters of possible vibrations were refined but also the estimation of additional strains in bearing elements was made. The axial force caused by vibrations in lower floor columns lies below 0.5% of the force caused by vertical loads. This implies that in a calculation of the column strength and stability the vibrational impact can be neglected.

The overall experience demonstrates that the research approach is necessary for a computer simulation to be correct. The choice of an adequate model for calculation that considers possible alteration of construction material properties is illustrated by a 10 year long monitoring. It was started by Central Research and Design Institute for Residential and Public Buildings in 2000 for the eighth Moscow high-rise residential – 44-floor “Edelweiss” tower. The problem studied was the possible alteration of a reinforced concrete construction state during the exploitation. The experiment continued the Institute research tradition.

The overall experience demonstrates that the research approach is necessary for a computer simulation to be correct. The choice of an adequate model for calculation that considers possible alteration of construction material properties is illustrated by a 10 year long monitoring. It was started by Central Research and Design Institute for Residential and Public Buildings in 2000 for the eighth Moscow high-rise residential – 44-floor “Edelweiss” tower. The problem studied was the possible alteration of a reinforced concrete construction state during the exploitation. The experiment continued the Institute research tradition.

двух основных собственных частот здания и тренды кривых. Видно, что за 10 лет значения собственных частот уменьшились примерно на 10%, причем тенденция спада кривых тренда напоминает закономерности, получаемые на образцах для ползучести бетона. Этот вопрос требует специального исследования; здесь отметим, что кривые тренда стремятся к одному значению частоты, что характерно для эффекта согласования частот при наличии нелинейности в системе. По-видимому, наблюдается комбинация ползучести материала и проявления нелинейных связей в конструкциях. Практическими результатами изучения этого явления, отмеченного при мониторинге, является уточнение современных представлений в области сопротивления высотных зданий ветровым и сейсмическим воздействиям, а также совершенствование конструктивных решений будущих высотных зданий.

Заключение. Опыт инструментального мониторинга конструкций высотных зданий с использованием сейсмометрических методов показывает, что у проектировщиков появляются новые возможности понять, как будет работать конструкция после ее возведения. Приведенные материалы могут быть использованы на практике в качестве примеров решения достаточно распространенных задач оценки воздействий, а также лечь в основу научно-исследовательских разработок по выявлению фундаментальных законов работы конструкций.

Работа частично выполнена в рамках инициативного проекта УрО РАН № 12-У-5-1006.

Список литературы

1. Катценбах Р., Вейдле А., Рамм Х. Геотехнические основы моделирования совместной работы здания и основания / Реконструкция городов и геотехническое строительство. 2003. № 7. С. 105–114.
2. Николаев С.В., Острецов В.М., Гендельман Л.Б., Вознюк А.Б., Капустян Н.К., Нестеркина М.А. Методы и результаты сейсмометрического мониторинга взаимодействия высотных зданий с грунтами оснований / Городской строительный комплекс и безопасность жизнеобеспечения граждан. М.: МГСУ, 2005. Ч. 1. С. 166–173.
3. Таракановский В.К., Капустян Н.К., Климов А.Н. Инструменты и возможности мониторинга процессов в грунтах основания высотных зданий в Москве // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2010. № 6. С. 551–562.
4. Острецов В.М., Гендельман Л.Б., Дыховичная Н.А., Вознюк А.Б., Болдырев С.С., Капустян Н.К. Опыт тестирования состояния конструкций высотных зданий методом регистрации собственных колебаний / Железобетонные конструкции зданий большой этажности М.: МГСУ, 2004. С. 86–95.
5. Антоновская Г.Н., Капустян Н.К., Басакина И.М., Климов А.Н. Картина динамики сооружений и расчеты. Сейсмологические исследования в арктических и приарктических регионах / Под. ред. Ф.Н. Юдахина. Екатеринбург: УрО РАН. 2011. С. 154–168.
6. Kapustian N., Antonovskaya G., Agafonov V., Neumoin K., Safonov M. Seismic monitoring of linear and rotational oscillations of the multistory buildings in Moscow // Seismic Behavior of Irregular and Complex Structures // Geotechnical, geological and Earthquake Engineering v. 24 // O. Lavan, M. DeStefano. Springer. XIV. 2013. Pp. 353–363.

The temporal changes in construction state. A seismometric monitoring of eigenfrequency values solves this problem. No monitoring codes existed at the time the experiment started. The simplest way of doing it without interfering with business interests of a client was the installation of a single three-component station in a small technical room on 44th floor. An overtime change of the two major characteristic eigenfrequencies and the trends of temporal change are presented in Fig. 7. It is seen clear that over 10 years of exploitation their values were reduced by 10%. The curves shapes are similar to the temporal trends obtained for concrete creep samples. This alone demands a separate study, though it is notable that the curves converge to a common frequency value. This is characteristic for frequency congruence when a non-linearity is present in a system. The effect observed can be assumed to be due to a combination of creep and a non-linear interaction of construction elements. The practical result of the study is a clarification of modern conceptions of how a construction reacts to a wind and seismic load thus improving high-rise buildings construction principles.

Conclusion. Several experimental examples show that the instrumental monitoring of high-rise constructions by means of seismometric methods gives a valuable insight of how these constructions will function. The data obtained by such techniques can be applied as an example of successful solution of the common task of impact estimation or be a base for a fundamental research of constructions functioning.

Acknowledgements. The work was partially funded by the initiative project “УрО РАН № 12-У-5-1006”.

References

1. Katzenbach R., Veidle A., Ramm H. Geotechnical modeling framework of joint work of the building and soils // Reconstruction of cities and geotechnical construction. Saint-Petersburg.: DIA, 2003. № 7. Pp. 105–114.
2. Nikolaev S.V., Ostretsov V.M., Gendelman L.B., Voznyuk A.B., Kapustyan N.K., Nesterkina M.A. Methods and results of monitoring seismometric interaction of high-rise buildings with foundation soil // City building complex safety and livelihood of citizens. M. MGRS, 2005. Part 1. Pp. 166–173.
3. Tarakanovskiy V.K., Kapustyan N.K., Klimov A.N. Tools and monitoring capabilities of soil processes study for high-rise buildings in Moscow // Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geokriologiya. Moscow, 2010. № 6. Pp. 551–562.
4. Ostretsov V.M., Gendelman L.B., Dykhovichnaya N.A., Voznuk A.B., Boldyrev S.S., Kapustyan N.K. Experience in testing of high-rise buildings by recording the natural oscillations // Reinforced concrete structures of high-rise buildings M.MGSU, 2004. Pp. 86–95.
5. Antonovskaya G.N., Kapustyan N.K., Basakina I.M., Klimov A.N. Structural dynamics and calculations. Seismological research in the Arctic and subarctic regions. Ed. F.N. Yudahina Ekaterinburg. Ural Branch of the Russian Academy of Sciences in 2011 Pp. 154–168.
6. Kapustian N., Antonovskaya G., Agafonov V., Neumoin K., Safonov M. Seismic monitoring of linear and rotational oscillations of the multistory buildings in Moscow // Seismic Behavior of Irregular and Complex Structures // Geotechnical, geological and Earthquake Engineering v. 24 // Ed. O. Lavan, M. DeStefano. Springer. XIV. 2013. Pp. 353–363.