

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2023, Том 15, № 6 / 2023, Vol. 15, Iss. 6 <https://esj.today/issue-6-2023.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/09SAVN623.pdf>

2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Савин, С. Н. Сейсмоакустические методы интегральной оценки физико-механических характеристик строительных конструкций зданий и сооружений / С. Н. Савин, В. М. Попов, Ю. В. Пухаренко, В. И. Морозов, В. В. Цыгановкин // Вестник евразийской науки. — 2023. — Т. 15. — № 6. — URL: <https://esj.today/PDF/09SAVN623.pdf>

For citation:

Savin S.N., Popov V.M., Pukhareno Yu.V., Morozov V.I., Tsyganovkin V.V. Improvement of methods for integral assessment of physical and mechanical properties of a building. *The Eurasian Scientific Journal*. 2023; 15(6): 09SAVN623. Available at: <https://esj.today/PDF/09SAVN623.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.)

УДК 624-2/-9

Савин Сергей Николаевич

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»,
Санкт-Петербург, Россия
Профессор
Доктор технических наук, доцент
E-mail: snsavin@lan.spbgasu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9369-8214>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=426347

Попов Владимир Мирович

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»,
Санкт-Петербург, Россия
Доцент
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: popov_vladimir_m@mail.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=769930

Пухаренко Юрий Владимирович

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»,
Санкт-Петербург, Россия
Заведующий кафедры «Технологии строительных материалов и метрологии»
Доктор технических наук, профессор
E-mail: push@lan.spbgasu.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=416932

Морозов Валерий Иванович

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»,
Санкт-Петербург, Россия
Профессор
Доктор технических наук, профессор
E-mail: valter@lan.spbgasu.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=387958

Цыгановкин Виктор Владимирович

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»,
Санкт-Петербург, Россия

Аспирант

E-mail: vcyganovkin@lan.spbgasu.ru

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1085064

Сейсмоакустические методы интегральной оценки физико-механических характеристик строительных конструкций зданий и сооружений

Аннотация. В статье объектом исследования являются строительные конструкции, здания и сооружения, техническое состояние которых необходимо установить в результате обследования. Авторами разработаны и успешно применяются несколько сейсмоакустических методов оценки состояния строительных конструкций: метод поверхностной волны, метод сквозного зондирования с использованием продольных волн, методы, основанные на свободных колебаниях сооружений и их элементов.

Метод поверхностной волны основан на связи скорости поверхностной волны с акустическими характеристиками материалов конструкций. Причем, если акустические характеристики материалов конструкций переменные по глубине от поверхности или конструкция имеет ограниченную толщину, то скорость поверхностной волны зависит от ее длины. Строя дисперсионные кривые (зависимости скорости волны от ее длины), можно решить обратную задачу и по дисперсионной кривой построить скоростной разрез конструкции.

Метод сквозного зондирования применяется в случаях, когда имеется доступ по крайней мере к двум противоположным поверхностям конструкции, но использование ультразвуковых приборов по каким-либо причинам затруднено или невозможно. При испытаниях методом сквозного зондирования обычно датчики (пьезоакселерометры) устанавливаются на одной стороне конструкции, а удары молотком с закрепленным на нем акселерометром наносятся по другой. Масса молотка зависит от базы прозвучивания и интенсивности затухания волны.

Сущность метода свободных колебаний заключается в том, что в качестве исходных данных о состоянии объекта обследования используются его динамические характеристики — формы и виды свободных колебаний и соответствующие им частоты (периоды), декременты, эпюры колебаний. Их выбор обусловлен, прежде всего, тем, что динамические характеристики объективно свойственны объекту испытаний, они зависят от конструктивного исполнения, качества монтажа, характеристик материала и конструкций, от имеющихся дефектов, то есть от того набора составляющих, которые определяют состояние и несущую способность конструкций.

Кроме того, анализ относительных перемещений конструктивных элементов обследуемой конструкции позволяет оценить фактическую схему ее работы на момент проведения обследования и создать адекватную конечно-элементную модель. Одновременно реализуется возможность оценки внешних факторов, например уровня влияния внешних динамических воздействий от землетрясений, транспорта, других сооружений.

Результатом использования этих методов является возможность получения надежных данных для расчета несущей способности строительных конструкций и оценки их технического состояния.

Ключевые слова: свободные колебания; резонансные колебания; изгибные волны; сквозное зондирование; верификация расчетных моделей; динамические параметры; амплитудный спектр колебаний; кросс спектр колебаний

Введение

Строительные конструкции и основание здания или сооружения должны обладать такой прочностью и устойчивостью, чтобы в процессе строительства и эксплуатации не возникало угрозы причинения вреда жизни или здоровью людей, имуществу физических или юридических лиц, государственному или муниципальному имуществу.¹

В развитии этих положений разработаны также требования ГОСТ², где в ходе детального инструментального обследования технического состояния здания или сооружения предписывается «...определение фактических характеристик материалов основных несущих конструкций и их элементов...».

Очевидно, что в свете этих требований можно предполагать дальнейшее развитие методов контроля прочности материалов строительных конструкций, измерительной и испытательной базы специализирующихся в данном направлении исследователей и профильных организаций [1].

Наиболее перспективными являются исследования по развитию неразрушающих методов испытаний и контроля качества материалов, конструкций, изделий и сооружений [2].

Использование новых идей и средств для оценки физико-механических свойств материалов (прочности, упругости, плотности) и напряженно-деформированного состояния конструкций требует согласования как с существующими нормами и правилами, так и разработки новых [3].

Среди наиболее перспективных методов неразрушающего контроля следует выделить «акустические», которые основаны на регистрации параметров упругих волн, возникающих или возбуждаемых в контролируемом объекте [4].

При этом используются следующие свойства упругих волн:

- Отражение от поверхностей, разделяющих среды с различными акустическими свойствами. Когда необходимо определение геометрических параметров исследуемого объекта (длины, толщины), обнаружение и определение местоположения дефектов (каверн, инородных включений, трещин) [5].
- Изменение направления (рефракция) и скорости распространения волн. Используется для обнаружения и определения местоположения и параметров дефектов (пустот, инородных включений, глубин трещин, зон недоуплотненного бетона, толщины корродированного слоя бетона) [6].
- Зависимость скоростей распространения упругих волн от физико-механических характеристик материала позволяет определять прочность материала и его упругие характеристики [7].

¹ ФЗ 384. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений.

² ГОСТ 31937-2011. Межгосударственный стандарт. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния.

При массовом обследовании однотипных конструкций или конструкций, имеющих большие геометрические размеры, на первом этапе обследования достаточными для определенных выводов могут быть непосредственно определяемые в ходе обследования упругие параметры материалов строительных конструкций [8]. Величины этих параметров (скорости распространения или интенсивности затухания возбуждаемых волн) для различных конструкций или участков конструкций позволяют выявить ослабленные конструкции или их участки [9].

Однако, как правило, этого недостаточно [10]. В расчетах несущей способности используются такие характеристики материала, как «модуль упругости» и «прочность» [11].

Для определения динамического модуля упругости E_d и модуля сдвига G_d по его акустическим характеристикам применяются основные уравнения [12].

$$E_d = \rho \cdot V_l^2 \frac{(1 + \mu_d) \cdot (1 - 2\mu_d)}{1 - \mu_d}, \text{ Па}, \quad (1)$$

$$G_d = E_d / 2(1 + \mu_d) = \rho V_t^2, \text{ Па}, \quad (2)$$

где ρ — плотность материала, кг/м³; V_l — скорость продольных волн в массиве, м/с; V_t — скорость поперечных волн в массиве, м/с; μ_d — динамический коэффициент Пуассона.

Поскольку скорость любых волн связана со скоростью продольных, для объемных волн и поверхностных волн в однородном полупространстве

$$V_x = f(V_l, \mu_d), \quad (3)$$

то при известном коэффициенте Пуассона определение динамического модуля упругости по скорости любой волны V_x не представляет труда.

Зависимость между прочностью материала и скоростью продольной волны в нем или модулем упругости устанавливается эмпирически и зависит от многих факторов [13].

Поэтому для определения прочности материала необходимо построить градуировочную кривую зависимости между скоростью продольной волны (или любой другой волны) и прочностью [14].

Для этого необходимо в отдельных точках измерения провести определение скорости распространения волны и прочности любым методом, для которого имеются градуировочные кривые:

- испытания высверленных кернов [15];
- отрыва со скалыванием;
- скалывания ребра конструкции [15];
- пластических деформаций;
- ультразвуковым [16].

Способы построения тарировочных кривых для ультразвукового метода оценки прочности бетона регламентируются ГОСТ.³ Эти же принципы могут быть применены и для методов, основанных на использовании волн акустического диапазона частот [17].

³ ГОСТ 17624-87 «Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности».

Если получены тарировочные кривые для ультразвукового метода, то они могут использоваться непосредственно с учетом того, что скорость соответствующих типов волн сейсмоакустического диапазона частот обычно на 3÷5 % ниже скорости ультразвука [18].

Основными типами волн, встречающимися в строительных конструкциях, являются объемные (продольные и поперечные), а также каналовые (стержневые, пластинчатые, поверхностные и изгибные) [19].

Теория упругости дает следующие соотношения между скоростями этих волн [20–23]:

$$\frac{V_t}{V_l} = \sqrt{\frac{1-2\mu}{2(1-\mu)}}, \quad (4)$$

$$\frac{C_R}{V_l} = \sqrt{\frac{1-2\mu}{2(1-\mu)}} \cdot \frac{0.87+1.12\mu}{\mu+1}, \quad (5)$$

$$\frac{C_R}{V_t} = \frac{0.87+1.12\mu}{\mu+1}, \quad (6)$$

$$\frac{V_r}{V_l} = \sqrt{(\mu+1) \frac{1-2\mu}{1-\mu}}, \quad (7)$$

$$\frac{V_{pl}}{V_l} = \sqrt{\frac{1-2\mu}{(1-\mu)^2}}, \quad (8)$$

где V_p — скорость продольной волны; V_s — скорость поперечной волны; C_R — скорость Релеевской волны; V_r — скорость стержневой волны; V_{pl} — скорость пластинчатой волны; μ — коэффициент Пуассона.

Методы

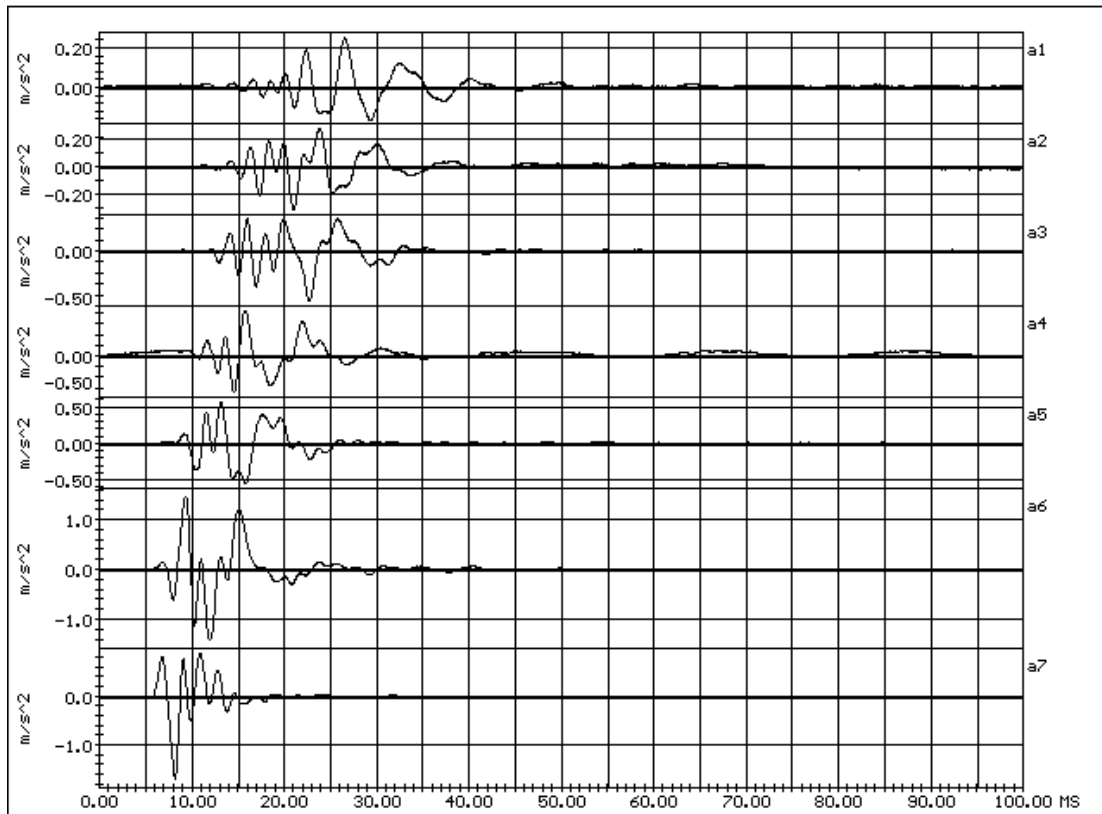
Метод поверхностной волны

Суть разработанной нами методики заключается в возбуждении ударной нагрузкой поверхностных волн и измерении параметров их распространения с помощью датчиков, образующих измерительный луч, в котором все точки измерения с постоянным шагом располагаются на одной прямой с точкой удара.

Полученные реализации (рис. 1) фильтруются полосовыми фильтрами для разделения на отдельные пучки монохроматических волн и для каждого пучка строятся годографы распространения волны (рис. 2), по которым определяются скорость и длина волны. Результаты обработки используются для построения дисперсионных кривых и, при необходимости, годографов скорости поверхностных волн.

Предложенный метод позволяет проводить обследование строительных конструкций, в том числе с переменными по глубине конструкции физико-механическими характеристиками их материалов.

Некоторые результаты обследования с использованием поверхностных волн приведены ниже.



По вертикальной оси справа обозначены номера датчиков, слева — ускорения в m/s^2 . По горизонтальной оси отложено время в микросекундах

Рисунок 1. Пример исходных реализаций

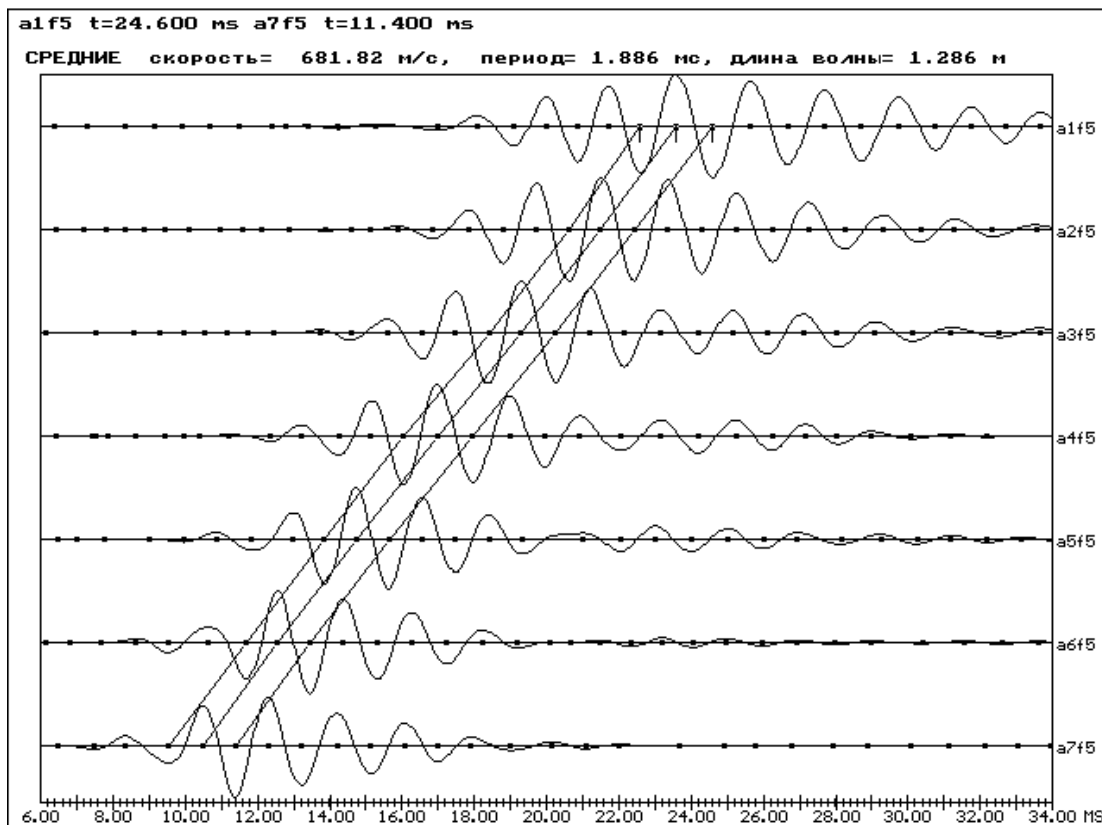


Рисунок 2. Пример пучка монохроматических волн c

На рисунках 3–5 приведены дисперсионные кривые, полученные в массиве железобетона толщиной 1,7 м для различных характеристик состояния бетона по толщине конструкции. Там же приведены теоретические дисперсионные кривые поверхностных волн для однородной по толщине плиты (сплошные линии).

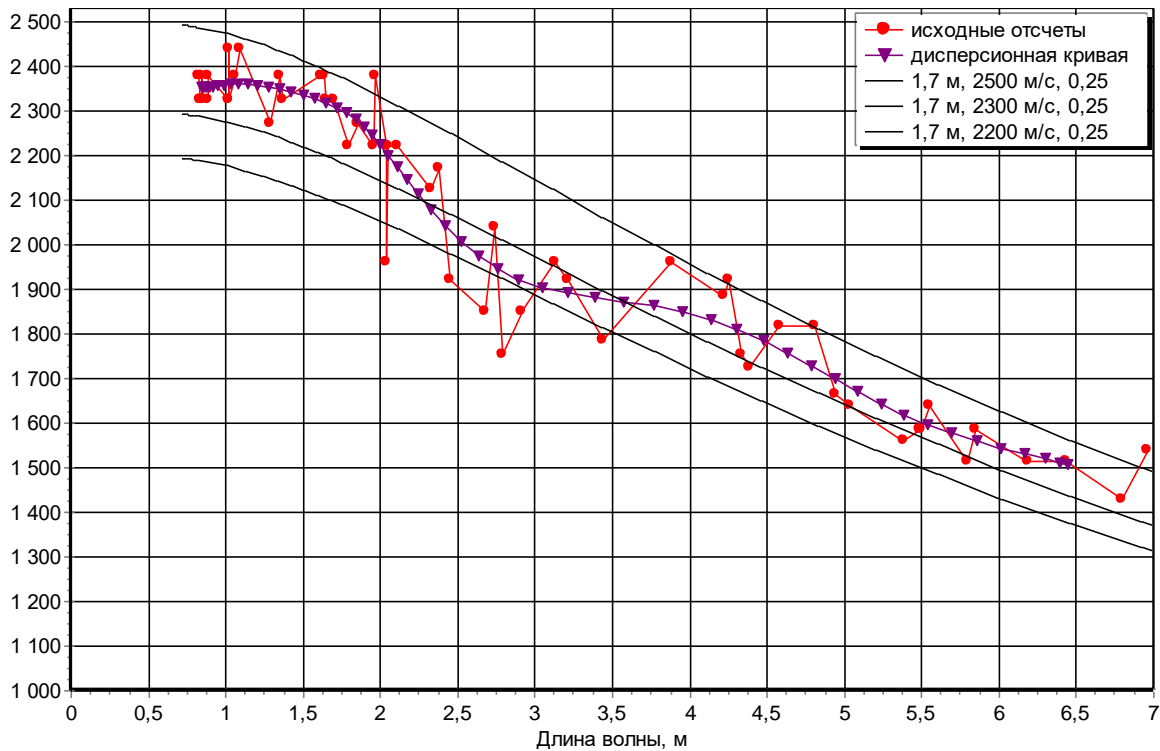


Рисунок 3. Дисперсионная кривая для массива с постоянными по толщине конструкции

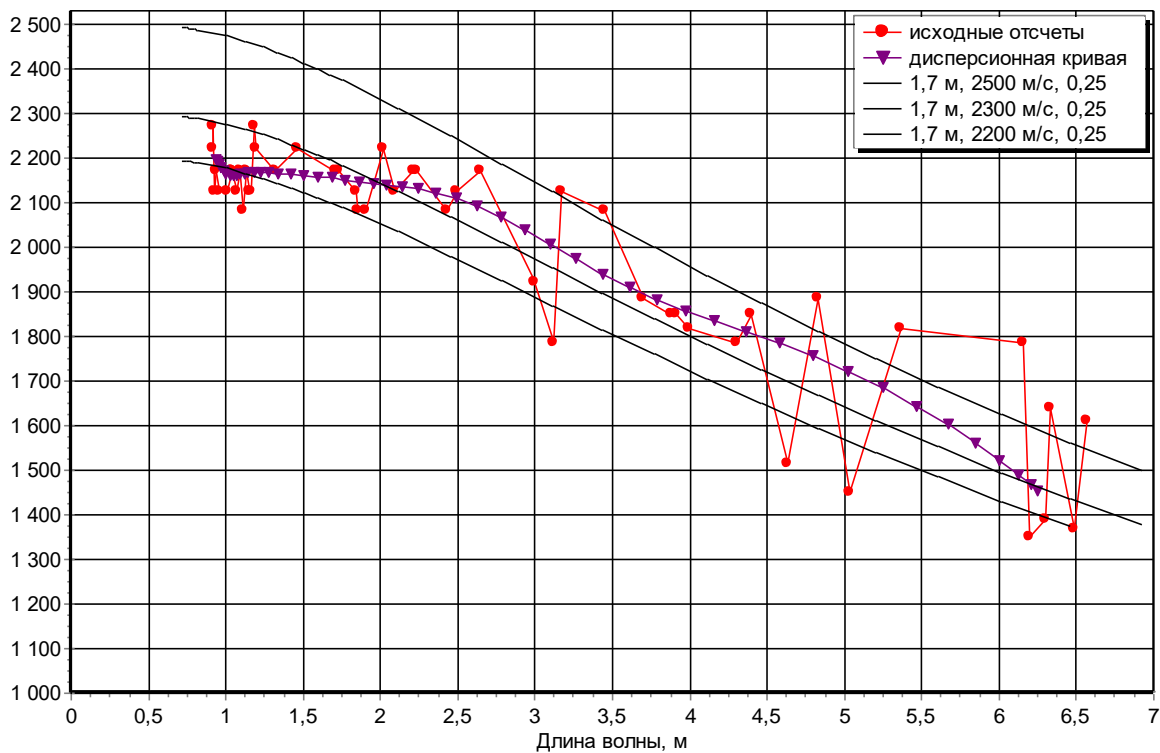


Рисунок 4. Дисперсионная кривая массива с ослабленным поверхностным слоем бетона

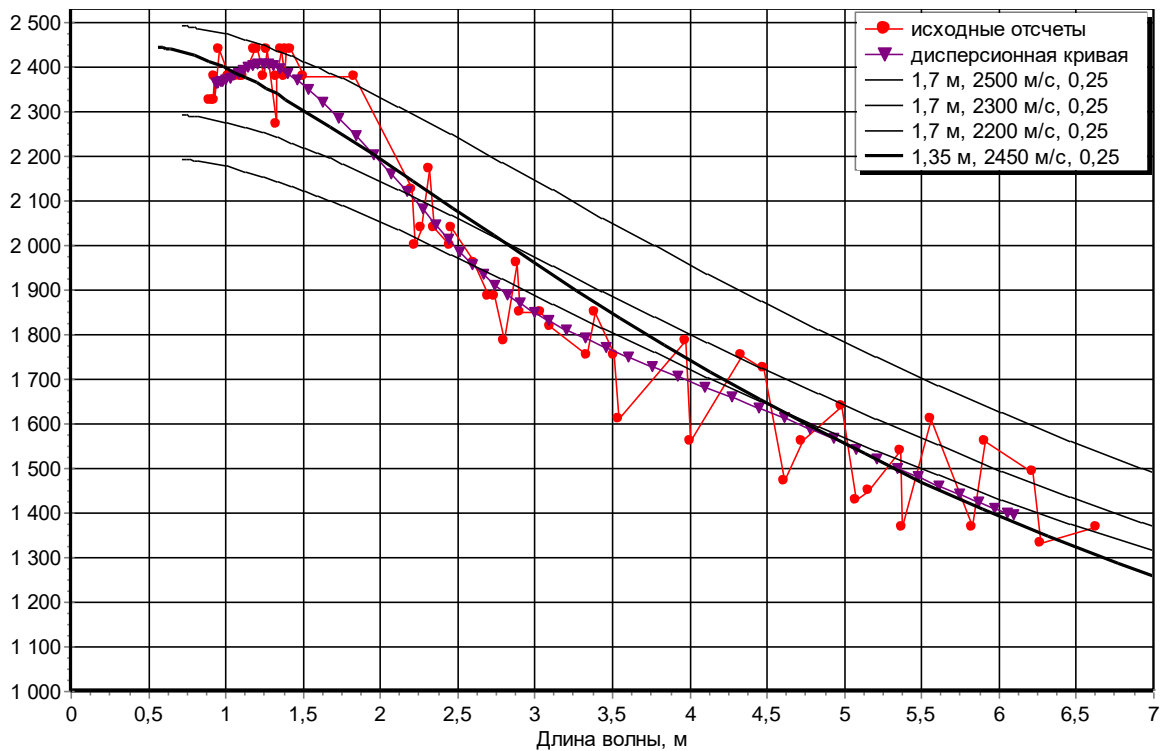


Рисунок 5. Дисперсионная кривая для массива с ослабленным слоем бетона

Таким образом, с использованием поверхностных волн можно не только оценивать состояние массива в целом, но для толстостенных конструкций также оценивать состояние отдельных ее слоев.

Кроме того, существенным достоинством этого метода является возможность исследовать конструкции при одностороннем доступе.

Метод поверхностной волны используется для оценки состояния материала в строительных конструкциях, в том числе толстостенных, при наличии доступа только к одной поверхности конструкции.

Для кирпичной кладки и бетона имеются зависимости прочности от скорости продольной волны, по которым может определяться прочность материалов строительных конструкций [24].

Метод сквозного зондирования

Результаты и схемы испытаний конструкции методом сквозного зондирования приведены на рисунках 6–8.

Объектом исследования были кирпичные колонны комплекса зданий на Красной площади в г. Москве.

Измерительные сечения были выбраны в наиболее нагруженных колоннах, где визуально фиксировались трещины и другие повреждения.

На рисунке 6 представлены результаты прозвучивания кирпичной колонны в сечении на высоте 1 200 мм. Оценивались физико-механические характеристики кирпичной кладки колонны.

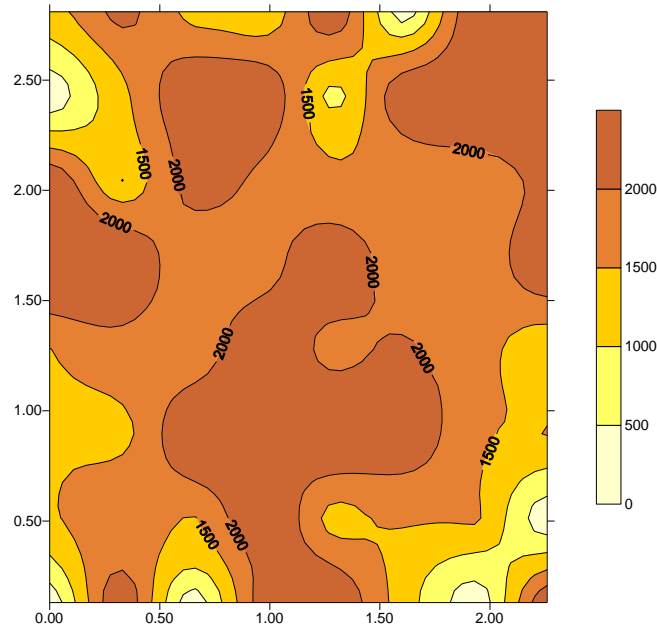


Рисунок 6. Результаты изменений скорости продольных упругих волн на кирпичной колонне (K1)

Упругие волны акустического диапазона возбуждались ударом молотка. Результаты испытаний показали, что кладка колонны выполнена без забутовки, а ее осевая прочность изменяется в пределах от 2 до 3 МПа, хотя по краям колонны (вблизи углов) имеются небольшие области с пониженной прочностью материала.

Аналогичные результаты (томографической обработки) приведены для колонны K₂ (рис. 7).

Как следует из рисунка, в сечении колонны отчетливо выделяется область пониженных скоростей (до 1 000 м/сек), что может быть объяснено наличием косой трещины в кладке.

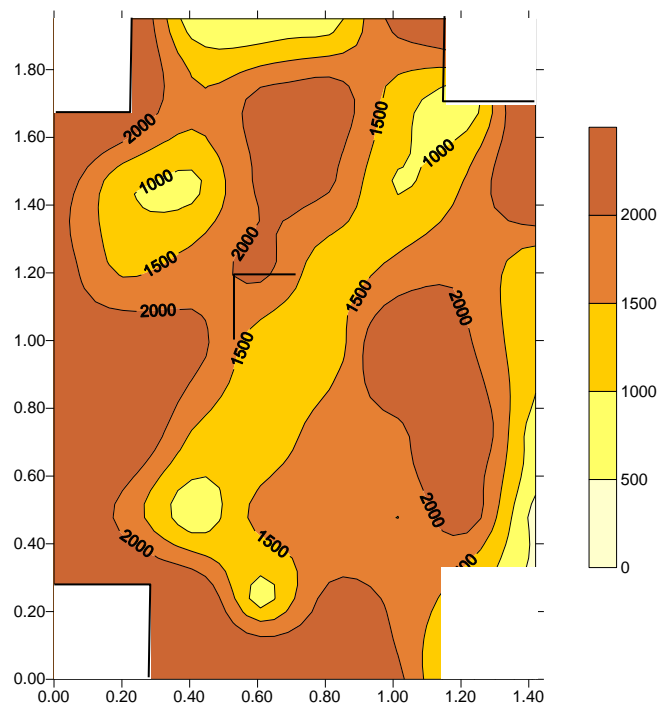


Рисунок 7. Результаты томографической обработки данных сквозного прозвучивания колонны K2

На рисунке 8 приведены аналогичные результаты для массивной бетонной стены.

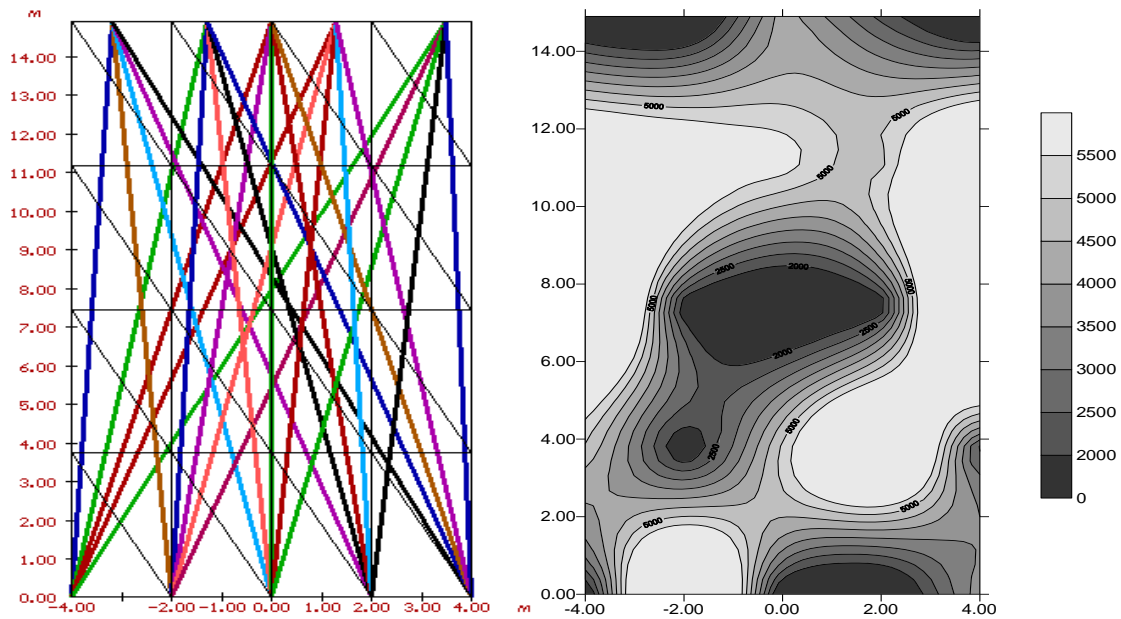


Рисунок 8. Схема зондирования и результаты прозвучивания бетонной стены

Метод сквозного зондирования используется, как и метод поверхностной волны для оценки состояния материалов конструкций. Приемлемая точность сквозного зондирования достигается обычно при базе зондирования более 0,5 м. Применение того или иного метода выбирается в зависимости от конкретных условий и задач обследования.

Методы, основанные на свободных колебаниях конструкции

С помощью свободных колебаний можно оценивать состояние любых конструкций, в которых возможно возбуждение этих колебаний:

- зданий и сооружений (мостов, дымовых труб);
- отдельных конструкций и элементов (перекрытий, колонн, балконов, простенков и т. д.).

При этом различают разные виды и формы колебаний.

Изгибные и крутильные колебания используются при обследовании здания или сооружения в целом, перекрытий, колонн, ферм и других конструктивных элементов для оценки их жесткостных характеристик и граничных условий. В настоящее время наиболее распространенной является методика определения динамических характеристик строительных конструкций по их свободным колебаниям [7–11], возбуждаемым воздействием непосредственно на конструкцию внешней импульсной нагрузкой. Методика включает в себя следующие операции:

- возбуждение и регистрацию колебаний;
- вычисление их спектров Фурье;
- анализ спектров Фурье с целью выделения резонансных пиков, соответствующих различным формам свободных колебаний;
- получение с помощью обратного преобразования Фурье импульсных реализаций выделенных резонансных пиков по каждой форме свободных колебаний;

- идентификация и графическое представление различных форм колебаний.

Дополнительными приемами, позволяющими не только повысить динамический диапазон регистрирующей аппаратуры, но и добиться максимальной амплитуды колебаний по требуемой форме являются следующие:

- возбуждение и регистрация колебаний под действием точечной импульсной нагрузки, прикладываемой в различных точках конструкции;
- сложение (с учетом направления действия нагрузки) колебаний, зарегистрированных при приложении нагрузки в различных точках конструкции (имитация одновременного приложения нагрузки в нескольких точках).

Обработка полученных в результате сложения колебаний (*комбинированных реализаций*) с целью выделения резонансных пиков, соответствующих анализируемой форме колебаний, осуществляется для каждой точки измерения путем сложения или вычитания реализаций, полученных при отдельных ударах.

Предложенный подход позволил провести экспресс-оценку технического состояния здания «Станции технического обслуживания» в г. Москве.

Здание СТО, построенное в 1992 г., подверглось многочисленным реконструкциям и, в конечном итоге, было перепрофилировано — в нем располагаются офисные помещения. Заказчиком было предложено оценить фактическое состояние несущих конструкций здания на предмет возможности увеличения его этажности. Для оценки пространственной жесткости и устойчивости несущих конструкций определялись динамические параметры объекта. Схема расстановки датчиков для определения частот собственных колебаний приведена на рисунке 9, а схема измерений для определения динамических параметров отдельных конструктивных элементов — на рисунке 10.

На рисунках 11–13 приведены модули спектров колебаний здания по первому тону, форма колебаний и конечно-элементная пространственная модель здания, разработанная с учетом результатов измерений.

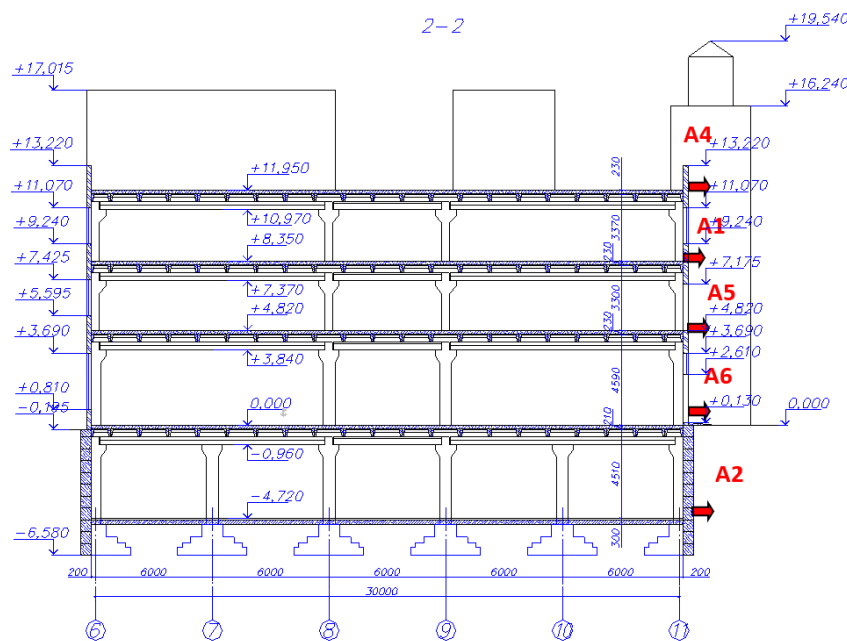


Рисунок 9. Схема расстановки датчиков. Вертикальный створ.
Красными стрелками указаны места установки датчиков и их ориентация

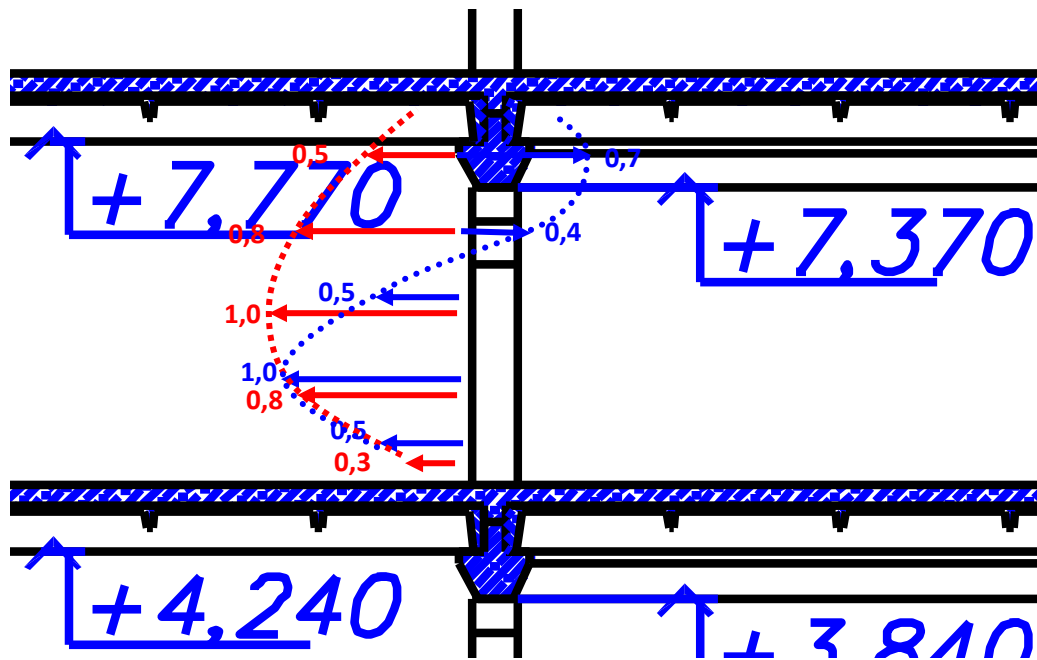


Рисунок 10. Схема измерений и диаграмма колебания колонны на частотах 88 Гц (красный цвет) и 190 Гц (синий цвет)

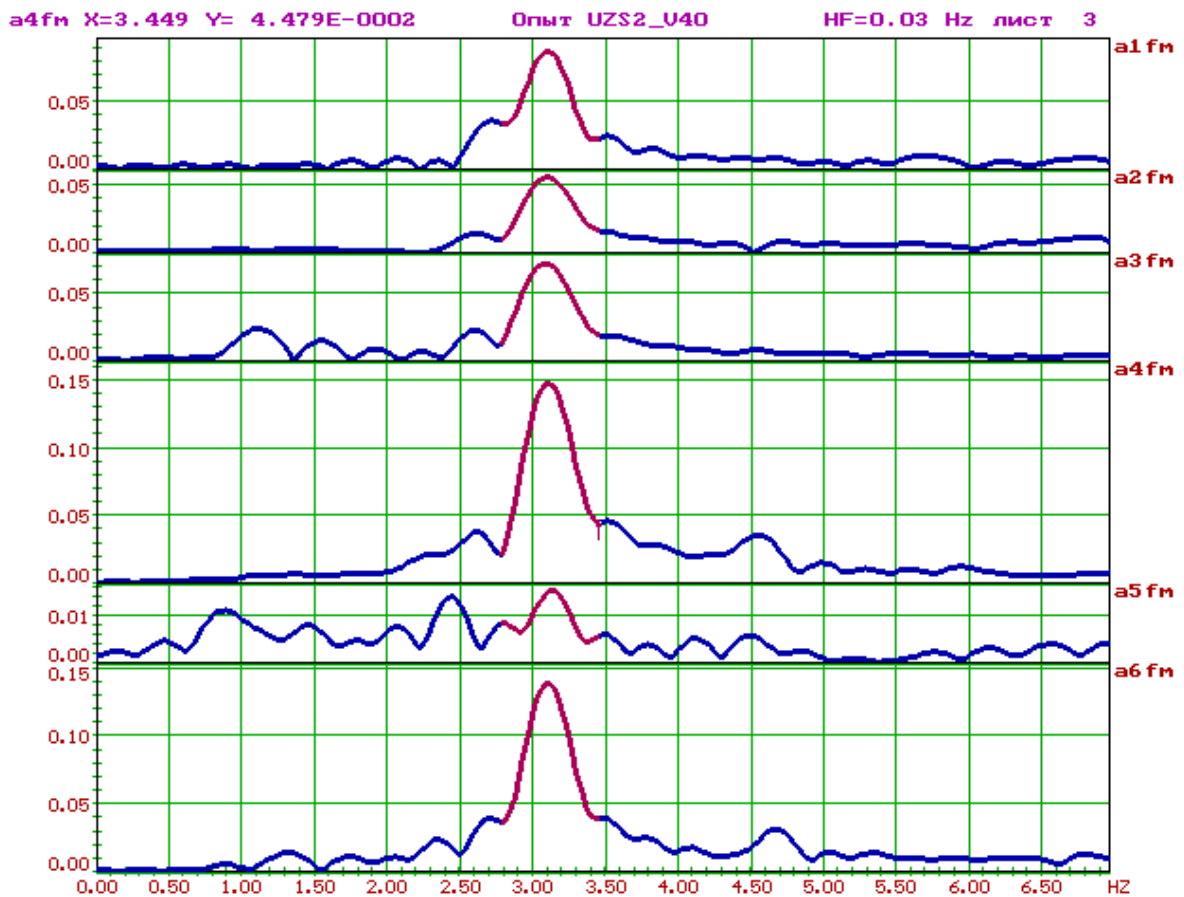


Рисунок 11. Модули спектров Фурье. Выделен пик, соответствующий первому тону на частоте 2,59 Гц

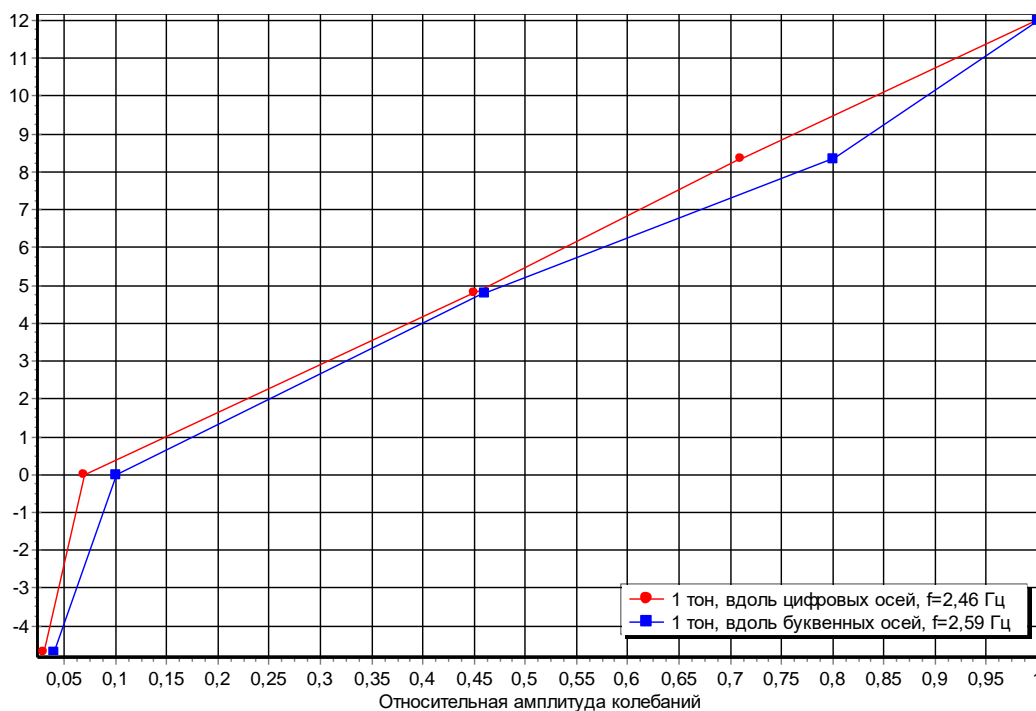


Рисунок 12. Формы колебаний здания по первому тону. Вертикальный створ расстановки датчиков

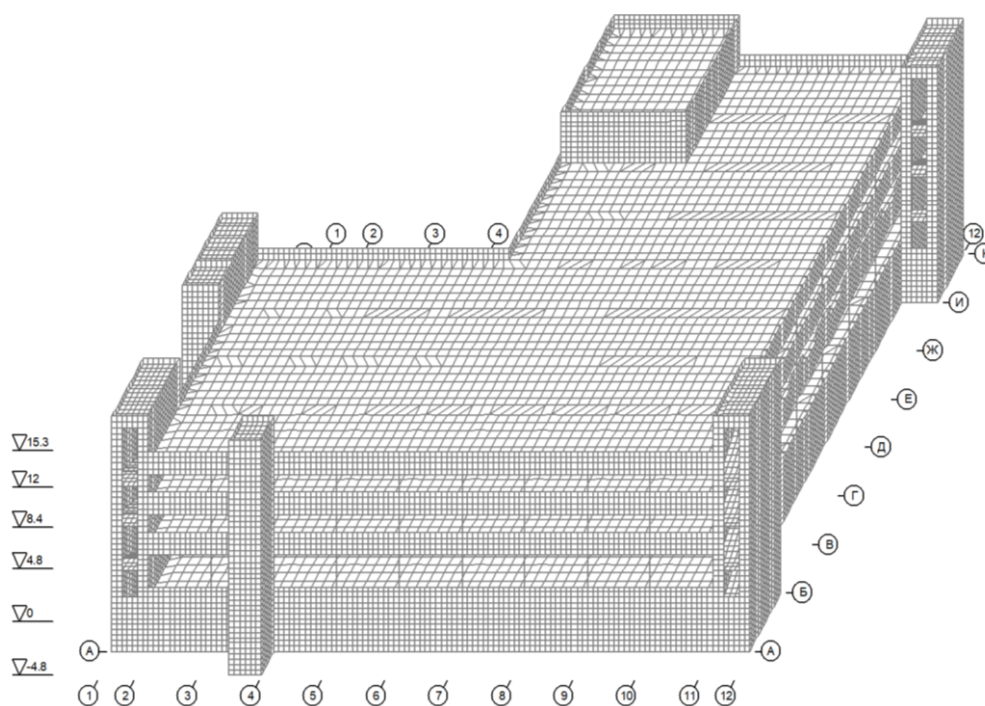


Рисунок 13. Конечно-элементная модель здания

По факту, при высоте около 12 метров, здание имеет подвал глубиной более 4,5 м и собственную частоту колебаний по первому тону 2,46 и 2,59 Гц вдоль цифровых и буквенных осей, соответственно. Это почти на 35 % ниже нормативного значения для данного типа зданий. Для панельно-каркасных зданий в соответствии с ГОСТ⁴ период колебаний по первому тону

⁴ ГОСТ 31937-2011. Межгосударственный стандарт. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния.

должен составлять 3,3–3,5 Гц. Таким образом, несмотря на жесткое защемление в уровне подвала частота колебаний здания по первому тону крайне низка. Это означает, что пространственная жесткость каркаса не обеспечена. Причинами снижения пространственной жесткости и устойчивости может быть, как низкое качество замоноличивания узлов каркаса, так и демонтаж диафрагм жесткости (проведенный в ходе реконструкции) и повышение нагрузки на перекрытия за счет выполнения выравнивающей стяжки и полов.

Используя предложенный метод, можно определять динамические характеристики пролетных конструкций. В том числе перекрытий, выполненных по металлическим фермам.

Схема определения динамических характеристик перекрытия приведена на рисунке 14.

Результаты испытаний в виде импульсных реализаций, спектров и эпюр колебаний представлены на рисунках 15–17. На рисунке 17 жирными линиями показаны экспериментально полученные эпюры колебаний, тонкими — расчетные, полученные в модели.

Кроме того, разработан алгоритм оценки динамических характеристик зданий и сооружений, основанный на анализе кросс-спектров их фоновых микросейсмических колебаний под действием естественных источников. Этот алгоритм применяется обычно при длительном мониторинге зданий и сооружений. При этом первичная идентификация различных форм свободных колебаний здания им сооружения выполняется по его реакции на импульсные воздействия.

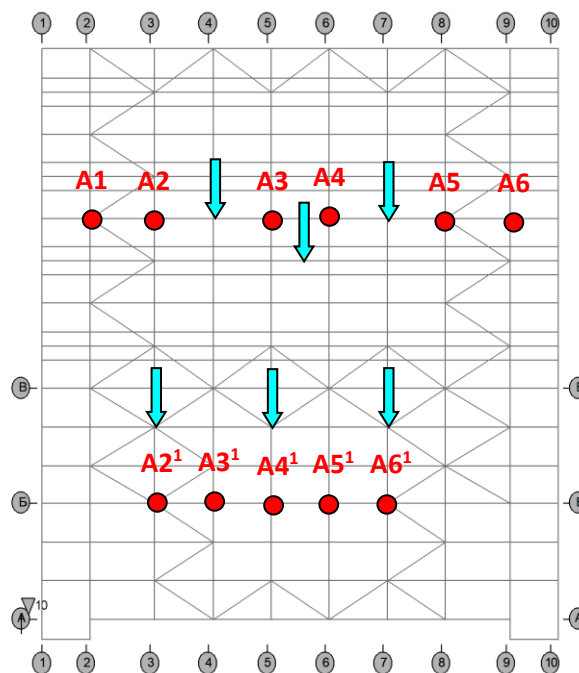


Рисунок 14. Схема расстановки датчиков при проведении испытаний (стрелками показаны места возбуждения колебаний)

Изгибные свободные колебания могут также использоваться для оценки усилий в продольно напряженных (преимущественно растянутых) конструкциях: вантовых конструкциях, тросах, стержнях.

Ниже приведены результаты динамических испытаний вантовых несущих конструкций покрытия главного производственного корпуса автобусного парка № 2 в Санкт-Петербурге.

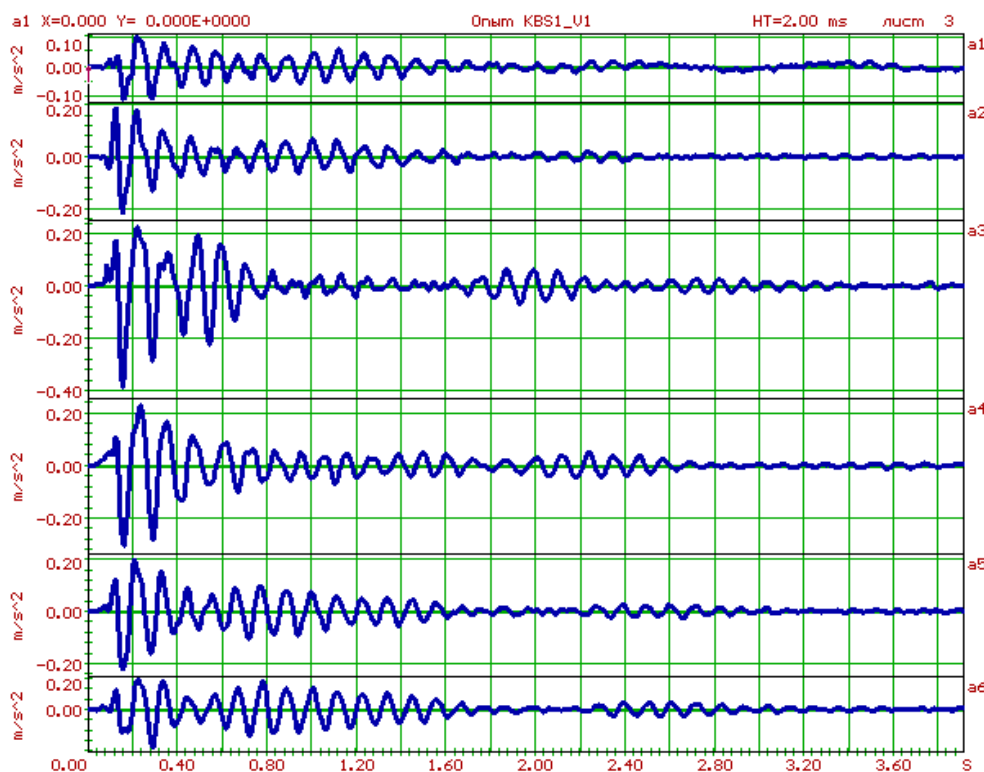


Рисунок 1. Импульсные реализации при колебаниях ферм над бассейном

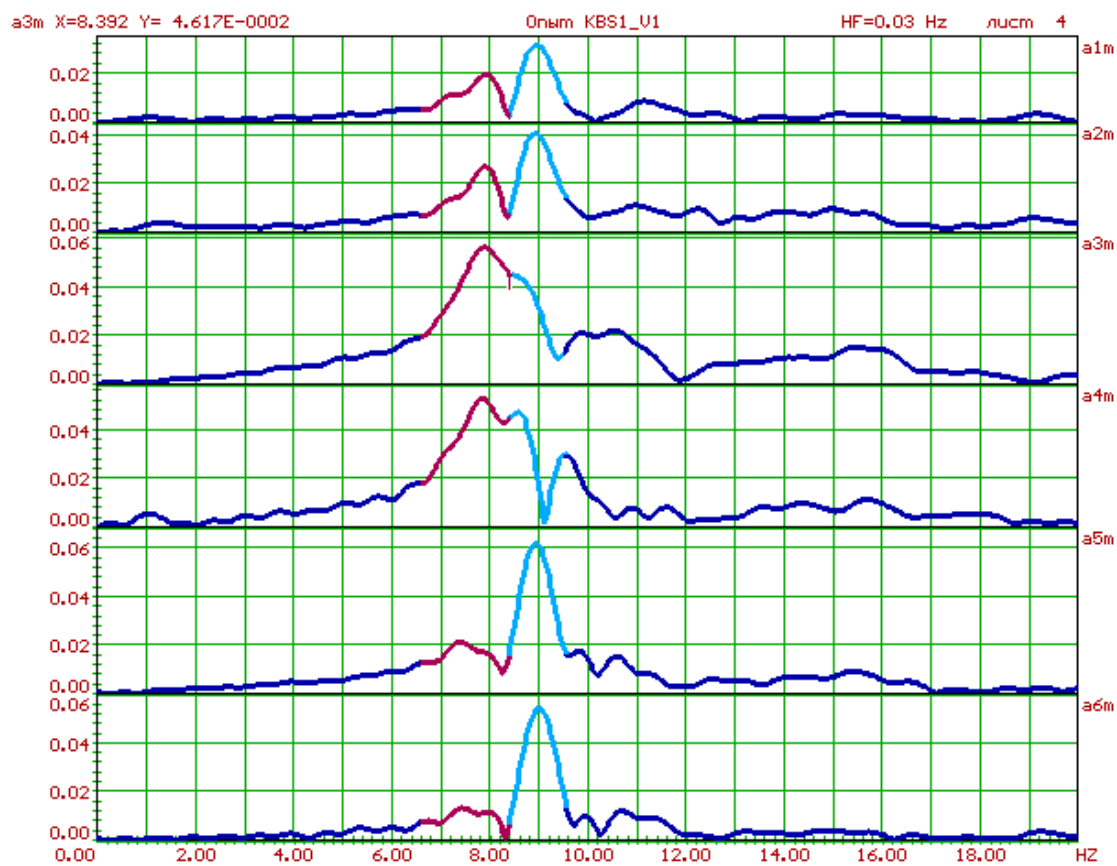


Рисунок 2. Модули спектров колебаний ферм над бассейном

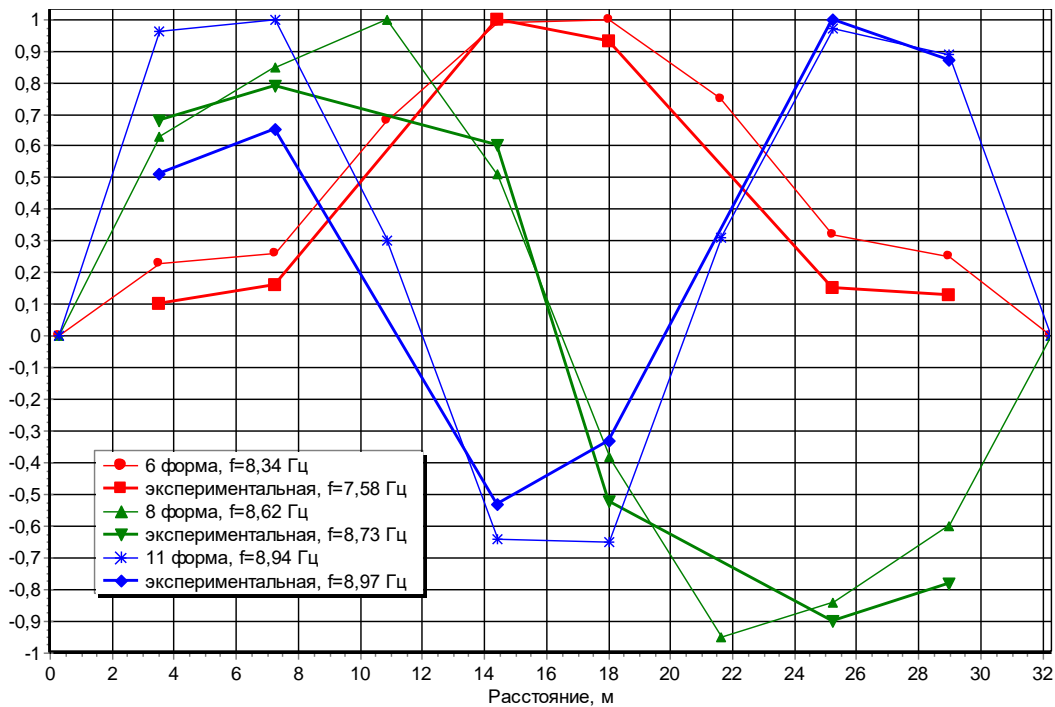


Рисунок 17. Эпюры вертикальных колебаний в уровне середины пролета ферм

Вантовая конструкция покрытия, представленная на рисунке 18, состоит из 32 вант диаметром 65 мм, каждый из которых одним концом закреплен на колонне (4 колонны по 8 вант на каждой, см. фото на рисунке 19), а другим поддерживает покрытие, представляющее ячеистую структуру типа «Кисловодск».

Усилие в ванте по частотам его свободных колебаний определяется по формуле:

$$F = \frac{4m_0 l^2}{n^2 (f_n^2 - f_{n0}^2)}, \quad (9)$$

где m_0 — погонная масса ванты, кг/м; l — длина ванты, м; n — номер тона колебаний; f_n — частота n -ого тона колебаний ванты, Гц; f_{n0} — частота n -ого тона колебаний ненапряженного ванты, Гц.

Таким образом, для определения усилия натяжения в ванте необходимо знать его длину и погонную массу, а также частоты свободных колебаний напряженного и ненапряженного ванты по любому тону. Частоты свободных колебаний напряженного ванты определяются непосредственными измерениями.

Длина ванты должна быть известна из проектной документации или может быть измерена. Что касается частоты свободных колебаний ненапряженного ванты f_0 и его погонной массы m_0 , то они либо должны быть в технических характеристиках ванты, либо определяются экспериментально или расчетным путем.

Для оценки натяжения вант были проведены их динамические испытания с использованием колебаний, возбуждаемых импульсной нагрузкой.

Наиболее приемлемым, с точки зрения практической осуществимости, способом возбуждения свободных колебаний испытываемого ванты является импульсное воздействие легким ударом по нему мягким предметом, например, резиновым молотком или кулаком.



Рисунок 18. Общий вид вантовой конструкции перекрытия

Для определения всех необходимых характеристик ванты достаточно получить частоты нескольких (не менее двух) тонов его свободных колебаний и частоту первого тона свободных колебаний ванты с дополнительным грузом. Для идентификации различных тонов свободных колебаний ванты достаточно определить амплитуды и фазы колебаний в двух точках по длине ванты. Поэтому измерения выполняются в двух точках.

Методика свободных колебаний с использованием продольных волн

Продольные колебания положены в основу методов, разработанных для обследования железобетонных фундаментов опор ЛЭП в 2005 году:

- метода резонанса поперечного сечения;
- метода продольных колебаний.

Эти же методы могут использоваться для оценки состояния свай и колонн.

Метод продольных колебаний

Метод продольных колебаний основан на возникновении свободных продольных колебаний фундамента в результате многократного отражения продольной (стержневой) волны от пяты и оголовка фундамента (или от горизонтальной трещины в фундаменте, если она имеется). Таким образом, спектр колебаний вдоль фундамента зависит от акустических характеристик бетона, геометрических размеров фундамента и имеющихся в нем дефектов.

В ходе полигонных испытаний с использованием продольных колебаний фундамента проводились его испытания на слом, для чего испытывался исправный фундамент, затем создавалась трещина в области монтажного отверстия и снова проводились испытания.

Испытания на слом проводились по схеме на рисунке 19. Четыре акселерометра располагались вертикально на 4 гранях фундамента. Удары наносились средним (около 400 гр.) и тяжелым (около 4 кг) молотками по центру торца фундамента вертикально (непосредственно или через стержень $\varnothing 12$ мм и длиной 150 мм со сферическими торцами) и по углам фундамента

через стержень под углом около 45° от вертикали. В последнем случае имитировался случай, когда по торцу фундамента или анкерам нанести вертикальный удар невозможно.

На рисунке 20 приведены спектры усредненного сигнала по всем 4 датчикам на фундаменте с трещиной в области монтажного отверстия (1 — красный) и целом (2 — синий). Заметно снижение частот резонансных пиков на поврежденном фундаменте, прежде всего на 1^{ом} тоне (500–600 Гц).

Для исследования влияния степени разрушения фундамента в области монтажного отверстия на частоты резонансных пиков в спектре выполнено численное моделирование реакции фундамента на удар по центру его торца для фундамента без дефектов и с дефектной зоной толщиной 10 см ($2 \div 2,1$ м от торца фундамента) со снижением модуля упругости бетона в ней в 4, 16 и 64 раза.

Спектры результатов численного моделирования реакции фундамента на импульсное воздействие приведены на рисунке 21:

- без дефектов — кривая 1 — красная;
- с ослаблением бетона в зоне дефекта в 4 раза — кривая 2 — синяя;
- с ослаблением бетона в зоне дефекта в 16 раз — кривая 3 — коричневая;
- с ослаблением бетона в зоне дефекта в 64 раза — кривая 4 — зеленая.

Как видно из рисунка 20 и 21, 1^й и 2^й тона спектров экспериментальных и расчетных реакций довольно близки. Экспериментальный спектр поврежденного фундамента наиболее близок к спектру расчетной реакции для случая снижения модуля упругости в дефектной зоне в 16 раз.

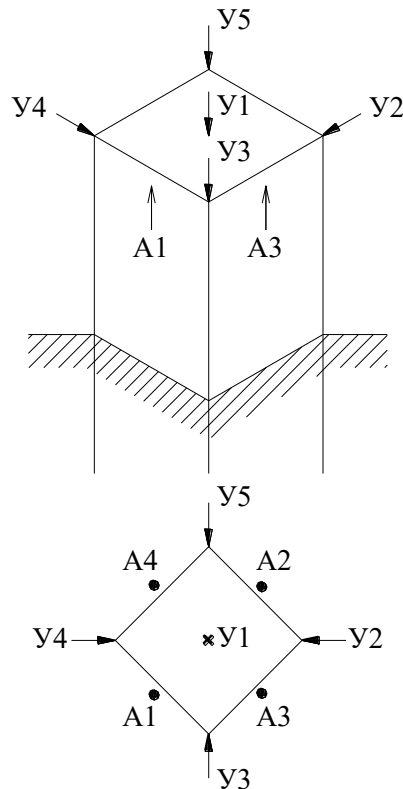


Рисунок 19. Схема испытаний фундаментов на слом

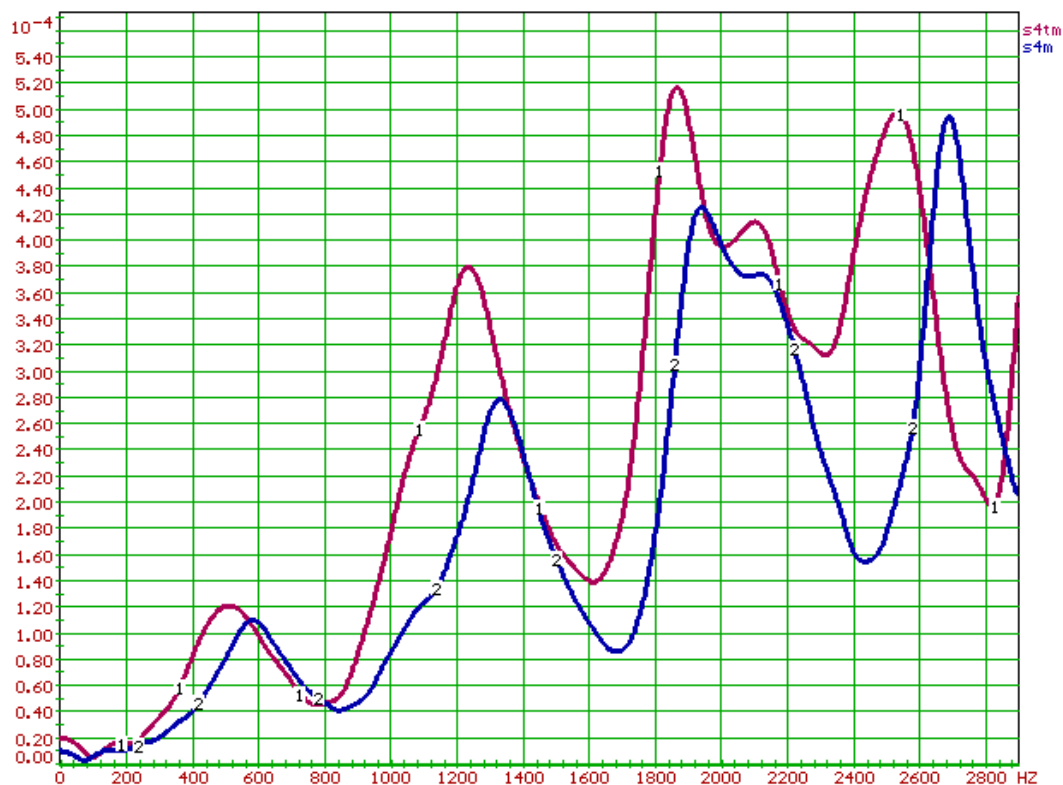


Рисунок 20. Спектры Фурье реакции на удар по центру поврежденного

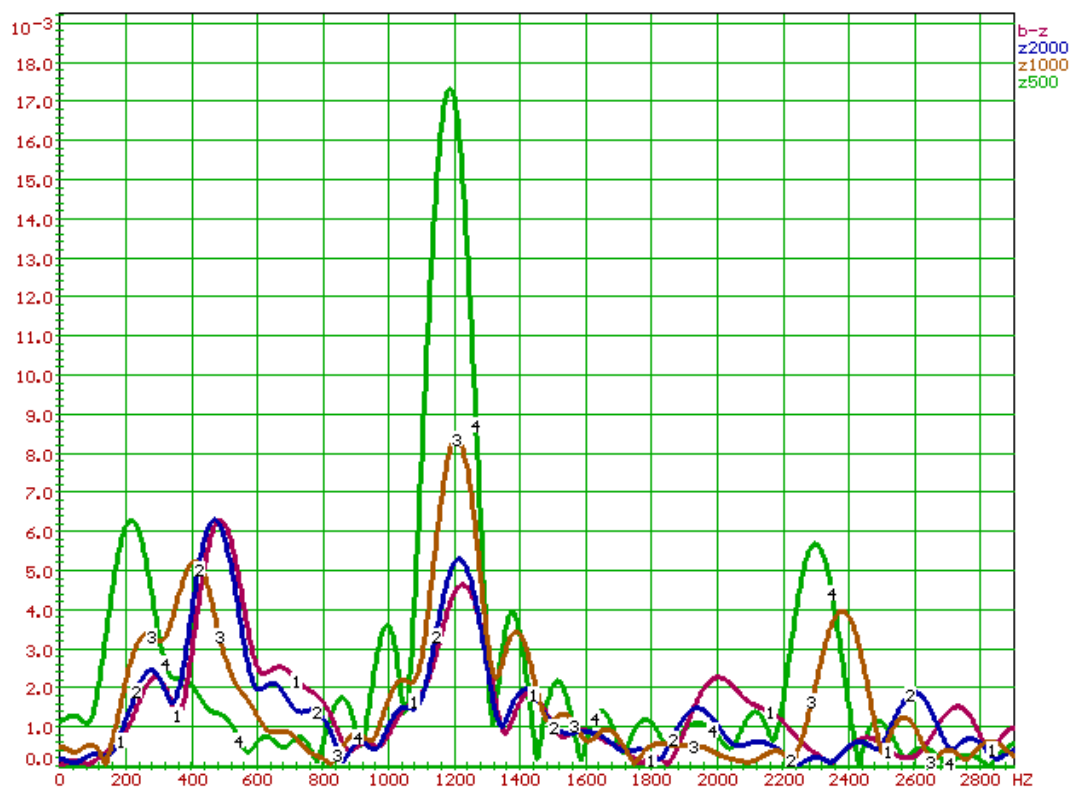


Рисунок 21. Спектры Фурье расчетных реакций фундамента

Поскольку дефект, созданный в поврежденном фундаменте, представляет собой трещину в бетоне с целой арматурой, то, скорее всего этот дефект соответствует средней степени повреждения.

Метод резонансных колебаний поперечного сечения фундамента

Методика испытаний аналогична остальным методикам обследования фундаментов акустическими методами и заключается в оценке состояния оголовка фундамента (выступающей из земли части фундамента) по изменению частоты колебаний поперечного сечения фундамента.

Частота резонансных колебаний поперечного сечения фундамента определяется формулой

$$f = \frac{V_k}{2b}, \quad (10)$$

где V_k — кажущаяся скорость продольной волны в фундаменте, м/с; b — размер поперечного сечения фундамента в направлении распространения волны, м, откуда

$$V_k = 2bf. \quad (11)$$

Скорость продольной волны в бетоне связана с кажущейся скоростью формулой

$$V_l = kV_k. \quad (12)$$

где k — коэффициент, зависящий от геометрии поперечного сечения конструкции в измерительном сечении (для квадратного стержня $k = 1,22$).

Алгоритм обследования оголовка фундамента происходит следующим образом:

- Выполнялись измерения на оголовке по схеме, приведенной на рисунке 22. На одной боковой поверхности фундамента расставляли 3–4 датчика с шагом по высоте 0,1 м, а на противоположной с тем же шагом назначались точки удара. Удары наносились легким молотком весом до 200 г. Измерения выполнялись по двум взаимно перпендикулярным направлениям.
- По результатам обработки определялись частоты 1 тона резонансных колебаний поперечного сечения фундамента в различных по высоте фундамента сечениях. В прочном бетоне оголовка эта частота не меняется по высоте фундамента и составляет для фундамента сечением 0,4×0,4 м, 4 400–4 600 Гц. На поврежденном фундаменте эти частоты снижаются.

На рисунке 23 приведены примеры спектров резонансных колебаний поперечного сечения фундамента:

кривая 4 (зеленая) — неповрежденный фундамент (прочный бетон);

кривая 1 (красная) — поврежденный фундамент (поврежден оголовок) в сечении, расположенном на 50 см ниже границы явно выраженных повреждений;

кривая 2 (синяя) — там же в 30 см;

кривая 3 (оранжевая) — там же в 10 см.

Таким образом, по мере удаления измерительного сечения от зоны разрушений бетона частота колебаний в нём растет, что позволяет оценить состояние бетона фундамента с оценкой его изменения по высоте фундамента. При этом для оценки состояния дефектного участка

фундамента не обязательно иметь измерительное сечение в этом участке, достаточно, чтобы оно было в непосредственной близости от него. Этот же метод может быть использован при обследовании колонн, особенно оштукатуренных, где применение методов сквозного зондирования или ультразвуковых методов может быть сопряжено с определенными трудностями.

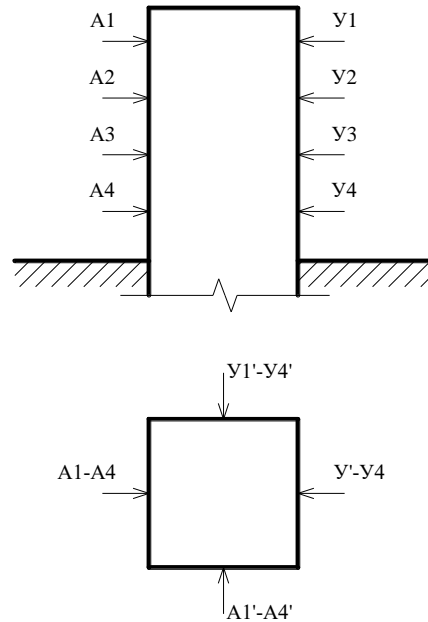


Рисунок 22. Схема полигонных испытаний методом резонанса

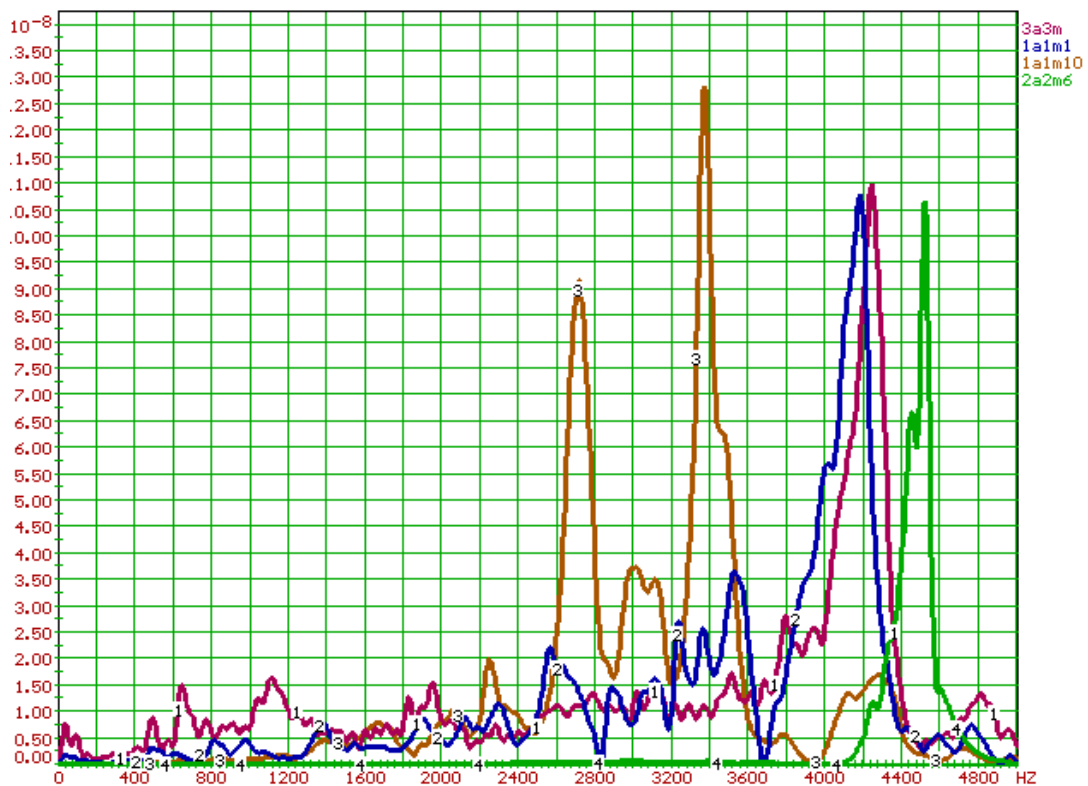


Рисунок 23. Автоспектры колебаний поперечного сечения фундаментов

Оценка жесткости закрепления в теле фундамента анкерных болтов

Методика испытаний анкерных болтов основана также на методе продольных колебаний болта. В случае его жесткой заделки болт ведет себя как стержень с заделкой одного конца, близкой к «жесткой».

При разупрочнении бетона вокруг анкерного болта изменяются граничные условия и соответственно частоты свободных колебаний. Результаты полигонных испытаний анкерных болтов показали, что:

В прочном бетоне частота 1^{ого} тона колебаний анкера длиной 35 см составляет около 5 000–6 000 Гц (рис. 23 и 24, красная линия). При ослаблении бетона вокруг анкера образуются 2 пика:

- частота одного растет по мере ослабления бетона, быстро достигая частоты около 7 200 Гц (частота 1^{ого} тона свободного стального стержня длиной 0,35 м) и затем стабилизируется;
- другой пик имеет более низкую частоту, которая тем ниже, чем хуже состояние бетона и состояние арматуры, к которой закреплен анкер.

При этом частоты высших тонов по мере разрушения бетона незначительно снижаются.

Судя по результатам измерений при полигонных испытаниях на разрушенной оголовке удовлетворительным состояние бетона вокруг анкеров можно считать при частоте 1^{ого} пика выше 4 000 Гц.

Этот метод может использоваться также для определения длины анкеров и обнаружения дефектов в них (полных или частичных разрывов).

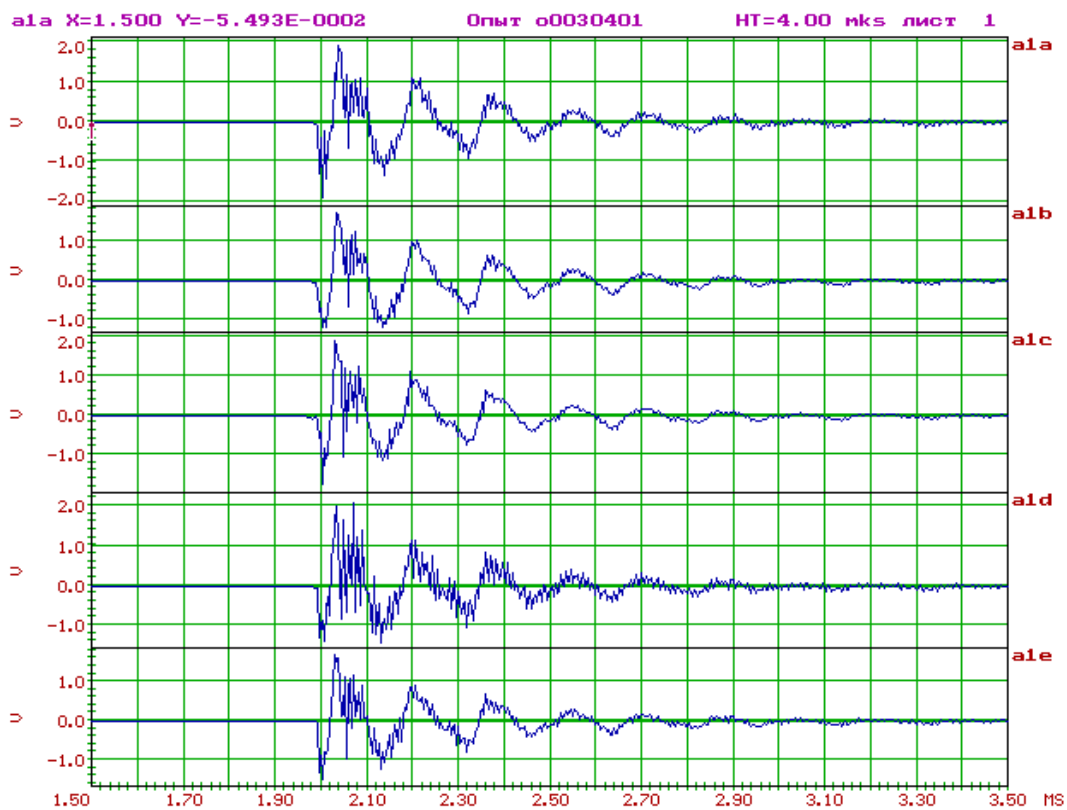


Рисунок 24. Реакция торца анкера на удар бойком

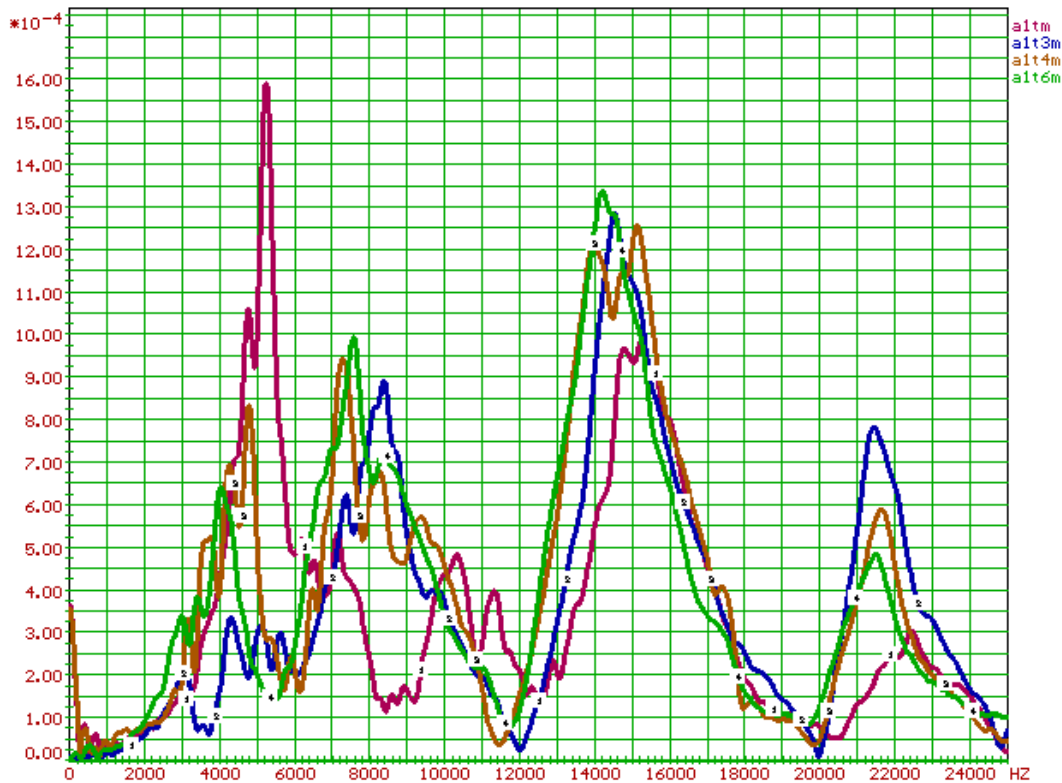


Рисунок 25. Спектры продольных колебаний анкера в неповрежденном фундаменте (красная линия) и при различной степени разрушения бетона

Результаты

Предлагаемые методы обследования являются оригинальными научными разработками группы специалистов СПбГАСУ и 23 Государственный морской проектный институт, филиал (Санкт-Петербург). Часть методов используется при обследовании реальных объектов, часть продолжают совершенствоваться и находятся в стадии теоретических и экспериментальных доработок.

Так «Метод свободных колебаний» для зданий и сооружений впервые был применен в 1991 г. для оценки сейсмостойкости зданий Министерства Обороны. В настоящее время этим методом обследовано около сотни зданий и сооружений, в том числе высотных и уникальных зданий — исторических памятников, Александровская колонна (С.-Петербург, Дворцовая площадь), Петропавловский собор, Кронштадтской Морской собор, Исаакиевский собор и т. д. Кроме того, с середины 90^{хх} этот метод освоен и применяется во ВНИИ ГО и ЧС. Разработан и применяется на практике (в частности, при мониторинге состояния Великокняжеской усыпальницы в Петропавловской крепости (С.-Петербург)) также алгоритм, основанный на определении динамических характеристик здания по его микросейсмическим колебаниям, вызванных естественными источниками.

Широко применяется метод свободных колебаний также для обследования отдельных элементов и конструкций зданий (перекрытий, колонн и т. д.), в том числе для оперативного выделения из большой группы однотипных конструкций наиболее поврежденных, с пониженной несущей способностью.

Методы свободных колебаний на продольных волнах (методы продольных колебаний и резонанса поперечного сечения) были разработаны для обследования ж/бетонных фундаментов ЛЭП по заданию ФСК России.

Метод резонанса поперечного сечения конструкции используется для оценки состояния ж/бетонных колонн в зданиях и мостовых опорах.

Метод, основанный на использовании поверхностных волн, продолжает разрабатываться для проведения исследований на неоднородных по составу строительных конструкциях. Метод удобен для обследования бетонных конструкций, кирпичной кладки и грунтовых, в том числе скальных массивов.

Основными достоинствами метода являются:

- возможность работы при одностороннем доступе, что делает его особенно эффективным при обследовании подземных сооружений (шахт, тоннелей, стен подземных помещений);
- большая длина зондирующих волн, что позволяет обследовать массивы под покрытиями (штукатуркой, теплоизоляцией) или в заобделочном пространстве.

С использованием этого метода обследовано большое количество кирпичных и железобетонных конструкций. В частности, обследовалась кирпичная кладка арки Генштаба (С.-Петербург, Дворцовая площадь), обделка и заобделочное пространство наклонного хода ст. метро «Невский проспект» (Санкт-Петербург), обделки перегонных тоннелей метро на участке Строгино-Крылатское-Славянский бульвар (Москва), обделки стволов шахт (ШПУ) и т. д.

Метод сквозного зондирования используется для обследования, как правило, крупногабаритных конструкций при наличии доступа к их противоположным поверхностям, например фундаментов конструкций и сооружений, а также кирпичных колонн, по которым выполнены перекрытия в виде сводов.

Наиболее интересный пример использования этого метода — исследование массива Александровской колонны (С.-Петербург, Дворцовая площадь).

Работы с использованием приведенных методов выполнялись по всей стране: на Камчатке, Сахалине, Бурятии, Оренбургской, Мурманской, Архангельской областях, Воркуте, Уфе, Пензе, Томске, Дагестане, Краснодарском крае, а также в Ташкенте, Киргизии, Белоруссии, Крым. Большой объем работ выполнен в Санкт-Петербурге, Москве и Московской области.

Важным преимуществом приведенных методов является то, что все они реализуются с помощью универсального измерительного комплекса, который включает программы регистрации, обработки, блоки амплитудно-цифровых преобразователей и датчики-акселерометры для проведения измерений в широком диапазоне частот колебаний и волн.

ЛИТЕРАТУРА

1. H.A. Ali, B. Zhang, C. Xiao, B. Zhao, D. Xuan, C.S. Poon, Valorization of fine recycled C&D aggregate and incinerator bottom ash for the preparation of controlled low-strength material (CLSM), Clean. Waste Syst. 3 (2022) 100061. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2022.100061>.

2. M. Afiq, H. Abdullah, R. Saifulnaz, M. Rashid, M. Amran, F. Hejazii, N. Azreen, B. Masenwat, R. Fediuk, Y.L. Voo, N.I. Vatin, M.I. Idris, Recent Trends in Advanced Radiation Shielding Concrete for Construction of Facilities: Materials and Properties, *Polymers (Basel)*. 14 (2022) 2830.
3. R. Fediuk, High-strength fibrous concrete of Russian Far East natural materials, in: *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, 2016. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/116/1/012020>.
4. O.M. Smirnova, I. Menendez Pidal, A. V. Alekseev, D.N. Petrov, M.G. Popov, Strain Hardening of Polypropylene Microfiber Reinforced Composite Based on Alkali-Activated Slag Matrix, *Materials (Basel)*. 15 (2022) 1607. <https://doi.org/10.3390/ma15041607>.
5. K. Ali-Benyahia, S. Kenai, M. Ghrici, Z.-M. Sbartaï, S.-M. Elachachi, Analysis of the accuracy of in-situ concrete characteristic compressive strength assessment in real structures using destructive and non-destructive testing methods, *Constr. Build. Mater.* 366 (2023) 130161. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130161>.
6. S.D. Datta, M.H.R. Sobuz, A.S.M. Akid, S. Islam, Influence of coarse aggregate size and content on the properties of recycled aggregate concrete using non-destructive testing methods, *J. Build. Eng.* 61 (2022) 105249. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105249>.
7. B. Liu, X. Liu, G. Li, S. Geng, Z. Li, Y. Weng, K. Qian, Study on anisotropy of 3D printing PVA fiber reinforced concrete using destructive and non-destructive testing methods, *Case Stud. Constr. Mater.* 17 (2022) e01519. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01519>.
8. A.H. AlAteah, K.A. Alawi Al-Sodani, M.O. Yusuf, A.A. Adewumi, M.M.H. Al-Tholaia, A.O. Bakare, I. Momohjimoh, A.K. Usman, Modelling of strength characteristics of silica fume/glass ternary blended concrete using destructive and non-destructive testing methods, *J. Mater. Res. Technol.* 22 (2023) 997–1013. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.11.180>.
9. Z. Zhao, Review of non-destructive testing methods for defect detection of ceramics, *Ceram. Int.* 47 (2021) 4389–4397. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.10.065>.
10. A. Hafiz, T. Schumacher, A. Raad, A self-referencing non-destructive test method to detect damage in reinforced concrete bridge decks using nonlinear vibration response characteristics, *Constr. Build. Mater.* 318 (2022) 125924. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125924>.
11. U. Murugan, Assessment condition of RC corroded column by non-destructive testing methods, *Mater. Today Proc.* 45 (2021) 6645–6648. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.866>.
12. Улыбин А.В. О выборе методов контроля прочности бетона построенных сооружений // *Инженерно-строительный журнал*. 2011. № 4. С. 10–15.
13. H.R. Maleki, B. Abazadeh, Y. Arao, M. Kubouchi, Selection of an appropriate non-destructive testing method for evaluating drilling-induced delamination in natural fiber composites, *NDT E Int.* 126 (2022) 102567. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2021.102567>.
14. A.A. Mohammed, S.K. Rafiq, N.A. Hamid, The assessment of concrete subjected to preloading using non destructive testing methods, *Case Stud. Constr. Mater.* 15 (2021) e00705.

15. H. Chen, M. Zhou, S. Gan, X. Nie, B. Xu, Y.L. Mo, Review of wave method-based non-destructive testing for steel-concrete composite structures: Multiscale simulation and multi-physics coupling analysis, *Constr. Build. Mater.* 302 (2021) 123832. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123832>.
16. A. Hubáček, J. Brožovský, R. Hela, Comparison of Properties of Shotcrete Tested Using Destructive and Non-destructive Methods, *Procedia Eng.* 65 (2013) 63–68. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.09.012>.
17. H. Shi, L. Song, W. Chen, H. Zhang, G. Wang, G. Yuan, W. Zhang, G. Chen, Y. Wang, G. Lin, New non-destructive method for testing the strength of cement mortar material based on vibration frequency of steel bar: Theory and experiment, *Constr. Build. Mater.* 262 (2020) 120931. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120931>.
18. P. Liang, Y. Han, Y. Zhang, Y. Wen, Q. Gao, J. Meng, Novel non-destructive testing method using a two-electrode planar capacitive sensor based on measured normalized capacitance values, *Measurement.* 167 (2021) 108455. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108455>.
19. A. Khan, R. Gupta, M. Garg, Determining material characteristics of “Rammed Earth” using Non-Destructive Test methods for structural design, *Structures.* 20 (2019) 399–410. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.05.003>.
20. Р. Джонс, И. Фэкзоару. Неразрушающие методы испытаний бетонов. — М., Стройиздат, 1974, 292 с.
21. Алешин Н.А. Электросейсмоакустические методы обследования зданий. — М., Стройиздат 1982, 158 с.
22. Дзенис В.В. Акустические методы контроля в технологии строительных материалов. — Л., Стройиздат, 1978, 152 с.
23. Сейсморазведка. Справочник геофизика. В 2-х книгах. / Под ред. В.П. Наноконова: 2-е изд., перераб. и доп. — М., Недра, 1990, 336 с., ил.
24. S. Savin, V. Tsakalidis, The use of elastic oscillations of different wavelengths to evaluate the dynamic parameters of buildings and structures and assess the strength of materials of the building construction, in: *Proc. 5th Int. Conf. Comput. Methods Struct. Dyn. Earthq. Eng. (COMPDYN 2015)*, Institute of Structural Analysis and Antiseismic Research School of Civil Engineering National Technical University of Athens (NTUA) Greece, Athens, 2015: pp. 706–720. <https://doi.org/10.7712/120115.3424.1671>.

Savin Sergei Nikolaevich

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia
E-mail: snsavin@lan.spbgasu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9369-8214>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=426347

Popov Vladimir Mirovich

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia
E-mail: popov_vladimir_m@mail.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=769930

Pukharenko Yurii Vladimirovich

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia
E-mail: push@lan.spbgasu.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=416932

Morozov Valerij Ivanovich

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia
E-mail: valter@lan.spbgasu.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=387958

Tsyganovkin Viktor Vladimirovich

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia
E-mail: vcyganovkin@lan.spbgasu.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1085064

Improvement of methods for integral assessment of physical and mechanical properties of a building

Abstract. The research object is buildings and structures, which technical condition must be established as a result of the survey. Authors developed and successfully applied several methods for assessing the condition of building structures such surface wave method; transmission sensing (through sounding) method; methods based on free oscillations of structures and their elements. The surface wave method is based on the connection of the surface wave velocity with the acoustic characteristics of structural materials. Moreover, if the acoustic characteristics of the structural materials are variable in depth from the surface or the structure has a limited thickness, then the speed of the surface wave depends on its length. By constructing dispersion curves (the dependence of the wave velocity on its length), it is possible to solve the inverse problem and build a high-speed section of the structure using the dispersion curve. The transmission sensing method is used in cases where there is access to at least two opposite surfaces of the structure, but the use of ultrasonic devices is difficult or impossible for some reason. In transmission probing tests, sensors (piezoaccelerometers) are usually installed on one side of the structure, and hammer blows with an accelerometer mounted on it are applied on the other. The mass of the hammer depends on the base of the sound and the intensity of the attenuation of the wave. The essence of the free oscillation method is that its dynamic characteristics are used as the initial data on the state of the object of examination — the forms and types of free oscillations and their corresponding frequencies (periods), decrements, and oscillation plots. Their choice is primarily due to the fact that dynamic characteristics are objectively characteristic of the test object, they depend on the design, installation quality, material and structural characteristics, on the existing defects, that is, on the set of components that determine the condition and bearing capacity of structures. In addition, the analysis of the relative displacements of the structural elements of the structure under study makes it possible to evaluate the actual scheme of its operation at the time of the survey and create an adequate finite element model. At the same time, it is possible to assess

external factors, for example, the level of influence of external dynamic impacts from earthquakes, transport, other events, etc. The result of using these methods is the possibility of obtaining reliable data for calculating the bearing capacity of building structures and assessing their technical condition.

Keywords: free oscillations; resonant oscillations; bending waves; end-to-end sounding; verification of computational models; dynamic parameters; amplitude spectrum of oscillations; cross spectrum of oscillations