

В. А. БЕРЕГОВОЙ, д-р техн. наук, проф.

И. Ю. ЛАВРОВ, канд. техн. наук

А. В. СЕМИЛЕТКОВ

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства
(Пенза, Россия)

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОЛОГИЧЕСКОЙ И ЛАБОРАТОРНОЙ БАЗЫ ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. В работе приведены результаты экспериментального сравнения величин коэффициентов вариации, полученных различными методами вибрационного нагружения образцов стали, алюминиевого сплава и высокопрочного мелкозернистого бетона. Описана структура лабораторного комплекса и предложены апробированные на практике рекомендации, обеспечивающие рост показателей точности и воспроизводимости измерений при неразрушающем контроле динамических свойств бетона.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, динамический модуль упругости, логарифмический декремент, свободные колебания, резонансный метод, бетон, лабораторный комплекс, демпфирование.

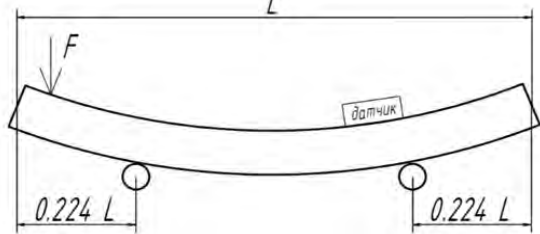
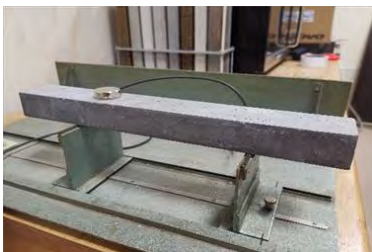
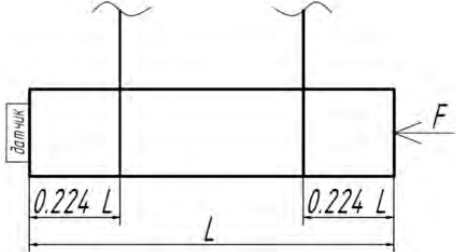
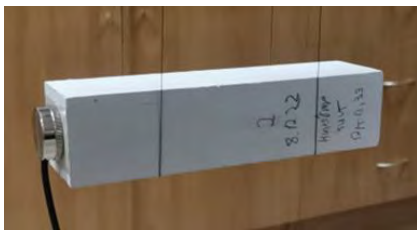
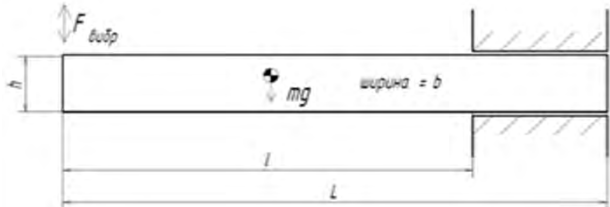
Введение

Бетон, работающий в условиях вибрационной нагрузки, должен соответствовать регламентированным динамическим характеристикам – динамическому модулю упругости E_d и логарифмическому декременту колебаний δ , определение которых является важной задачей неразрушающего контроля, поскольку эти параметры влияют на резонансные частоты и затухание колебаний конструкции [1–6]. Стандартизованные методики – ГОСТ 10060-2012 и ASTM E1876 – предусматривают регистрацию отклика на изгибные или продольные колебания образца-балочки с использованием резонансного метода или метода свободных затухающих колебаний [7,8]. Однако оба подхода имеют ограничения: потери энергии в узлах крепления приводят к искажению E_d и δ , и низкую повторяемость из-за случайных флуктуаций сигнала, а серийные приборы, например, ИКВТ-2, ограничены по частотному диапазону и не допускают гибкой настройки.

Для устранения перечисленных недостатков был разработан лабораторный комплекс и написан программный код, в котором реализован метод свободных колебаний с автоматическим определением динамических параметров и построением огибающей сигнала.

Методика неразрушающего контроля вибродинамических параметров бетона

Направление распространения колебаний по материалу обуславливает выбор экспериментального метода определения их параметров в рамках оценки вибродинамических характеристик. В случае поперечных колебаний образец устанавливается на двух опорах, тогда как при их продольном характере предпочтительнее подвешивание материала на нитях [9]. Консольное закрепление является более универсальным и позволяет задействовать инструментарий обоих методов испытаний. Его основной недостаток – большая величина рассеивания энергии в месте зажима, что вносит дополнительную погрешность в результаты экспериментов (рис. 1) [10].

1	
a	b
	
2	
a	b
	
3	
a	b
	

1 –размещение на двух опорах; 2 –подвешивание; 3 –консольное закрепление.

Рис.1. Исследование поперечных и продольных колебаний различными методами (а – схема испытания; b – фото контрольного образца)

Лабораторные испытания образцов бетона осуществляли посредством свободных колебаний с использованием образцов-балочек длиной 300 мм с

сечением 40х28 мм. Для валидации результатов, полученных в ходе эксперимента для высокопрочного мелкозернистого бетона, использовали эталонные образцы из углеродистой стали 20, алюминиевого сплава *Д16Т* с заранее известными показателями (рис. 2). При этом испытания производили двумя методами закрепления: консольным и на двух опорах.

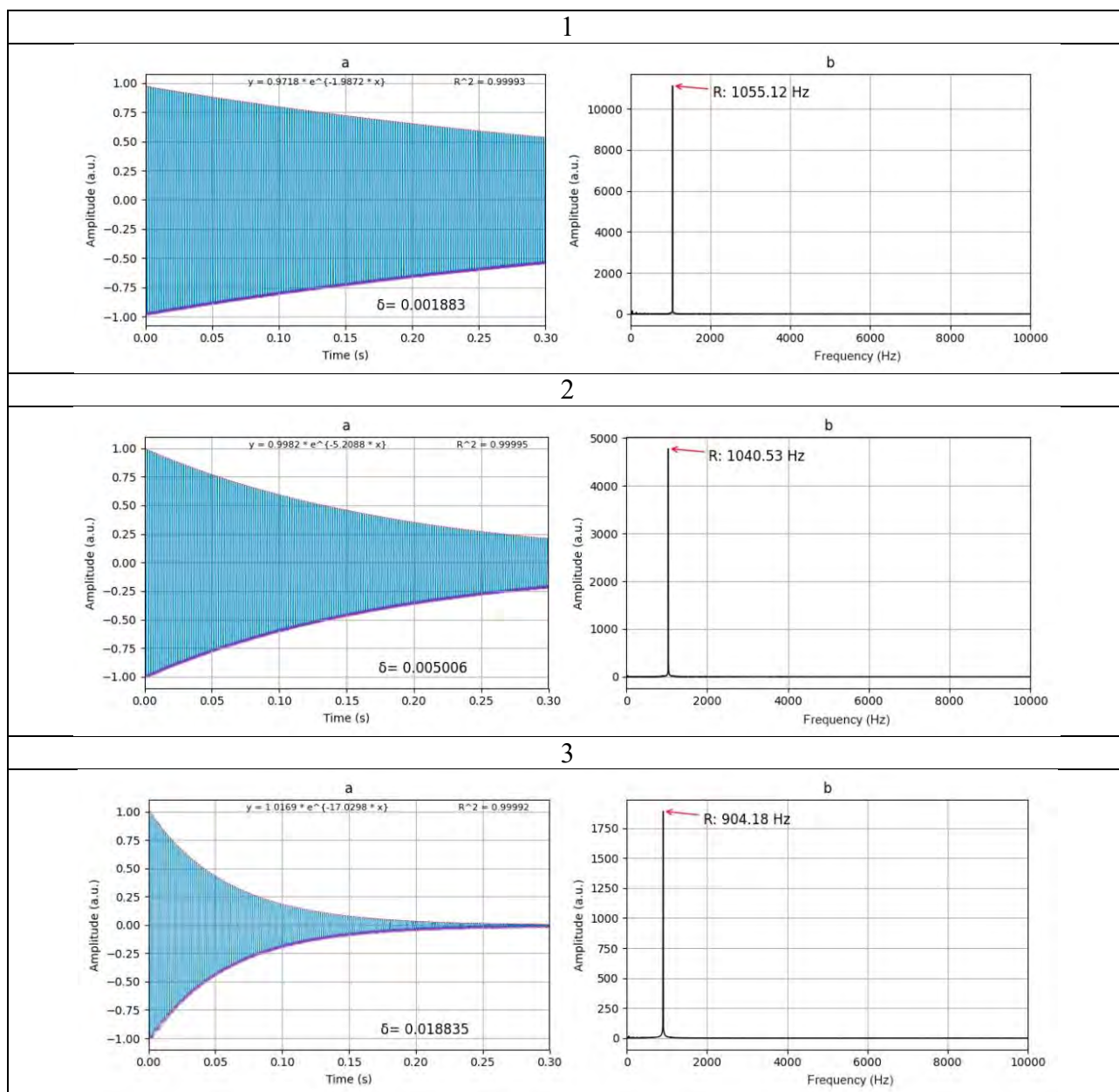
Бетонную смесь готовили на портландцементе ЦЕМ 0 52,5Н с добавлением кварцевой муки, микрокремнезёма и поликарбоксилатного гиперпластификатора; расход компонентов (кг/м³): цемент – 623, кварцевая мука – 249, песок – 1247, пластификатор Melflux 5581f – 3,12, вода – 222. После распалубки через 24 ч образцы выдержали 14 суток в камере нормального твердения, а затем перемещали в воздушно-сухие условия ($t = 20 \pm 2$ °С, $\phi = 29 \pm 7$ %). Изготовление производилось на ребре 28 мм, в соответствии с рекомендациями ГОСТ 24544-2020 (Приложение Е). Общие рекомендации по изготовлению контрольных образцов основаны на ГОСТ 10180-2012, ГОСТ 22685-89 и учитывают практические аспекты испытаний бетонов различных видов [11, 12].

Отклонения геометрических размеров контрольных образцов по плоскостности опорной поверхности и поверхности, прилегающей к датчику, не превышали 0,05 мм, а по величинам перпендикулярности смежных граней – 1 мм. Непосредственно перед испытанием определяются масса и геометрические параметры образца: в его середине и на расстояниях 10 мм от торцов. Затем на верхнюю грань образца с помощью двусторонней клейкой ленты толщиной 0,1 мм крепится датчик пьезоэлектрического типа для регистрации колебаний. Оптимальным вариантом является расположение датчика вблизи опор (см. рис.1). Размещение датчика в центре верхней грани повышает качество фиксации колебательного процесса, но больше влияет на процесс колебаний. Важным условием является одинаковое расположение датчика относительно опор и образца на протяжении испытаний всех образцов. Величина шероховатости поверхности (*Ra*) образца в месте приклеивания датчика должна быть не более 3,2.

Образец с датчиком помещается на опоры из резины или иного упругого материала с твердостью 70-90 единиц Shore A, расположенные на расстоянии 0,224*L* от его торцов. При таком расположении рассеивание энергии в зоне контакта образца и опоры минимально, что повышает достоверность получаемых данных. Ширина опор в плане не должна превышать 3 мм. При исследовании образцов бетона первая собственная частота изгибных колебаний находится в диапазоне 900-1400 Гц, поэтому собственные резонансные частоты опор и станины установки в указанном диапазоне должны быть минимизированы или отсутствовать. Образцы испытываются в положении плашмя (на ребре 40 мм). Для придания образцу колебаний используется модальный молоток или стальной шарик на упругом стержне. Удар наносится по верхней грани на расстоянии 5-10 мм от торца образца (схема на рис.1).

Обработка сигнала свободных затухающих колебаний выполнялась в разработанной авторами программе на языке Python. Алгоритм включает:

построение частотного спектра и определение первой собственной частоты f ; поиск локальных амплитудных пиков на временной развёртке; аппроксимацию пиков экспоненциальной функцией $A = A_0 \exp(-\delta t)$ методом наименьших квадратов с вычислением коэффициента детерминации R^2 (результат принимали, если $R \geq 0,98$); расчёт логарифмического декремента по полученной модели. Такой подход эквивалентен осреднению по всему процессу затухания и исключает влияние случайных выбросов амплитуды.



1 – сталь; 2 – алюминиевый сплав; 3 – высокопрочный мелкозернистый бетон.

Рис.2. Сигнал и частотный спектр колебаний образцов конструкционных материалов (a – сигнал; b – частотный спектр сигнала)

В результате оцифровки показаний датчика строится график затухающих колебаний. С помощью дискретного преобразования Фурье формируется частотный спектр сигнала и определяется основная частота для дальнейших

вычислений. Для качественной оцифровки аналогового сигнала датчика рекомендуется применять аналого-цифровой преобразователь с частотой дискретизации, на порядок превышающей максимальную частоту колебаний образца.

На первом этапе выделяются локальные амплитудные пики, по которым осуществляется построение аппроксимирующей функции, (рис.3) вида

$$A = A_0 e^{-\chi t}$$

где A – мгновенная амплитуда в момент времени t , м; A_0 – начальная амплитуда, м; χ – коэффициент; t – время, с (для двух последовательных амплитуд соответствует периоду колебаний).

Полученные таким образом модель затухания и значение собственной частоты колебаний используются при нахождении величин двух последовательных амплитуд для расчёта по формуле (1).

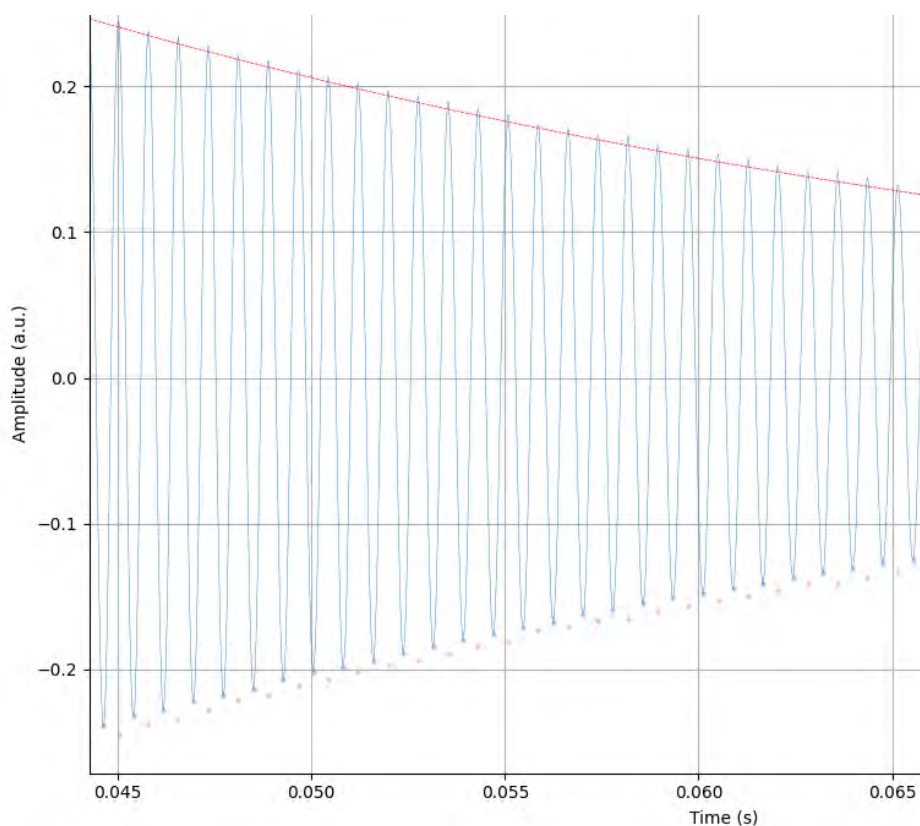


Рис.3. Фрагмент сигнала и построенная модель затухания колебаний

Как было установлено в экспериментах [13], традиционные образцы-балочки квадратного сечения размером 160x40x40 мм не вполне подходят, поскольку первая и вторая собственные частоты такого образца слабо отличаются, из-за чего в выходном сигнале могут присутствовать биения (рис.4). Это снижает точность определения величины демпфирования, а наилучшие результаты достигаются при отношении ширины сечения образца к высоте в диапазоне 1,2 – 1,6.

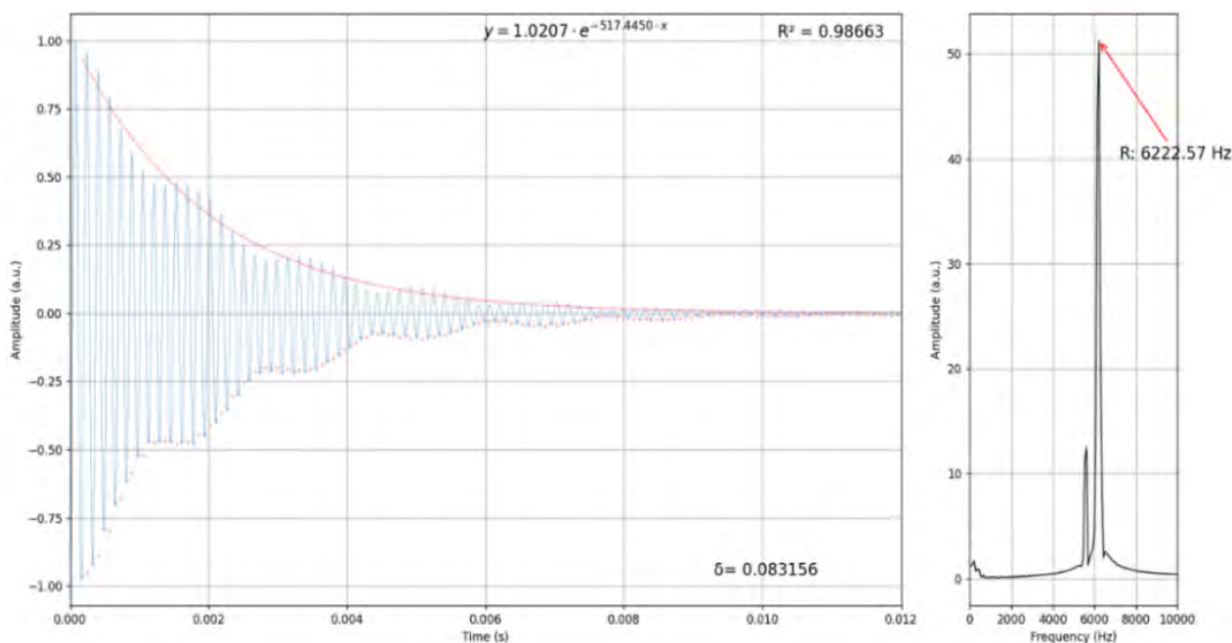


Рис.4. Фиксируемые биения при неблагоприятном соотношении ширины сечения образца к высоте ($a/h \approx 1$)

Заключение

Проведённые исследования подтвердили эффективность предложенной методики неразрушающего контроля динамических характеристик конструкционных материалов. Лабораторный комплекс успешно справляется с определением параметров, при этом точность измерений существенно возросла по сравнению с существующими подходами.

Разработанные рекомендации по подготовке образцов, условиям испытаний и критериям обработки результатов обеспечивают системность и надёжность контроля. Представленные решения вносят вклад в совершенствование методологической и приборной базы неразрушающего контроля вибродинамических параметров бетона и других материалов промышленного назначения.

Список литературы

1. Ashby, M. F. Materials selection in mechanical design / M. F. Ashby. – 3rd ed. – Oxford (Conn.) : Elsevier/Butterworth Heinemann, 2005. – 602 p.
2. Slocum, A. H. Precision Machine Design / A. H. Slocum. – Society of Manufacturing Engineers, 1992. – 776 p.
3. Лавров, И. Ю. Численно-экспериментальная оценка деформативности бетонных элементов машиностроительных конструкций при динамическом нагружении / И. Ю. Лавров, В. А. Береговой // Тезисы докладов IX Международного симпозиума. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2025. – С. 201–203.
4. Chung, I. S. Dynamic characteristics of lathe using concrete bed / I. S. Chung, M. Tsutsumi, Y. Ito // Bulletin of JSME. – 1985. – Т. 28, № 239. – P. 987–993.

5. Development of Machining Center with Concrete Bed (1st Report) / O. Nagayasu, T. Shinnoh, H. Sugishita [et al.] // Journal of the Japan Society for Precision Engineering. – 1986. – Т. 52, № 2. – Р. 313–318.

6. Береговой, В. А. Опыт применения высокофункционального бетона в конструкции современного станка / В. А. Береговой, К. Н. Махамбетова, И. Ю. Лавров // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2023. – № 5 (280). – С. 31–37.

7. Long term vibration monitoring of an RC slab: Temperature and humidity effect / Y. Xia, H. Hao, G. Zanardo, A. Deeks // Engineering Structures. – 2006. – Т. 28, № 3. – Р. 441–452.

8. Лавров, И. Ю. Лабораторный комплекс для исследования вибродинамических показателей конструкционных бетонов / И. Ю. Лавров, В. А. Береговой // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – № 4 (57). – С. 56–65.

9. Лавров, И. Ю. Демпфирующая способность и деформативность высокопрочного мелкозернистого бетона / И. Ю. Лавров // Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе региона. – 2024. – № 1 (16). – С. 41–47.

10. Experimental study on damping properties of rubber powder modified styrene-acrylic emulsion concrete beam / J. Mo, L. Zeng, F. Guo [et al.] // Journal of Building Engineering. – 2020. – Т. 32. – Р. 101728.

11. Бетоны нового поколения на основе сухих тонкозернисто-порошковых смесей / В. И. Калашников, О. В. Тараканов, Ю. С. Кузнецов [и др.] // Magazine of Civil Engineering. – 2012. – № 8 (34). – С. 47–53.

12. Лавров, И. Ю. Высокофункциональные бетоны для промышленного строительства и машиностроения / И. Ю. Лавров, В. А. Береговой // Строительные материалы. – 2024. – № 12. – С. 42–48.

13. Лавров, И. Ю. Технические аспекты определения динамических характеристик бетона при вибрационном воздействии / И. Ю. Лавров, А. С. Присевка, О. В. Суздальцев // Материалы I международной конференции молодых ученых. – Владимир : Press-Book.ru, 2024. – С. 112–118.

Контакты:

techbeton@pguas.ru (Береговой Виталий Александрович);

lavrov0909@gmail.com (Лавров Иван Юрьевич);

techbeton@pguas.ru (Семилетков Александр Викторович).