

УДК 699.841:624.042.8; 550.8.053

## ЗАДАЧА ДИНАМИЧЕСКОЙ ПАСПОРТИЗАЦИИ ГРУНТА, ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

*д.ф.–м.н., проф. Бугаевский Г.Н., Литвинова Э.В.*

*Национальная академия природоохранного и курортного строительства,  
г. Симферополь*

Сегодня актуальной является необходимость обследования зданий и сооружений городской застройки, в первую очередь, в больших городах, с целью выявления сейсмоопасных объектов, к которым потенциально можно отнести около 4 млн. м<sup>2</sup> аварийного жилья, десятки млн. м<sup>2</sup> панельных домов застройки 60–х гг., ресурс эксплуатации которых почти исчерпан; зданий и сооружений, построенных из местных строительных материалов в послевоенные годы. Таким образом, к первоочередным мероприятиям нужно отнести [1]:

- оценку сейсмостойкости зданий с несущими стенами из кирпича, местных строительных материалов, построенных по типовым проектам;
- паспортизацию зданий существующей застройки;
- классификацию зданий населенных пунктов в соответствии с их сейсмоопасностью, составление карт–схем города, где указаны здания с категорией сейсмостойкости,
- оценку возможных экономических затрат, определение районов первоочередного разрушения и сноса.

Новая концепция сейсмостойкого строительства, учитывающая рекомендации международных организаций по сейсмостойкому строительству [2], представляет собой систему основных положений, позволяющих оценить и обеспечить сейсмостойкость зданий и сооружений, включающую цели проектирования; критерии сейсмостойкости; оценку региональных геофизических условий; модели сейсмических воздействий и поведения здания при землетрясении; методы расчетов и их критерии.

Эти предложения учитывают результаты исследований и анализ последствий ряда разрушительных землетрясений в Армении (1988 г.), Нефтегорске (1995 г.), Турции (1999 г.), на Тайване (1999 г.), в Индии (2001 г.), Китае (2008 г.), Японии (2011 г.). В предложенных также отражены и нормативные подходы к проектированию с учетом международных кодов и стандартов [2, 3, 4, 5]. Это относится главным образом к зданиям традиционных конструктивных систем, прошедшим экспериментальную проверку (и проверку землетрясениями), имеющим относительно простые объемно–планировочные решения и находящимся на площадках с сейсмичностью не более 8 баллов.

Методической базой, позволяющей реализовать задачи сейсмобезопасности, являются ДБН В.1.1–12:2006 “Строительство в сейсмических районах Украины” [6].

Знания реальной сейсмической опасности, наряду с надежными данными о сейсмической уязвимости сооружений, являются необходимыми

для сейсмостойкого проектирования и разработки антисейсмических мероприятий. Основными источниками объективных данных для деятельности в области защиты от землетрясений являются сейсмологические и инженерно-сейсмические наблюдения. Специалистам в области сейсмостойкого строительства необходима информация о причинах и механизмах разрушения сооружений, при этом принципиальное значение имеют качественно новые методы исследования.

Вместе с тем, для проблемы сейсмостойкости основной является задача о вынужденных колебаниях конкретной конструкции под воздействием местного механического, сейсмического источника [3]. Поэтому правомочным и потенциально перспективным является представление о здании или сооружении как о физическом объекте, реакцию которого на воздействие следует изучать физическими методами. Необходимо определять не только частотные, но и параметры демпфирования [7] элементов тензора деформации.

Предлагаемая методика неразрушающего инструментального инженерно-сейсмологического обследования зданий и сооружений с использованием сейсмических методов, аппаратуры и оборудования позволяет осуществить с высокой точностью измерения и регистрацию пространственных микроколебаний зданий и сооружений, возникающих при кратковременном механическом воздействии (удар, отяжка) и определить комплекс параметров динамических характеристик, отображающих физическое состояние зданий и сооружений, как в целом, так и отдельных блоков и элементов.

Проведение систематических обследований зданий и сооружений с момента ввода их в эксплуатацию позволяет получить инструментальные данные об уровне их физического состояния, степени износа, возможности и целесообразности реконструкции или необходимости сноса в зависимости от продолжительности условий их эксплуатации.

Структурные этапы методики [8–11]:

- формирование известных или экспериментальное определение региональных динамических параметров местных и близких землетрясений, способных создать повреждения и разрушения грунта, зданий и сооружений;
- предварительное математическое моделирование изучаемого динамического процесса на основе математических моделей объектов;
- сбор и накопления необходимой информации о состоянии объектов;
- первичная и последующая обработка информации, накопление её в базе данных;
- оценка сейсмического риска и уязвимости объектов.

Эффективность такой системы основана на объединении следующих составляющих:

- измерительной и вычислительной техники;
- математического обеспечения – математических моделей и алгоритмов;
- программного обеспечения – пакетов программ автоматизации измерений, регистрации, обработки, отображения и документирования данных.

Определяющую роль при прогнозировании надежности и жизнеспособности элементов реальных сооружений, особенно при воздействии импульсных и переменных динамических нагрузок, играет адекватная оценка значения смещений (скоростей, ускорений) элементов сооружения. Поэтому, прочностные характеристики сооружения непосредственно определяются через кинематические и динамические характеристики сейсмического движения узлов сооружения. Следовательно, задача состоит в определении уравнений “истинного” движения масс сооружения при прохождении сейсмических волн [3].

Испытание зданий и сооружений динамическими нагрузками выполняются с целью:

- определения пределов неразрушающих динамических нагрузок, влияющих на прочность, выносливость, жёсткость и трещиностойкость строительных конструкций;

- разработки мероприятий по уменьшению колебаний;

- экспериментальной проверки расчётных характеристик и качества серийно изготавливаемых и эксплуатируемых конструкций по частоте и декременту затухания собственных колебаний.

Отдельные задачи динамических испытаний и цели их исследования в зависимости от объектов [12].

1. Сооружения и отдельные конструкции, подлежащие сдаче в эксплуатацию.

Объекты, рассчитанные на воздействие динамических нагрузок, испытывают с целью определения динамических параметров конструкций, проверки их работы в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным условиям. Используют сопоставления прочностных параметров однотипных элементов в сооружениях путём сравнения локальных частотных характеристик и декрементов затухания их собственных колебаний. Таким образом выявляются ослабленные участки в исследуемых объектах.

2. Сооружения и конструкции, находящиеся в эксплуатации.

Результаты повторных динамических испытаний, при сопоставлении их с первичными испытаниями, позволяют судить об изменении состояния исследуемого объекта во времени. С этой целью, динамические испытания могут производиться в следующих случаях:

- в плановом порядке, если это предусмотрено правилами эксплуатации;

- после ремонта и усиления конструкций;

- при наличии сомнения в сохранении необходимой несущей способности и жёсткости, например, после пожара, при существенном поражении коррозией и т.п.;

- после землетрясений в 6 и более баллов 12–тибалльной шкалы.

От статических испытаний динамические выгодно отличаются значительно меньшей трудоёмкостью, возможностью проведения их в повторяющихся условиях и в более сжатые сроки.

Метод испытания строительных конструкций и сооружений динамическими нагрузками позволяет проверить расчётные характеристики

серийно выпускаемых конструкций, установить расчётную схему построенного здания или сооружения и выявить взаимосвязь между работой отдельных элементов здания и деформативными характеристиками основания.

Техническим результатом метода является получение численных значений физических параметров, отображающих реальное физическое состояние здания или сооружения, и изменение этого состояния во времени в процессе эксплуатации.

Технический результат достигается тем, что в способе определения физического состояния зданий и сооружений осуществляют измерения их пространственных колебаний под силовым воздействием искусственного происхождения или микросейсмического фона, в условиях которого находится обследуемый объект, посредством трехкомпонентных, перемещаемых по точкам схемы наблюдений, датчиков, обеспечивающих одновременную регистрацию величин колебаний по координатам  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ .

Методика определения физического состояния зданий и сооружений включает:

- проведение наблюдений с помощью инженерно–сейсмометрического измерительного комплекса;
- обработку результатов наблюдений с помощью вычислительного комплекса для автоматизированного анализа и интерпретации сейсмических данных.

Принципы выбора источника возбуждения. Для определения динамических характеристик (собственных частот, декрементов колебаний) сооружения или его какого–либо элемента прибегают к возбуждению следующих видов колебаний [13]:

- гармонических колебаний, частота которых меняется в достаточно широком диапазоне; в результате испытаний получают амплитудно– и фазочастотные характеристики конструкции для каждой исследуемой формы колебаний;
- собственных колебаний, возбуждаемых ударом или начальным смещением конструкции; динамические характеристики конструкции определяют в этом случае по полученной записи собственных колебаний;
- колебаний в переходном режиме при пуске (остановке) находящегося в сооружении оборудования или специального возбудителя гармонических колебаний; результаты испытаний позволяют определить значения собственных частот.

Обязательными условиями этих испытаний являются применение специального воздействия для возбуждения вынужденных или свободных колебаний объекта.

В качестве источников воздействия могут использоваться естественные события и искусственные источники механической энергии.

Использование искусственных источников позволяет сократить сроки наблюдений до нескольких дней. Выбор источника возбуждения осуществляется в соответствии с поставленной задачей, условиями проведения эксперимента и объектом исследования. Наиболее применимыми

являются ударные воздействия и оттяжки (для сооружений небольшой массы). Основным преимуществом ударных воздействий является то, что они позволяют сравнительно просто обеспечить точную повторяемость воздействий, рассчитать их мощность, а также не требует повышенных мер безопасности и специально обученного персонала.

Энергия этого воздействия зависит от размеров, массы здания, удаления источника воздействия и должна составлять  $5 \div 50$  кДж. Большая энергия воздействия может создать микронарушения в конструкции, которые, накапливаясь за счет других технических и естественных событий, приведут к снижению сейсмостойкости сооружения. В качестве источника механического воздействия для зданий и сооружений с массой менее 4 кт может служить подъемник груза до 200 кг на высоту до 7 м. При большей массе сооружения целесообразно использовать копер с энергией удара не менее 50 кДж. Точка удара должна быть удалена от объекта в первом случае на расстояние 40–50 м, во втором – около 100 м и находиться на продолжении одной из центральных осей здания.

Подготовка и размещение аппаратуры. Задача получения строгих динамических характеристик и закономерностей требует проведения предварительной калибровки сейсмоканалов [14].

Регистрируемый частотный диапазон отклика сооружения на воздействие при динамической паспортизации (без других специальных требований) должен составлять  $0.1 \div 40$  Гц [14]. Динамический диапазон регистрации должен быть не менее 60 дБ.

Для проведения экспериментальных записей отклика сооружения на механическое воздействие комплекты сейсмоприемников должны быть идентифицированы и калиброваны с помощью аттестованного стенда. Должна быть определена частотная характеристика каждого канала.

После этого в результате трехкратного повторения (в одних и тех же условиях) режимов свободных, а также вынужденных колебаний разница синхронных значений исходных записей несколькими каналами или разность на каждой частоте их спектров не должна превышать 1%–й рубеж.

Для калибровки сейсмоканала необходимо применять специальные вибростенды. Стенд, разработанный в лаборатории кафедры МиСС НАПКС (г. Симферополь) [15], обеспечивает испытания сейсмоприемников путем задания компоненты движения по закону, определяемому внешним источником электрического сигнала (генератором, компьютером и др.).

Размещение измерительных пунктов. Для зонирования сооружения в нем следует выбрать систему осей, образующих определенную пространственную сеть точек расстановки. Конфигурация сети должна соответствовать конструкции сооружения и поставленным задачам [14].

С вопросом о размещении измерительных приборов связана пригодность получаемой информации для дальнейшего анализа поведения сооружения.

Выбор точек регистрации производится в зависимости от задач эксперимента. В случае полномасштабного исследования реакции сооружения на динамическое воздействие наиболее целесообразно применение подробной равномерной сети наблюдений. В случае

периодического обследования наблюдения должны производиться в точках регистрации изменений динамических параметров по результатам предыдущих экспериментов. В случае, когда отдельные характерные конструктивные особенности сооружения не совпадают с регулярной сетью наблюдений, необходимо проведение дополнительных наблюдений в характерных точках.

При любом варианте эксперимента для принятия решения о расстановке регистрирующей аппаратуры необходимо изучение проектной документации.

Методика анализа результатов реакции зданий и сооружений на механические воздействия. На основании регистрационных записей  $V(t, X_i, Y_i, Z_i)$  вычисляют спектры амплитуд  $A(t, x_i, y_i, z_i)$  колебаний здания. Спектры амплитуд позволяют путем фильтрации частот, соответствующих формам собственных колебаний объекта, получить численные значения амплитуд  $A(t, x_i, y_i, z_i)$  смещения для каждой точки измерений на  $i$ -й частоте собственных колебаний. По полученным данным строят соответствующие карты распределения амплитуд смещений в плоскостях наблюдений на частотах собственных колебаний, которые отображают физическое состояние объекта в целом и его отдельных элементов.

Близкие к теоретическим конфигурациям карт распределения величин амплитуд смещений и карт форм собственных колебаний свидетельствуют об удовлетворительном физическом состоянии здания или сооружения. Отклонения или искажения конфигурации указанных карт возникают как следствие изменения физического состояния объекта, в том числе снижения его пространственной жесткости в целом или отдельных блоков и элементов из-за ослабления упругих связей или нарушения целостности конструкции.

Далее определяют значения частот собственных колебаний в каждой точке измерений и средние частоты собственных колебаний для объекта в целом по соответствующим компонентам. Строят графики отклонения частот собственных колебаний относительно среднего значения частоты для каждой плоскости наблюдения.

### **Выводы.**

На основании полученных данных определяют индивидуальный комплекс параметров динамических характеристик колебаний, как следствие свойств подстилающего грунта (основания) и фундамента здания или сооружения, масс и упругих характеристик конструкции здания или сооружения, вида и качества соединений отдельных блоков, частей и элементов здания или сооружения.

Таблицы, карты и графики параметров динамических характеристик и их средние значения отображают фактическое физическое состояние обследованного объекта. При этом средние значения частот, декрементов затухания, количество и конфигурации форм собственных колебаний характеризуют физическое состояние обследованного объекта в целом.

В итоге определяют частоты и формы собственных колебаний объекта в целом, его блоков и отдельных элементов конструкции, спектры величин смещений, скоростей смещений точек объекта с координатами  $X, Y, Z$ , передаточные функции грунт–фундамент объекта, фундамент объекта –

этажи и части объекта по высоте, компоненты динамических деформаций и напряжений, возникающих в конструкции объекта.

Изменение в процессе эксплуатации указанных свойств отображается, соответственно, изменениями численных параметров динамических характеристик пространственных колебаний здания или сооружения в целом или их отдельных блоков, частей и элементов.

Оценивают физическое состояние обследуемого объекта на основании вычисленных для каждой точки измерений значений параметров динамических характеристик путем сопоставления полученных инструментальных данных:

- с расчетными или нормативными;
- с параметрами динамических характеристик эталонного однотипного объекта (используют в машиностроении при диагностике физического состояния машин [59]);
- с полученными ранее параметрами динамических характеристик объекта.

Сочетание повышенного значения амплитуды формы собственных колебаний с одновременным снижением их частоты свидетельствует об ослаблении упругих связей элементов конструкции (в частности, наличии трещины) и является диагностическим признаком.

Возникшие в процессе эксплуатации изменения свойств грунта, на который опирается обследуемый объект, свойств фундамента или конструкции объекта соответственно отображаются на параметрах динамических характеристик колебаний объекта.

На основании полученной численной информации устанавливают наличие изменения свойств подстилающего грунта и ослабления упругих связей в конструкции объекта, возникших в процессе эксплуатации, определяют физическое состояние объекта и оценивают безопасность дальнейшей его эксплуатации, и возможность ремонта, необходимость реконструкции или сноса обследованного здания или сооружения.

## ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Немчинов Ю. И. Проблемы проектирования и строительства в сейсмоопасных районах Украины и основные направления развития норм по сейсмостойкому строительству / Немчинов Ю. И. // Будівельні конструкції. – Київ: НДБК, 2004. – Вип. 60. – С. 3–13.
2. Репях В. В. Опыт применения новых строительных норм в сейсмических расчетах зданий / Репях В. В. // Будівельні конструкції. – Київ: НДБК, 2008. – Вип. 69. – С. 674–679.
3. Бугаевский Г. Н. Проблемы сейсмостойкости и СНиП / Бугаевский Г. Н. // Строительство и техногенная безопасность. – Симферополь: КАПКС, 2002. – Вып. 6. – С. 29–32.
4. Государственные нормы ДБН В.1.1–12:2006 “Строительство в сейсмических районах Украины” и задачи обеспечения сейсдобезопасности зданий и сооружений / [Немчинов Ю. И.,

- Хавкин А. К., Егупов К. В. и др.] // Будівельні конструкції. – Київ: НДІБК, 2008. – Вип. 69. – С. 3–25.
5. Государственные нормы “Строительство в сейсмических районах Украины” / [Немчинов Ю. И., Марьенков Н. Г., Кукунаев В. С., Бугаевский Г. Н. и др.] // Будівельні конструкції. – Київ: НДІБК, 2006. – Вип. 64. – С. 3–19.
  6. Державні будівельні норми України. Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівництво у сейсмічних районах України: ДБН В.1.1–12:2006. – Видання офіційне. – Київ: Міністерство будівництва, архітектури та житлово–комунального господарства України, 2006.– 84 с.
  7. Бугаевский Г. Н. Спектрально–динамические и диссипативные свойства элементов сооружения / Бугаевский Г. Н. // Строительство и техногенная безопасность. – Симферополь: НАПКС, 2005. – Вып. 11.– С. 85–88.
  8. Бугаевский Г. Н. Комплексная методика детального исследования реакции элементов сооружения на механическое воздействие / Бугаевский Г. Н., Литвинова Э. В. // Строительство и техногенная безопасность. Симферополь: НАПКС, 2008. – Вып. 24–25. – С. 14–22.
  9. Бугаевський Г. М. Методика визначення дійсного руху коливальних систем як основа динамічної паспортизації споруд / Бугаевський Г. М., Літвінова Е. В. // Будівельні конструкції. – Київ: НДІБК, 2008. – Вип. 69. – С. 209–216.
  10. Литвинова Э. В. Разработка обоснованной сейсмометрической методики анализа сейсмических записей / Литвинова Э. В. // Строительство и техногенная безопасность.– Симферополь: КАПКС, 2002.– Вып. 6.– С. 249–259.
  11. Літвінова Е. В. Методика неруйнівного інструментального інженерно–сейсмологічного обстеження будівель і споруд / Літвінова Е. В., Бородачова Т. І. // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди.– Рівне. – 2011. – Вип. 22. – С. 673–680.
  12. Савович М. К. Динамический расчет каркасных зданий: учебное пособие / Савович М. К. – Ханты–Мансийск, 2005. – 255 с.
  13. Динамический расчет зданий и сооружений: справочник проектировщика [Под ред. Б. Г. Коренева, И. М. Рабиновича]. – М.: Стройиздат, 1984. – С. 272–280.
  14. Исследования вариаций во времени динамических характеристик пространственного объекта / [отчет о научно–исследовательской работе (госбюджетное финансирование)]. – Симферополь. – 2006. – 122 с.
  15. Стенд для испытаний и калибровки сейсмометрической аппаратуры / [Бугаевский Г. Н., Белов В. П., Смертенко З. Я. И др]: доповіді науково–технічної конференції [“Будівництво в сейсмічних районах України”]. – Ялта. – 1999. – С. 221–226.