

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КЛАССА БЕТОНА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК ПО КОЭФФИЦИЕНТУ ЗАТУХАНИЯ КОЛЕБАНИЙ

АБАШИН Е.Г.

ФГБОУ ВО «Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина», г. Орел, Россия

***Аннотация.** В статье рассматривается возможность применения коэффициента затухания колебаний для определения класса бетона железобетонных балок без предварительного напряжения арматуры в упругой стадии работы. Предложено использовать данный параметр в качестве характеристики, учитывающей потери энергии в колебательной системе. Вероятно, что изменение класса бетона окажет прямое влияние на интенсивность затухания колебаний, поскольку с увеличением класса бетона упругие свойства конструкции начинают преобладать над пластическими. При обеспечении одинаковых условий опирания и контроля экспериментальных конструкций потери энергии за счет различных физических и деформативных свойств изделий проявятся в полной мере, а коэффициент затухания колебаний позволит определить эти свойства с меньшими погрешностями и большей стабильностью по сравнению с ультразвуковым или механическим методами. Разработан способ определения класса бетона, основанный на использовании эталонных конструкций и построении аналитической зависимости коэффициента затухания колебаний от класса бетона. Для исследуемого типа и размера железобетонных конструкций получена меньшая погрешность определения класса бетона по сравнению с известными методами.*

***Ключевые слова:** железобетонные балки, класс бетона, неразрушающие методы контроля, вибрационный метод, коэффициент затухания колебаний.*

## DETERMINATION OF CONCRETE CLASS OF RC BEAMS BY VIBRATION-DAMPING COEFFICIENT

ABASHIN E.G.

Orel state agrarian university named after N.V. Parakhin, Orel, Russia

***Abstract.** The article considers the possibility of using the vibration-damping coefficient to determine the concrete class of reinforced concrete beams without prestressing reinforcement in the elastic stage of work. It is proposed to use this parameter as a characteristic that takes into account energy losses in an oscillatory system. It is likely that a change in the class of concrete will have a direct effect on the intensity of the damping of vibrations, since with an increase in the class of concrete the elastic properties of the structure begin to prevail over the plastic ones. Providing the same conditions of support and control of experimental designs, energy losses due to various physical and deforming properties of the products will be fully manifested, and the damping coefficient of vibrations will allow determining these properties with less errors and greater stability compared to ultrasonic or mechanical methods. A method has been developed for determining the class of concrete, based on the use of reference structures and constructing an analytical dependence of the damping coefficient of vibrations on the class of concrete. For the studied type and size of reinforced concrete structures, a smaller error in determining the class of concrete is obtained in comparison with known methods.*

***Keywords:** reinforced concrete beams, concrete class, non-destructive testing methods, vibration method, vibration-damping coefficient.*

## Введение

Известен способ определения класса бетона в железобетонной конструкции путем испытания образцов (кубиков), специально изготавливаемых одновременно с бетонированием конструкции либо в заводских условиях, либо на стройплощадке [1]. Этот способ имеет недостаток, который заключается в том, что со временем физико-механические свойства бетона изменяются в зависимости от условий эксплуатации, и в случае необходимости для определения класса бетона следует прибегать к другим методам. Кроме того данный способ имеет высокую погрешность порядка – 10...15%. В процессе эксплуатации физико-механические свойства бетона в железобетонной конструкции могут меняться под воздействием как внешних факторов, таких как температура, влажность, агрессивные среды [2], так и внутренних [3].

В связи с этим возникает необходимость оценки класса бетона конструкций, находящихся в стадии эксплуатации [4]. Для этой цели разработаны и внедрены механический и ультразвуковой методы [5]. У этих методов существует целый ряд недостатков [6].

Механические методы основаны на предварительно установленной градуировочной (корреляционной) зависимости между классом бетона и косвенными характеристиками: значением отскока, размером отпечатка, усилием скалывания ребра конструкции, условным напряжением при отрыве, установленными испытанием приборами механического действия [7]. Данные методы имеют высокую погрешность, так как на их точность может оказать влияние физическое состояние поверхностного слоя, его карбонизация, зерновой состав бетонной смеси, влажность поверхности, крупность заполнителя и его глубина залегания, разница прочностей на поверхности и в теле конструкции, а также и субъективные факторы, такие как навыки оператора [8]. Неудивительно, что даже при соблюдении всех технологических и статистических требований ГОСТов регламентированная погрешность механических методов весьма высока и составляет от 12 до 15% в зависимости от конкретного метода [9].

Ультразвуковые методы основаны на экспериментально установленной корреляционной зависимости скорости прохождения ультразвуковых волн от класса бетона [10]. Регламентированная погрешность данного метода составляет 10...12% [11]. Основным недостатком является то, что модуль упругости и скорость ультразвука по-разному зависят от количества и качества цемента, соотношения долей мелкого и крупного заполнителей и их прочности, степени армирования и т.д. Также несколько процентов в общую погрешность метода добавляют ошибки при отсчете времени распространения ультразвукового импульса, ошибки за счет контакта датчиков с образцом, влажность, шероховатость поверхности конструкции. Кроме того, ультразвуковые методы позволяют определить класс бетона только на отдельном участке, а не интегрально у всей конструкции в целом [12].

Также известен способ определения класса бетона по основной или первой резонансной частоте продольных или поперечных колебаний балки [13]. У конструкции, находящейся в стадии эксплуатации, затруднен доступ к обоим торцам одновременно, поэтому применение способа с продольными колебаниями возможно только при производстве ЖБИ на заводах-изготовителях. При использовании варианта данного способа с поперечными колебаниями погрешность составляет порядка 10% [14].

Исходя из вышеизложенного, сформулируем задачу исследования: разработать и экспериментально подтвердить способ определения класса бетона в железобетонных балках без предварительного напряжения арматуры по результатам их динамических испытаний с погрешностью ниже, чем у существующих методов.

## Методы исследования

Коэффициент затухания колебаний  $\alpha$  известен из курса физики [15] как один из параметров, учитывающий потери энергии в колебательной системе. Коэффициент затухания определяется по формуле:

$$\alpha = \frac{1}{\tau}, \quad (1)$$

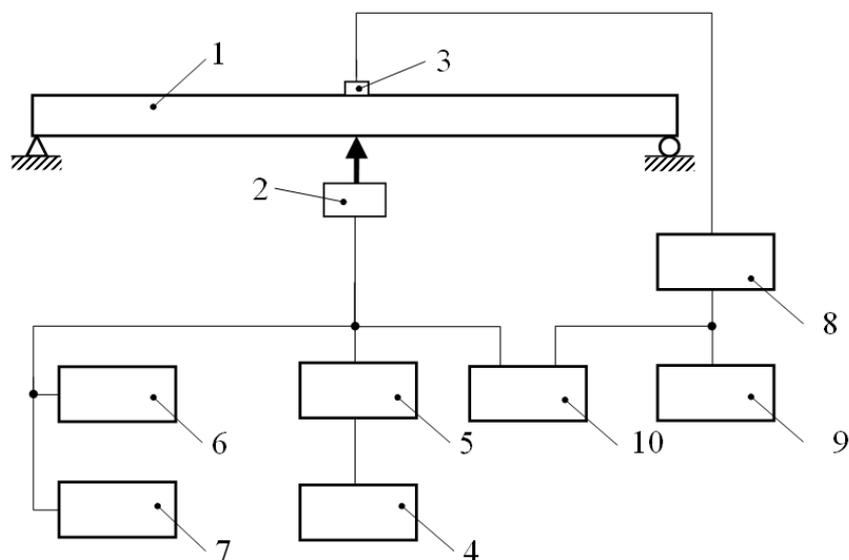
где  $\tau$  – время релаксации (время, за которое амплитуда колебаний уменьшается в  $e$  раз,  $e \approx 2,72$  – основание натурального логарифма).

В отличие от логарифмического декремента затухания колебаний коэффициент затухания ранее не рассматривался для диагностики железобетонных конструкций вибрационным методом. Касательно строительных конструкций и материалов известна и регламентирована лишь методика определения звукоизолирующей способности оконного остекления по величине коэффициента затухания колебаний звукового диапазона [16].

Поскольку коэффициент затухания колебаний определяется по большему участку виброграммы, чем логарифмический декремент затухания колебаний, который рекомендуется рассчитывать по двум соседним амплитудам, на его значение окажет меньшее влияние наложение амплитуд колебаний более высокого (низкого) порядка, а значит, коэффициент затухания колебаний можно определить с большей точностью, что приведет и к повышению точности определения физических и деформативных свойств контролируемых конструкций. Также нестабильно поведение логарифмического декремента затухания колебаний с ростом нагрузки, что ранее было исследовано в работе [17].

По аналогии с логарифмическим декрементом затухания колебаний коэффициент затухания характеризует величину потери колебательной энергии в конструкции. Вероятно, что изменение класса бетона окажет прямое влияние на интенсивность затухания свободных колебаний, поскольку с увеличением класса бетона упругие свойства конструкции начинают преобладать над пластическими. Если обеспечить одинаковые условия опирания и контроля экспериментальных конструкций, то потери энергии за счет различных физических и деформативных свойств изделий проявятся в полной мере, а коэффициент затухания колебаний позволит определить эти свойства с меньшими погрешностями и большей стабильностью по сравнению с логарифмическим декрементом затухания колебаний.

Данную гипотезу необходимо проверить на экспериментальных железобетонных конструкциях. Для этого были испытаны 5 типов железобетонных балок (рисунок 1), по 2 каждого типа всего 10 штук, со следующими геометрическими характеристиками:  $l = 2590$  мм,  $b = 120$  мм,  $h = 140$  мм; масса балок  $m = 109$  кг. Армирование данных балок одинаковое, а класс бетона различен в диапазоне от В7,5 до В30 (В7,5; В15; В20; В25; В30).



1 – контролируемое изделие, 2 – излучатель механических колебаний,  
3 – приемник механических колебаний, 4 – генератор синусоидальных колебаний,  
5 – усилитель мощности, 6 – частотомер, 7 – цифровой вольтамперметр,  
8 – предварительный усилитель, 9 – анализатор спектра, 10 – электронный осциллограф

**Рисунок 1 – Функциональная схема экспериментальной установки для определения коэффициента затухания поперечных колебаний в режиме вынужденных колебаний**

Испытания проводились следующим образом. Каждую из изготовленных конструкций устанавливают на испытательном стенде, закрепляют её концы по схеме шарнирного опирания и возбуждают в ней свободные поперечные колебания с помощью механического удара или внезапного снятия некоторой статической нагрузки. Используя какой-либо частотомер, например, виброанализатор «Вибран-3», измеряют коэффициент затухания колебаний.

Если используется режим воздействия вынужденными колебаниями (см. рисунок 1), то на контролируемую балку 1 в средней части пролета закрепляют с одной стороны излучатель колебаний 2, например электродинамический вибровозбудитель поперечных колебаний, а с другой стороны – приемник механических колебаний 3 (первичный преобразователь виброперемещений). С помощью генератора синусоидальных колебаний 4 и усилителя мощности 5 возбуждают в конструкции колебания в требуемом диапазоне частот, поддерживая энергию этих колебаний строго на одном уровне. При этом частоту и амплитуду электрического сигнала, подаваемого на вход вибровозбудителя поперечных колебаний 2, контролируют частотомером 6 и цифровым вольтамперметром 7. Сигнал с приемника механических колебаний усиливается с помощью предварительного усилителя 8, а с помощью анализатора спектра 9 снимают амплитудно-частотную характеристику контролируемой конструкции, по которой определяют коэффициент затухания колебаний в режиме прекращения возбуждения колебаний. Кроме того, в схему включен электронный осциллограф 10 для визуализации колебательного процесса.

#### **Результаты исследования и их анализ**

По полученным результатам (см. таблица 1) построена аппроксимирующая функция (2) «класс бетона – коэффициент затухания колебаний» (см. рисунок 2).

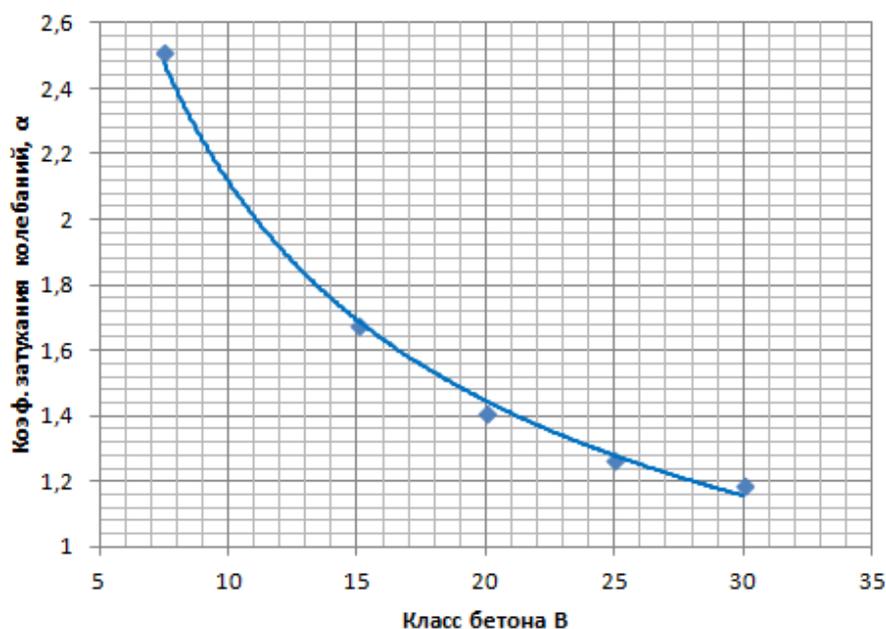
$$B = 38,972 \cdot \alpha^{-1,811} \tag{2}$$

Таблица 1 – Значения коэффициентов затухания свободных поперечных колебаний железобетонных балок с разными классами бетона и погрешность определения класса бетона по предложенному способу

|   |      |       |       |       |       |
|---|------|-------|-------|-------|-------|
| Класс бетона В  | 7,5  | 15    | 20    | 25    | 30    |
| Коэффициент затухания колебаний, $\alpha$                         | 2,51 | 1,68  | 1,41  | 1,27  | 1,19  |
| Класс бетона В, определенный по выражению 2                       | 7,36 | 15,23 | 20,92 | 25,28 | 28,44 |
| Погрешность определения класса бетона по предложенному способу, % | 1,87 | 1,53  | 4,6   | 1,12  | 5,2   |

При диагностике изделия серийного изготовления определяют коэффициент затухания колебаний и с помощью построенной аппроксимирующей функции находят действительный класс бетона.

Как видно из рисунка 2, существует функциональная зависимость между классом бетона и коэффициентом затухания колебаний, позволяющая с высокой степенью вероятности определить класс бетона по результатам динамических испытаний. Погрешность предлагаемого способа составляет около 5%, что значительно меньше существующих ультразвуковых и механических методов определения класса бетона.



*Рисунок 2 – Графическое представление экспериментальных данных и аппроксимирующей функции (класс бетона – коэффициент затухания колебаний)*

На основании проведенных исследований предложен способ определения класса бетона в железобетонных балках без предварительного напряжения в упругой стадии работы, заключающийся в изготовлении 5...7 эталонных изделий для конструкций определенного типа и размера, класс бетона которых изменяется в определенном диапазоне значений, установке на стенд, закреплении концов изделия по схеме шарнирного опирания, возбуждении в каждом из эталонных изделий свободных поперечных колебаний на основной частоте (или вынужденных колебаний на первой резонансной частоте), измерении коэффициента затухания колебаний, и построении по полученным значениям аналитической зависимости «класс бетона – коэффициент затухания колебаний»; при диагностике изделия серийного изготовления определяют коэффициент затухания колебаний и по полученной аналитической зависимости подсчитывают класс бетона. Преимуществом данного способа является также отсутствие необходимости загружать конструкцию нагрузкой на время испытания.

### **Выводы**

1. Экспериментально подтверждена функциональная зависимость коэффициента затухания колебаний от класса бетона в железобетонных балках без предварительного напряжения арматуры в упругой стадии работы.
2. Разработан способ определения класса бетона по измеренному коэффициенту затухания колебаний железобетонных балок, основанный на использовании эталонных конструкций.
3. Погрешность предлагаемого способа составляет около 5%, что значительно меньше существующих методов определения класса бетона.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. ГОСТ Р 53231-2008 Бетоны. Правила контроля и оценки прочности. – Взамен ГОСТ 18105.0-86 ; введ. 2009.02.21. М. : Стандартинформ, 2010. 31 с.
2. Abeele K. Damage assessment in reinforced concrete using spectral and temporal nonlinear vibration techniques // Cement and concrete research. № 30. 2002. P. 1453—1464.

3. 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 y., Shanghai, China). Shanghai, 2008. P. 362–369.
4. Калашников М. О. Диагностика и контроль качества строительных конструкций вибрационными методами: 05.23.01 «Строит. конструкции, здания и сооружения»: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук / Калашников Михаил Олегович; [Орловский гос. техн. ун-т]. Орел. 2011. 23 с.
5. Коробко В. И., Коробко А. В. Контроль качества строительных конструкций : Виброакустические технологии. М. : Изд-во АСВ, 2003. 288 с.
6. Юров А. П. Нетрадиционные вибрационные методы диагностики и контроля качества протяженных железобетонных конструкций : дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук : 05.23.01, 05.23.17. : защищена 25.02.05 : утв. 15.06.05 Орел, 2005 г. 135 с.
7. Kim U. A. nondestructive testing method for crack in carbon fiber reinforced concrete with infrared thermography // Journal key engineering materials. 2005. № 32. P. 2128–2133
8. Limaye B. Need for non-destructive testing (NDT) of reinforced concrete & various ND tests // National seminar of ISNT Chennai : 2002. P. 472–483.
9. Коробко В. И., Калашникова Н. Г., Калашникова О. В. Контроль жесткости упругих пластинок с помощью вибрационного метода // Строительство и реконструкция. 2017. № 6 (74). С. 26-31.
10. Коробко В. И., Калашникова Н. Г. Экспериментальное определение основной частоты колебаний пластинок в виде ромба и равнобедренного треугольника // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2018. № 3 (329). С. 57-63.
11. Гунгер Ю. Р. Ультразвуковой и вибрационный контроль состояния железобетонных стоек опор и фундаментов воздушных линий электропередачи // Электро-инфо. 2005. № 11. С. 40–43.
12. Абашин Е. Г. Оценка площади поперечного сечения рабочей арматуры в железобетонных балках по результатам вибрационных испытаний. // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2018. № 4. С. 26-32.
13. Патент 2473880 Российская Федерация, С2 МПК G01N 3/30, Способ определения модуля упругости бетона в упругих железобетонных конструкциях балочного типа / Коробко В. И., Коробко, А. В., Абашин, Е. Г.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Госуниверситет - УНПК». - №2011116856; заявл. 27.04.2011; опубл. 27.01.2013, Бюл. №3.
14. Абашин Е. Г. Определение начального модуля упругости бетона по основной частоте колебаний железобетонных балок // Научный журнал строительства и архитектуры. 2017. № 4 (48). С. 21-28.
15. Ядгаров У. Т. О затухании волн в структурно неоднородных упругих средах // Молодой ученый. 2016. №2. С. 280-282.
16. Жоголева О. А., Гиясов Б. И., Федорова О. О. Методика определения звукоизоляции ограждений квартир по условиям защиты от шума // Вестник МГСУ. 2017. №10 (109). С. 1153-1162.
17. Слюсарев Г. В. Развитие и применение неразрушающих методов и средств вибрационного контроля качества железобетонных конструкций : дис. на соиск. учен. степ. д-ра. техн. наук : 05.23.01. : защищена 4.11.03. Ставрополь; Орел, 2003 г. 370 с.

## REFERENCES

1. Russian Standard GOST R 53231-2008 Betony. Pravila kontrolya i otsenki prochnosti. [Concrete. Rules of control and strength assessment.]. Moscow : Standartinform, 2010. 31 p.
2. Abeele K. Damage assessment in reinforced concrete using spectral and temporal nonlinear vibration techniques. *Cement and concrete research*. No 30. 2002. Pp. 1453—1464.
3. 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 y., Shanghai, China). Shanghai, 2008. Pp. 362–369.
4. Kalashnikov M. O. Diagnostika i kontrol' kachestva stroitel'nykh konstruksiy vibratsionnymi metodami [Diagnostics and quality control of building structures by vibration methods]: 05.23.01 “Stroit. konstruksii, zdaniya i sooruzheniya” : avtoref. dis. na soisk. uchen. step. kand. tekhn. nauk / Kalashnikov Mikhail Olegovich; [Orlovskiy gos. tekhn. un-t]. Orel. 2011. 23 p.
5. Korobko V. I., Korobko A. V. Kontrol' kachestva stroitel'nykh konstruksiy : Vibroakusticheskiye tekhnologii [Quality control of building structures: Vibroacoustic technologies]. Moscow : Izd-vo ASV, 2003. 288 p.
6. Yurov A. P. Netraditsionnyye vibratsionnyye metody diagnostiki i kontrolya kachestva protyazhennykh zhelezobetonnnykh konstruksiy [Non-traditional vibrational methods of diagnostics and quality control of extended reinforced concrete structures]: dis. na soisk. uchen. step. kand. tekhn. nauk : 05.23.01, 05.23.17. : zashchishchena 25.02.05 : utv. 15.06.05. Orel, 2005 g. 135 p.
7. Kim U. A. nondestructive testing method for crack in carbon fiber reinforced concrete with infrared thermography. *Journal key engineering materials*. 2005. No 32. Pp. 2128–2133
8. Limaye B. Need for non-destructive testing (NDT) of reinforced concrete & various ND tests. *National seminar of ISNT Chennai*. 2002. Pp. 472–483.

9. Korobko V. I., Kalashnikova N. G., Kalashnikova O. V. Kontrol' zhestkosti uprugikh plastinok s pomoshch'yu vibratsionnogo metoda [Stiffness control of elastic plates using the vibration method]. *Building and Reconstruction*. 2017. No 6 (74). Pp. 26-31.
10. Korobko V. I., Kalashnikova N. G. Eksperimental'noye opredeleniye osnovnoy chastoty kolebaniy plastinok v vide romba i ravnobedrennogo treugol'nika [Experimental determination of the fundamental oscillation frequency of plates in the form of a rhombus and an isosceles triangle]. *Fundamental'nyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii*. 2018. No 3 (329). Pp. 57-63.
11. Gunger YU. R. Ul'trazvukovoy i vibratsionnyy kontrol' sostoyaniya zhelezobetonnykh stoyek opor i fundamentov vozdukhnykh liniy elektroperedachi [Ultrasonic and vibration monitoring of the state of reinforced concrete struts of supports and foundations of overhead power lines]. *Elektro-info*. 2005. No 11. Pp. 40–43.
12. Abashin Ye. G. Otsenka ploshchadi poperechnogo secheniya rabochey armatury v zhelezobetonnykh balkakh po rezul'tatam vibratsionnykh ispytaniy. [Estimation of the cross-sectional area of the working reinforcement in reinforced concrete beams according to the results of vibration tests]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova*. 2018. No 4. Pp. 26-32.
13. Korobko V. I., Korobko, A. V., Abashin, Ye. G. Sposob opredeleniya modulya uprugosti betona v uprugikh zhelezobetonnykh konstruktsiyakh balochnogo tipa. [A method for determining the modulus of elasticity of concrete in elastic reinforced concrete structures of the beam type]. Patent Russia 2473880, 2013.
14. Abashin Ye. G. Opredeleniye nachal'nogo modulya uprugosti betona po osnovnoy chastote kolebaniy zhelezobetonnykh balok [Determination of the initial modulus of elasticity of concrete by the fundamental frequency of vibrations of reinforced concrete beams]. *Nauchnyy zhurnal stroitel'stva i arkhitektury*. 2017. No 4 (48). Pp. 21-28.
15. Yadgarov U. T. O zatukhanii voln v strukturno neodnorodnykh uprugikh sredakh [Attenuation of waves in structurally inhomogeneous elastic]. *Molodoy uchenyy*. 2016. No 2. Pp. 280-282.
16. Zhogoleva O. A., Giyasov B. I., Fedorova O. O. Metodika opredeleniya zvukoizolyatsii ograzhdeniy kvar-tir po usloviyam zashchity ot shuma [Methodology for determining the sound insulation of apartment fencing according to noise protection]. *Vestnik MGSU*. 2017. No 10 (109). Pp. 1153-1162.
17. Slyusarev G. V. Razvitiye i primeneniye nerazrushayushchikh metodov i sredstv vibratsionnogo kontrolya kachestva zhelezobetonnykh konstruktsiy [Development and application of non-destructive methods and means of vibrational quality control of reinforced concrete structures] : dis. na soisk. uchen. step. d-ra. tekhn. nauk : 05.23.01. : zashchishchena 4.11.03. Stavropol'; Orel, 2003. 370 p.

**Информация об авторах:**

**Абашин Евгений Геннадьевич**

ФГБОУ ВО «Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина», г. Орел, Россия,  
канд. техн. наук, доц., доцент кафедры агропромышленного и гражданского строительства,  
E-mail: evabashin@yandex.ru

**Information about authors:**

**Abashin Evgeniy G.**

Orel state agrarian university named after N.V. Parakhin, Orel, Russia,  
cand. tech. sc., docent, associate professor of the dep. of agricultural and civil engineering,  
E-mail: evabashin@yandex.ru