

Абашин Е.Г., канд. техн. наук  
Орловский государственный аграрный университет

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЕРЕМЫЧЕК ТИПА 2ПБ26-4 ВИБРАЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ

evabashin@yandex.ru

В статье рассматриваются результаты экспериментальных исследований по оценке площади поперечного сечения продольной рабочей арматуры и класса бетона в железобетонных балках с использованием вибрационного метода. По результатам динамических испытаний графически показано, что площадь поперечного сечения продольной рабочей арматуры в железобетонных балках функционально связана с их основной (или первой резонансной) частотой колебаний и построены соответствующие аппроксимирующие функции, позволяющие для балок конкретного типа получать оценку диаметра рабочей арматуры. По результатам теоретических и экспериментальных исследований также установлено, что класс бетона функционально связан с основной (или первой резонансной) частотой колебаний балок.

**Ключевые слова:** железобетонная балка, рабочая продольная арматура, класс бетона, основная частота колебаний, продольные колебания, поперечные колебания.

**Введение.** В настоящее время в нашей стране существует система выборочного контроля железобетонных конструкций балочного типа, регламентируемая ГОСТом 8829-94 [1], когда из конструкций определенной партии выбираются для контроля лишь несколько изделий, которые испытывают методом статического нагружения до разрушения, при этом полученные результаты распространяются на всю партию. Такой метод контроля экономически неэффективен и не обеспечивает достоверности результатов контроля [2, 3].

Более выгодны с экономической точки зрения и более достоверны вибрационные методы контроля, которые получили широкое распространение, например в машиностроении [4, 5]. Однако в нашей стране в строительной индустрии им уделено недостаточное внимание из-за отсутствия серьезного теоретического обоснования и методического обеспечения.

Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования, проводимые научными коллективами под руководством и В.И. Коробко [6, 7], показали, что вибрационные методы позволяют определять интегральные характеристики железобетонных балок (прочность, жесткость и трещиностойкость) по результатам анализа динамических параметров контролируемых конструкций (основная или первая резонансная частота колебаний, логарифмический декремент затуханий колебаний). Это стало возможным благодаря установлению наличия функциональной связи между контролируемыми параметрами конструкций и их динамическими характеристиками. Большое значение в этом плане имеет фундаментальная закономерность, установленная в работах В. И. Коробко [8], согласно которой: «произведение максимального прогиба упругой однопролетной

балки постоянного сечения с произвольными граничными условиями, нагруженной равномерно распределенной нагрузкой  $q$ , на квадрат ее основной (или первой резонансной) частоты колебаний с точностью до размерного коэффициента  $q/m$  ( $q$  – интенсивность нагрузки,  $m$  – погонная масса балки) есть величина постоянная, равная  $\approx 4/\pi$ »:

$$w_0 \omega^2 \approx 4/\pi \cdot q/m. \quad (1)$$

Большинство изобретений разработанных с использованием указанной закономерности В.И. Коробко, относятся к железобетонным предварительно напряженным конструкциям, основной характеристикой, влияющей на прочность, жесткость и трещиностойкость которых является степень предварительного напряжения продольной арматуры. Для протяженных железобетонных конструкций без предварительного напряжения арматуры подобными характеристиками являются диаметр продольной рабочей арматуры  $d_s$  и класс бетона В [9].

**Методология.** Для подтверждения закономерности (1) и исследования зависимостей динамических и прочностных параметров конструкции от диаметра продольной рабочей арматуры  $d_s$  и класса бетона В был проведен эксперимент на базе Архитектурно-строительного института ПГУ научным коллективом под руководством Заслуженного строителя России профессора В.И. Коробко. Для эксперимента были изготовлены 20 железобетонных перемычек со следующими геометрическими характеристиками:  $l = 2590$  мм;  $b = 120$  мм;  $h = 140$  мм. Масса перемычек  $m \approx 109$  кг. Для большей наглядности влияния класса бетона и диаметра рабочей арматуры на динамические характеристики, 10 конструкций произведены с одинаковым арма-

турным каркасом, состоящим из: рабочей арматуры А400  $d_s = 12$  мм, проволочной арматуры В500  $A = 20$  мм<sup>2</sup> и поперечных связей В500  $A = 13$  мм<sup>2</sup>, но с разными классами бетона по прочности (В7,5, В15, В20, В22,5, В30), по 2 каждого

типа, другие 10 с одинаковым классом бетона В15, но с разными диаметрами рабочих арматур  $d_s$  (8, 10, 14, 16 и 18 мм), по 2 каждого типа.

Экспериментальный стенд и приборная база представлены на рисунке 1.

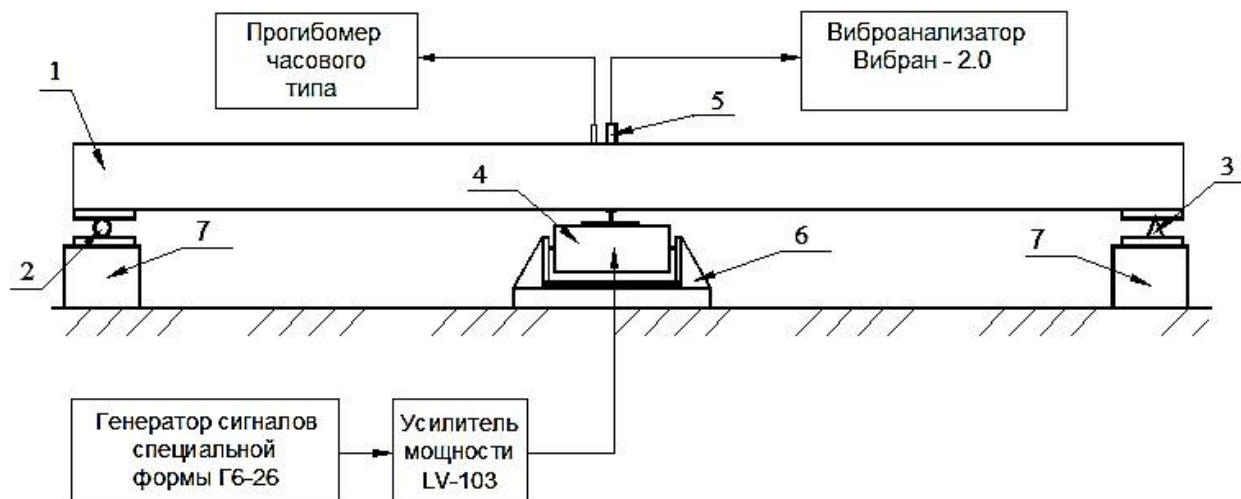


Рис. 1. Схема установки приборов контроля на балке: 1 – объект контроля;

2, 3 – подвижная и неподвижная шарнирные опоры; 4 – электродинамический вибровозбудитель 11076; 5 – измерительные вибрационные датчики; 6 – силовая установка вибровозбудителя; 7 – силовые опоры.

Для определения достоверности результатов экспериментов, применялись методы математической статистики по обработке результатов испытаний. Из общего объема строительных конструкций были выбраны некоторые, которые подверглись детальному статистическому исследованию, по результатам которого был описан весь объем результатов экспериментов.

Для испытаний была выбрана балка Б-1-1 серии 2ПБ26-4 с целью определения ее собственной частоты колебаний. Испытания проводились многократно при разных величинах интенсивности внешней нагрузки. Обработке были подвергнуты по 25 измерений при каждой ступени загрузки. Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Результаты обработки данных испытаний**

Величины нагружения, P, кН	$\bar{x}$ , Гц	D	$\sigma$	$\sigma_0$	$\mu$	$x_0$ , Гц	%
0	20,508	0,0058	0,076	0,0152	0,0314	20,508 ±	0,15
0,3823	17,784	0,0039	0,062	0,0127	0,0263	17,784 ± 0,0263	0,15
0,7646	15,824	0,0061	0,078	0,0156	0,0322	15,824 ± 0,0322	0,2
1,9265	12,88	0,0408	0,202	0,0404	0,0835	12,88 ± 0,0835	0,65

Значение доверительной вероятности при нагрузке P = 1,9265 кН относительно велико из-за появления упруго-пластических деформаций в испытываемой конструкции. По результатам статистической обработки было принято решение о дальнейшем однократном измерении величин в течение всего эксперимента.

Экспериментальные балки нагружались по следующей схеме: 0 %, 20 %, 40 %, 60 %, 80 %, 90 %, 100 % и далее через 10 % от расчетной

нагрузки трещинообразования до появления трещин. Затем 20 %, 40 %, 60 %, 80 %, 90 %, 100 % и далее через 10 % от расчетной разрушающей нагрузки до появления признаков разрушения. На каждой ступени загрузки и после снятия разрушающей нагрузки определялись следующие параметры: основная частота свободных поперечных колебаний  $f_{поп}$ ; резонансная частота продольных колебаний  $f_{пр}$ ; логарифмический декремент  $\delta$ ; коэффициент демпфирования  $\mu$ ; коэффициент  $\sigma$ ; коэффициент  $\sigma_0$ ; коэффициент  $D$ ; коэффициент  $x_0$ ; коэффициент  $\bar{x}$ .

рифмический декремент затухания поперечных колебаний  $\delta_{\text{поп}}$ ; прогиб  $w$  от равномерно распределенной нагрузки  $q$ ; также фиксировались нагрузки трещинообразования  $P_{\text{сг}}$  и разрушения  $P_{\text{пр}}$ .

**Результаты исследования.** Одним из основных результатов экспериментальных исследований перемычек явилось получение опытных зависимостей динамических и прочностных характеристик от диаметра рабочей арматуры и модуля упругости бетона (рис. 3). Также были получены другие зависимости для каждой исследуемой балки (рис. 2).

Аналогичные экспериментальные графические зависимости были получены для всех ис-

следуемых балок, они подтверждают закономерность (1) и приведенные теоретические рассуждения [9, 10] с некоторыми поправками:

1 Очевидно, что частота продольных колебаний увеличивается с нарастанием нагрузки вплоть до момента трещинообразования (рис. 2б.). Это связано с увеличением продольных напряжений в конструкции, после появления первых трещин величина продольного напряжения резко падает и происходит интенсивное снижение частоты продольных колебаний. Этот результат позволяет контролировать стадию напряженно-деформированного состояния по частоте продольных колебаний конструкции.

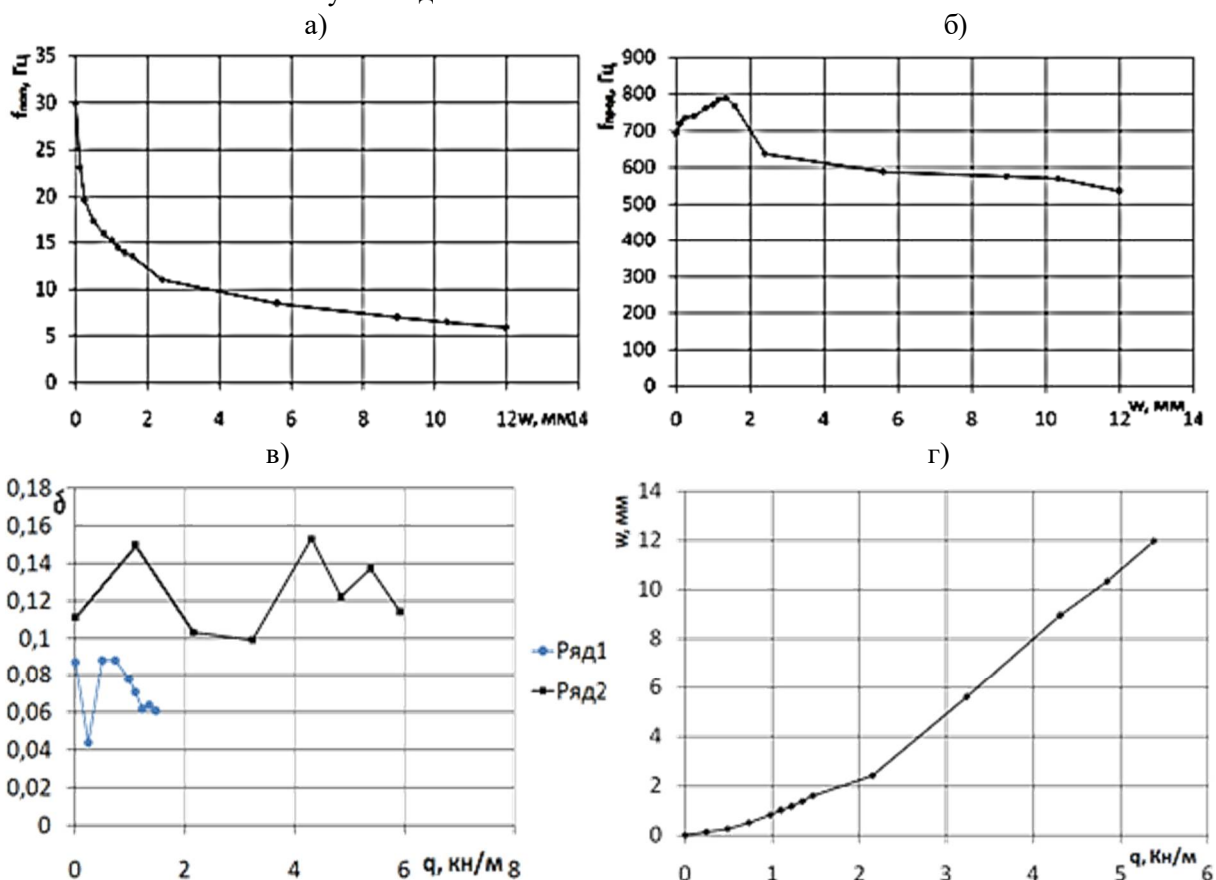


Рис. 2. Экспериментальные графические зависимости для железобетонной балки Б-8-1:

- а) частоты поперечных колебаний от прогиба; б) частоты продольных колебаний от прогиба; в) логарифмического декремента затухания колебаний от нагрузки (Ряд1 для упругой стадии, Ряд2 для упруго-пластической стадии); г) прогиба от нагрузки.

2 Четкой зависимости между логарифмическим декрементом колебаний и величиной нагрузки не выявлено, но определены и графически показаны интервалы данной величины для разных стадий напряженно-деформированного состояния данного типа конструкций, что имеет большое практическое значение при контроле качества строительной конструкции по логарифмическому декременту затухания колебаний (рис. 2в.).

3 Величина  $1/w$  – пропорциональна частоте колебаний, что убедительно подтверждают теоретические выводы, полученные в работе [2] при установлении функциональной зависимости  $f - w$  (рис 2а.).

4 Появление трещин в растянутой зоне бетона существенно не сказывается на изменении основной частоты поперечных колебаний, так же как и появление пластических деформаций в бетоне и арматуре. Закономерности  $f - q$  и  $f - w$

являются монотонно убывающими вплоть до разрушения конструкции (рис. 2а).

Анализ результатов экспериментального исследования железобетонных балок позволяет сделать следующие выводы (рис. 3):

1. Увеличение диаметра арматуры и класса бетона на сжатие ведет к росту частоты свобод-

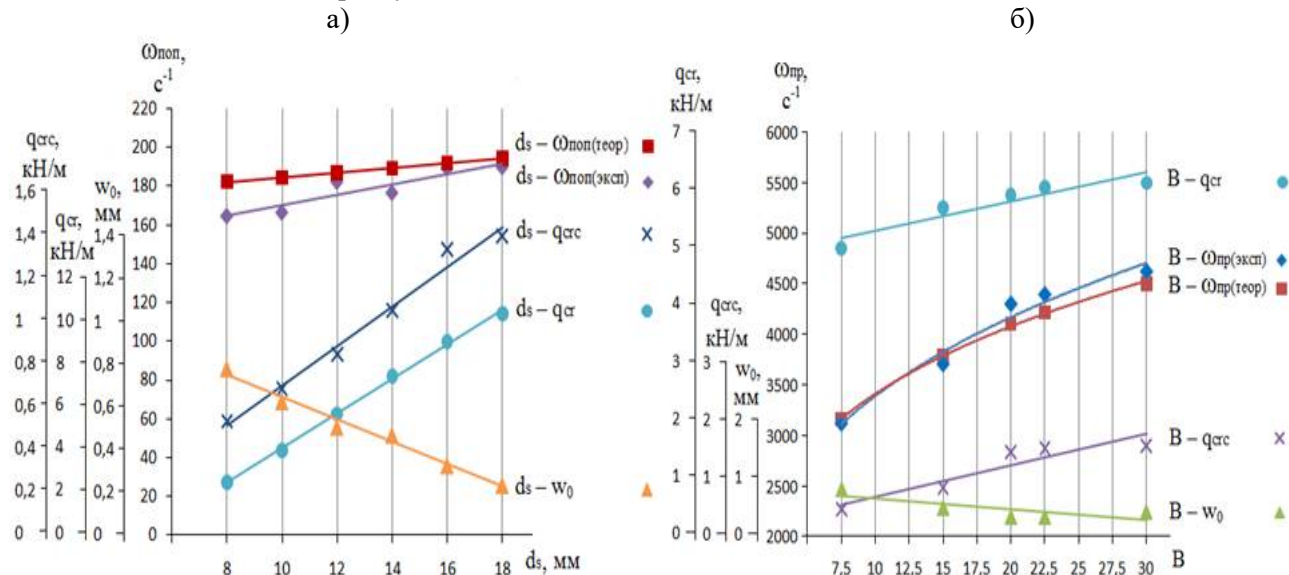


Рис. 3. Экспериментальные графические зависимости для перемычек типа 2PB26-4: а) зависимости динамических характеристик от диаметра рабочей продольной арматуры; б) зависимости динамических и прочностных характеристик от класса бетона по прочности.

3 Динамические испытания балок после снятия разрушающей нагрузки показали снижение частоты колебаний и увеличение логарифмического декремента затухания, что объясняется появлением остаточных деформаций.

4 Экспериментальные кривые  $\omega - B$  и  $\omega - d_s$  соответствуют теоретическим [3], что дает возможность разработать способ определения диаметра арматуры и класса бетона железобетонных балок без предварительного напряжения арматуры по результатам динамических испытаний.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 8829-94. Конструкции и изделия железобетонные сборные. Методы испытания нагружением и оценка прочности, жесткости и трещиностойкости. М.: Изд-во стандартов, 1994. 24 с.
2. Гунгер Ю.Р. Тарасов А.Г., Чернев В.Т. Ультразвуковой и вибрационный контроль состояния железобетонных стоек опор и фундаментов воздушных линий электропередачи // Электроинфо. 2005. № 11. С. 40–43.
3. Байков В.Н., Сигалов Э. Е. Железобетонные конструкции : общий курс // Изд. 5-е доп. М. : Стройиздат, 2013. 767 с.
4. ГОСТ Р 13373-2 – 2009. Вибрационный

ных колебаний.

2. Основная частота является более стабильной, чем логарифмический декремент затухания колебаний характеристикой, которая меняется практически монотонно с ростом нагрузки.

контроль состояния машин. Обработка, анализ и представление результатов измерения вибрации – Введен впервые ; введ. 2009.12.15. М. : Изд-во Стандартиформ, 2009. 32 с.

5. Zhang W. Application of wide band AE sensor in model test of reinforced concrete structures // 17th World conference on nondestructive testing (25–28 oct. 2008 у., Shanghai, China). Shanghai, 2008. P. 362–369.

6. Пат. 75035 Российская Федерация, МПК51 G 01 H 9/00. Устройство для измерения параметров вибрационных колебаний/ Плотников С. Н., Богданов Н. Г., Щекотихин С. Н. ; заявитель и патентообладатель Академия ФСО России. – № 2008108442/22 ; заявл. 04.03.08 ; опубл. 20.07.08, Бюл. № 20. 5 с.

7. Слюсарев Г.В. Развитие и применение неразрушающих методов и средств вибрационного контроля качества железобетонных конструкций : дис. на соиск. учен. степ. д-ра. техн. наук. Ставрополь; Орел, 2003 г. 370 с.

8. Коробко В.И., Коробко А.В. Контроль качества строительных конструкций: Виброакустические технологии. М.: Издательство АСВ, 2003. 288с.

9. Коробко В.И., Абашин Е.Г. Способы определения площади поперечного сечения продольной арматуры и модуля упругости бетона в железобетонных балках по результатам ста-

тических и динамических испытаний // Известия ОрелГТУ. Серия «Строительство и реконструкция». Орел ГТУ, 2010. №2/28. С. 23–25.

10. Абашин Е. Г. Определение площади по-

перечного сечения рабочей арматуры в железобетонных балках вибрационным методом // «Строительство и реконструкция». Орел: Государственный университет – УНПК, 2011. № 5. С. 3–7.

---

**Abashin E.G.**

**EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS REINFORCED CONCRETE BEAMS 2PB26-4 BY THE VIBRATION METHOD**

*The article examines the results of experimental investigations for evaluation of cross-section area of longitudinal reinforcement bar and concrete class in reinforced concrete beams at the application of vibration method. By the dynamic testing results is graphically proved that cross-section area of longitudinal reinforcement bar in reinforced concrete beam is functionally connected with the main frequency lateral and longitudinal oscillations of the beam and construct the corresponding approximating functions, allow to receive the cross-section area of longitudinal reinforcement bar for a particular type of beams. By the theoretical and experimental investigations results is proved that concrete class is connected with the main (or the first resonance) frequency of beam vibrations.*

**Key words:** reinforced concrete beams, longitudinal reinforcement bar, concrete class, the main frequency of vibrations, longitudinal oscillation, lateral oscillation.

---

**Абашин Евгений Геннадьевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры агропромышленное и гражданское строительство.

Орловский государственный аграрный университет.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: evabashin@yandex.ru