

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-9-23-30

Абашин Е.Г.

Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина

E-mail: evabashin@yandex.ru

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ БЕТОНА В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛКАХ ПО СКОРОСТИ ЗАТУХАНИЯ КОЛЕБАНИЙ

**Аннотация.** В статье показан один из способов определения модуля упругости бетона по измеренным динамическим характеристикам испытываемой конструкции – коэффициенту затухания колебаний железобетонных ненапряженных балок, работающих в первой стадии напряженно-деформированного состояния.

Нами предложено использовать данную характеристику снижения амплитуды колебаний, которая учитывает потери кинетической энергии в железобетонной балке. Предполагается, что изменение модуля упругости бетона в рассматриваемом диапазоне существенно скажется на скорости затухания колебаний, поскольку при повышении модуля упругости бетона упругие свойства железобетонного элемента преобладают над пластическими свойствами. При проведении опытов следует стремиться к одинаковым условиям опирания и вводить равный уровень энергии в колебательную систему. В этом случае потери энергии в железобетонной балке, выраженные значением коэффициента затухания колебаний, позволят с более высокой степенью вероятности определить модуль упругости бетона в сравнении с практикуемыми механическими или ультразвуковыми методами.

Нами разработан новый способ определения начального модуля упругости бетона, построенный на эмпирическом определении коэффициента затухания колебаний эталонных конструкций заданного типа и размера и построении графической зависимости коэффициента затухания колебаний от начального модуля упругости бетона. Нами получена большая точность определения модуля упругости бетона в сравнении с практикуемыми механическими или ультразвуковыми методами.

**Ключевые слова:** коэффициент затухания колебаний, ненапряженные железобетонные балки, модуль упругости бетона, неразрушающие методы контроля.

**Введение.** В настоящее время в РФ самым распространенным строительным материалом является железобетон [1]. Большая часть производственных зданий, доставшихся в наследство после распада СССР, выполнено в железобетоне. Кроме того, при строительстве современных жилых и административных зданий это так же доминирующий строительный материал.

Определение пригодности к эксплуатации подобных конструкций происходит с применением разрушающего метода, когда из партии однотипных изделий берут 2 %, но не менее двух, и производят ступенчатое нагружение конструкции вплоть до самого разрушения, определяя разрушающую нагрузку, а при необходимости, нагрузку трещинообразования и прогибы конструкции. После проведения экспериментальной диагностики конструкции не годны к дальнейшей эксплуатации, особенно это экономически не эффективно при малых партиях производимых изделий [2]. К тому же сама логика способа не выдерживает критики, ведь контролю подвергаются лишь те конструкции, которые впоследствии будут разрушены, и наоборот, конструкции, идущие в производство, фактически лишены какого-либо контроля. Детальные исследования больших партий конструкций показывают несостоятельность данного метода. Так в работе [3] произведен детальный инструментальный

контроль класса бетона и величины предварительного напряжения арматуры 1000 шт. серийных шестипустотных преднапряженных настилов УНТ-59-12. Изделия при производстве подверглись всем этапам входного и операционного контроля. Средняя прочность на сжатие бетона  $R_{bs}$  составила 20 МПа, средняя величина предварительного напряжения арматуры  $\sigma_{con,s}$  равна 332,9 МПа. По результатам испытаний установлено, что фактическая  $R_b$  у 84 настилов находилась в диапазоне 15...16,9 МПа, а  $\sigma_{con}$  у 30 настилов была ниже 240 МПа. Представим ситуацию, что при выходном контроле несколько из этих конструкций подвергли разрушению, по жесткости и трещиностойкости эти конструкции проверку бы не прошли, и всю партию пришлось бы списать или отправить на дополнительные исследования. Означает ли это что и все остальные конструкции из партии не годны к эксплуатации? Отнюдь, у 93 настилов из партии  $R_b$  выше 23 МПа, а  $\sigma_{con}$  у 26 настилов оказалось свыше 401 МПа. Более 900 конструкций по результатам испытаний удовлетворили требованиям расчета по предельным состояниям, а для остальных были снижены проектные нагрузки. Таким образом, необходима разработка неразрушающих методов контроля качества прочностных параметров производимых железобетонных изделий. Интеграль-

ные параметры: прочность, жесткость, трещиностойкость состоят из множества характеристик на них влияющих. Для железобетонных изгибаемых изделий без предварительного напряжения арматуры наиболее важными прочностными характеристиками являются класс бетона по прочности и диаметр продольной рабочей арматуры. В данной статье подробнее рассмотрим новый, предлагаемый нами, способ определения прочности бетона.

При производстве железобетонных сборных изделий наиболее остро встает вопрос определения фактического класса бетона в данных конструкциях. Из учебного курса железобетона известно, что класс бетона непосредственно связан с модулем упругости бетона [4]. Вопрос диагностики модуля упругости можно рассмотреть в двух случаях. Первый – это диагностика класса (модуля упругости) бетона при заводском производстве ЖБИ, включив данную процедуру в технологическую последовательность производства работ. Второй вопрос – это определение прочности бетона в конструкциях сооружения, которые находятся в стадии эксплуатации в нагруженном состоянии. При строительстве зданий из монолитного железобетона также встает вопрос определения модуля упругости бетона как основной характеристики, отвечающей за прочность и целостность как отдельно взятого элемента, так и всего здания в целом.

Испытания образцов, специально изготавливаемых параллельно с производством конструкции на заводе ЖБИ, достаточно широко применяется на практике как способ определения модуля упругости бетона [5]. Основным недостатком данного метода является изменение физико-механических показателей исследуемой конструкции с течением времени, как следствие, при диагностике конструкции, находящейся в здании, применяют другие методы, позволяющие оценить модуль упругости бетона данной конструкции в данный момент времени. Кроме того, погрешность применяемого способа весьма значительна 10–12 %. Влажность, температура, агрессивные среды – все это факторы, которые непосредственно влияют на физические и механические свойства бетона в изделии. Также данный метод является разрушающим, дорогостоящим и трудным в реализации в связи с тем, что его применение возможно только на заводе ЖБИ, оснащенном всем необходимым для этих целей оборудованием [6, 7].

Подводя итог, можем сказать с высокой долей уверенности, что вопрос диагностики модуля упругости бетона в стадии эксплуатации весьма актуален [8]. В этом случае нашли свое применение известные разрушающие методы контроля

[9]. В работах [10–12] определены минусы данных методик.

Механические методы по косвенным характеристикам дают лишь приблизительные значения модуля упругости бетона, таким как: сила скалывания ребра конструкции, размер отпечатка при вдавливании металлического шарика, величиной отскока бойка при ударе [13].

Применяемая методика показывает низкую точность из-за объективных факторов, влияющих на испытание, прочность поверхностного слоя бетона, его карбонизация, влажностные параметры, неоднородность структуры и т. д. [14]. Поэтому, даже при соблюдении всех правил и методик многочисленных ГОСТов, погрешность данных методик выше, чем при определении кубиковой прочности, порядка 12–15 % [15].

Очень хорошо нам известны методики с применением ультразвука, которые увязывают скорость прохождения ультразвуковых волн сквозь толщу конструкционного материала с упругопластичными свойствами бетона [16]. Неточность ультразвуковых методик составляет чуть меньший процент погрешности 10...12 % [17].

Но данные методики также далеки от совершенства, о чем говорят следующие факты: отсутствие прямой зависимости диагностируемых параметров друг от друга. Увеличение погрешности применяемой методики также следует ассоциировать и с высокими требованиями к практическим навыкам оператора, прочность поверхностного слоя бетона, его карбонизация, влажностные параметры, неоднородность структуры и т. д., также пагубны для точности ультразвуковых методик. Ультразвуковой метод можно уверенно назвать местным, поскольку он позволяет определить искомые характеристики на локальном, строго ограниченном участке измерения [18].

Также следует указать еще один способ диагностики прочностных показателей бетона на основе измеренной первой резонансной частоты продольных или поперечных колебаний готового изделия [19]. Тем не менее, отсутствие доступа к торцам изделия, находящегося непосредственно в здании накладывает существенное ограничение на использование способа с продольными колебаниями, оставляя поле его применения только в заводских условиях. Погрешность вибрационного метода чуть ниже: около 10 % [20].

Исходя из вышеизложенного, задачей исследования является разработка способа определения искомого модуля упругости бетона по коэффициенту затухания колебаний процесса с более низкой погрешностью, в сравнении с существующими способами, и апробирование данного способа на натурных конструкциях.

**Материалы и методы.** Из курса физики [21] нам известна формула для коэффициента затухания колебательного процесса  $\alpha$ :

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

где  $\tau$  – это время релаксации, или время, затухания амплитуды в  $e \approx 2,7$  раза. Следовательно, данная характеристика фиксирует потери кинетической энергии в изделии ЖБИ производства.

За прошедшее время с позиции контроля качества железобетонных изделий коэффициент затухания колебаний в отличие от логарифмического декремента затухания колебаний не изучался. В области строительства применяется лишь методика диагностики звукоизоляции стеклянных пакетов оконных рам по коэффициенту затухания колебательного процесса [22].

Логарифмический декремент затухания колебаний смотрят по двум соседним амплитудам затухающего колебательного процесса, по сути, коэффициент затухания и логарифмический декремент затухания, они характеризуют один и тот же физический процесс потери энергии в колебательной системе, но, в случае применения варианта с логарифмическим декрементом погрешность накладывают колебания более высоких порядков. Коэффициент затухания колебаний определяют на значительном куске виброграммы, что повышает точность. Так же следует отметить, что логарифмический декремент затухания колебаний сильно меняется на различных стадиях загрузки конструкции [23].

При проведении опытов следует стремиться к одинаковым условиям опирания и вводить равный уровень энергии в колебательную систему. В этом случае потери энергии в железобетонной балке, выраженные значением коэффициента затухания колебаний позволят с более высокой степенью вероятности определить модуль упругости бетона в сравнении с практикуемыми механическими или ультразвуковыми методами.

Нами была проведена серия испытаний реальных железобетонных конструкций: всего 5 типов перемычек массой 108 кг, длиной 2590 мм, сечением 12 см на 14 см, с арматурным армированием арматурой  $d = 12$  мм класса А400, модуль упругости бетона ненапряженных ж/б балок лежит в диапазоне от  $E_b = 16 \cdot 10^3$  МПа до  $E_b = 32,5 \cdot 10^3$  МПа.

Опишем подробно испытательную методику. Каждое из изделий располагают на стенде, один свободный конец устанавливают шарнирно-подвижно, второй же, напротив, шарнирно-неподвижно, в соответствии с реальной схемой опирания в здании, и возбуждают в кон-

струкции свободные затухающие поперечные колебания, используя силу механического удара киянкой с резиновым ударником, есть вариант возбуждения колебаний путем мгновенного снятия загрузки конструкции при помощи обрыва связи подвешенного с низа конструкции груза. Второй вариант обеспечит условие равенства вводимой кинетической энергии в колебательную систему, но, как показали многочисленные проведенные испытания на одной конструкции, сила удара киянкой существенно не влияет на частоту колебаний или коэффициент затухания колебаний. Далее при помощи установленного вибронализатора «Вибран», снимают амплитудно-частотную характеристику.

В режиме вынужденных резонансных колебаний (рис. 1) на готовое установленное изделие 1 в центре закрепляют демпфер колебаний 2, а с обратной стороны – приемник частотных колебаний 3. Генератор 4 и усилитель 5 нужны для поддержки постоянства уровня вводимой энергии и частоты колебаний. Частоту электрического сигнала, фиксируют при использовании частотомера 6 и вольтамперметром 7.

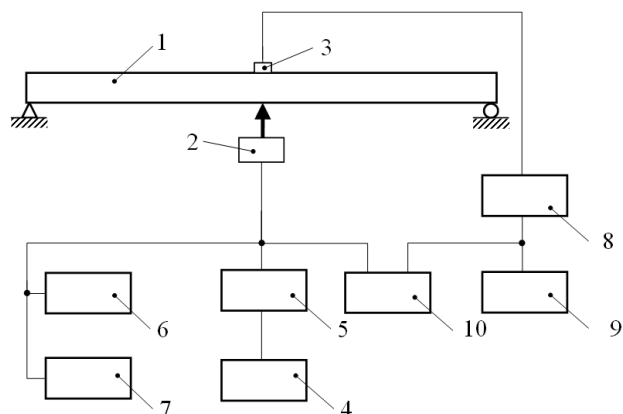


Рис. 1. Схема установки для фиксации затухания колебательного процесса в режиме вынужденных колебаний:

- 1 – конструкция, 2 – источник энергии, 3 – приемник, 4 – генератор, 5 – усилитель, 6 – частотомер, 7 – вольтампермер, 8 – усилитель, 9 – анализатор, 10 – осциллограф

В схему необходимо включать усилители, анализатор, в связи с малой величиной вводимой энергии в колебательную систему. Также мы включили электронный осциллограф 10 для фиксации колебаний и визуализации опыта.

**Основная часть.** Занесем данные результатов обработки эксперимента в таблицу 1, на основании которой построена функция (2), аппроксимирующая полученные значения «начальный модуль упругости бетона – коэффициент затухания колебательного процесса» (рис. 2).

$$E_b = 37,232 \cdot \alpha^{-0,919} \quad (2)$$

Таблица 1

**Значения модулей упругости бетона действительных и определенных по измеренной характеристике затухательного процесса, погрешность предложенного способа**

Модуль упругости бетона, $E_b, \cdot 10^3$ МПа	16	23	27,5	8,8	32,5
Коэффициент затухания колебательного процесса, $\alpha$	2,61	1,72	1,365	1,314	1,2
Модуль упругости бетона, $E_b, \cdot 10^3$ МПа, найденный нами по выражению 2	16,02	23,01	28,04	29,03	31,79
Погрешность, %	0,09	0,04	2,81	0,19	1,94

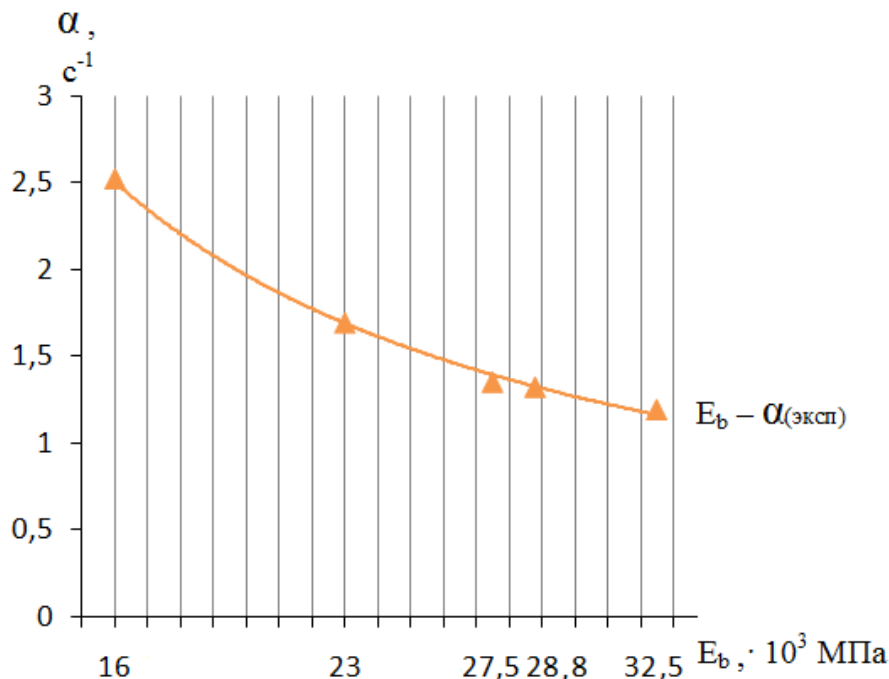


Рис. 2. График аппроксимирующей функции 2

Разработанный способ предлагается применять следующим образом: находить коэффициент затухания колебаний и по функции, аппроксимирующей эмпирические данные определять модуль упругости в железобетонной балке.

Рисунок 2 наглядно демонстрирует нам взаимозависимость исследуемых характеристик. Следует отметить действительно низкую погрешность (менее 3 %) предлагаемого нами способа, возможно погрешность увеличится при опытах на других конструкциях с более сложным поперечным сечением и армированием.

Предложен следующий способ определения начального модуля упругости бетона: для его реализации нужно произвести 6-8 конструкций эталонов одинакового типа-размера, в которых модуль упругости бетона разный в нужном диапазоне, поставить на стенд в соответствии с опиранием стоящей в сооружении конструкции, возбудить колебания на основной частоте, определить коэффициент затухания колебательного процесса, по измеренным величинам построить график взаимозависимости искомых характеристик друг от друга. В серийно производимых изделиях меряют коэффициент затухания колебаний и по аппроксимирующей функции определяют

начальный модуль упругости бетона (по которому возможно определить и класс по прочности бетона конструкции). На разработанный нами способ был получен патент [24]. Таким образом, разработанный метод возможно применять в двух случаях. Во-первых, включив его в технологическую схему при производстве заводских ЖБИ удобно производить диагностику модуля упругости бетона всех производимых конструкций. Процедура контроля установленной на стенд конструкции при применении современных автоматизированных электронных систем займет всего несколько секунд и позволит проводить сплошной контроль производимых изделий. Во-вторых, в случае, когда необходимо проверить модуль упругости бетона в стоящей в здании конструкции, также удобно применять разработанный метод, необходимо лишь обеспечить доступ к противоположным сторонам конструкции для крепления датчиков и по предложенному способу сопоставить значение коэффициента затухания колебаний с ранее исследованной эталонной конструкцией. Применение разработанного способа на монолитных конструкциях требует дальнейшего исследования.

**Выводы.**

1. По результатам исследований подтверждена взаимозависимость исследуемых характеристик в протяженных изгибаемых ЖБИ в упругой стадии. Данная зависимость носит обратный характер: с увеличением модуля упругости бетона наблюдается снижение значения коэффициента затухания колебаний. При увеличении значения модуля упругости бетона в два раза, наблюдается снижение величины коэффициента затухания колебаний примерно в два раза, что показывает высокую наглядность предлагаемого способа, в отличие от применения методик диагностики модуля упругости бетона по основной частоте свободных затухающих колебаний, когда при тех же условиях мы видим изменение частоты колебаний лишь на 20 %.

2. Подтвержден экспериментом разработанный нами способ диагностики и определения значения начального модуля упругости бетона, заключающийся в изготовлении 6–8 конструкций эталонов одинакового типа-размера, в которых модуль упругости бетона разный в нужном диапазоне, размещении на стенде в соответствии с опиранием стоящей в сооружении конструкции, возбуждении колебания на основной частоте, определении коэффициента затухания колебательного процесса, по измеренным величинам построении графика взаимозависимости искомым характеристик друг от друга. В серийно производимых изделиях меряют коэффициент затухания колебаний и по аппроксимирующей функции определяют начальный модуль упругости бетона (по которому возможно определить и класс по прочности бетона конструкции).

3. Погрешность предложенного способа низкая (до 3 %), что позволяет сделать вывод о необходимости дальнейшего исследования данного способа на различных ж/б конструкциях.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Байков В.Н., Сигалов Э.Е. Железобетонные конструкции: общий курс. М.: Изд-во Стройиздат, 2013. 767 с.
2. Козачек В.Г., Нечаев Н.В., Нотенко С.Н. Обследование и испытание зданий и сооружений. М.: Изд-во Высшая школа, 2018. 447 с.
3. Сехниашвили Э.А. Интегральная оценка качества и надежности предварительно напряженных конструкций. М.: Изд-во Наука, 1988. 217 с.
4. Цай Т.Н. Строительные конструкции. Железобетонные конструкции. Изд-во Лань, 2022. 464 с.
5. Габрусенко В.В., Беккер В.А. Каменные и железобетонные конструкции одноэтажных зданий. Изд-во Новосибирский ГАСУ, 2021. 223 с.

6. Abeele K. Damage assessment in reinforced concrete using spectral and temporal nonlinear vibration techniques // Cement and Concrete Research. 2018. № 30. Pp. 1453–1464.

7. Zhang W. Application of wide band AE sensor in model test of reinforced concrete structures // 17th World conference on nondestructive testing (25–28 oct. 2013 y., Shanghai, China). Shanghai, 2013. Pp. 362–369.

8. Korobko, A.V., Savin, S.Y., Balikhina, Y.E. Estimation of geometrical torsion rigidity of triangular and rectangular sections using interpolation method // Lecture Notes in Mechanical Engineering 2018. Pp. 1293–1301. DOI: 10.1007/978-3-319-95630-5\_136

9. Коробко В.И., Коробко А.В. Контроль качества строительных конструкций: Виброакустические технологии. М.: Изд-во АСВ, 2003. 288 с.

10. Коробко В.И., Калашникова Н.Г., Абашин Е.Г. Поперечный изгиб и свободные колебания упругих изотропных пластинок в виде равнобедренных треугольников // Строительство и реконструкция. 2021. № 6 (98). С. 20–27.

11. Savin S.Yu., Balikhina Yu.E. Estimation of Geometrical Torsion Rigidity of Triangular and Rectangular Sections Using Interpolation Method // Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering. 2019. Pp 1283–1291.

12. Korobko A.V., Korobko V.I., Interrelation of rigidity of triangular cross-sections under bar torsion with conformal radii relation // Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 687. Pp. 32–37.

13. Kim U.A. Nondestructive testing method for crack in carbon fiber reinforced concrete with infrared thermography // Journal key engineering materials. 2015. Vol. 32. Pp. 2128–2133

14. Limaye B. Need for non-destructive testing (NDT) of reinforced concrete & various ND tests // National seminar of ISNT Chennai: 2002. Pp. 472–483.

15. 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.

16. 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.

17. Гунгер Ю.Р. Ультразвуковой и вибрационный контроль состояния железобетонных стоек опор и фундаментов воздушных линий электропередачи // Электро-инфо. 2022. № 11. С. 40–43.

18. Абашин Е.Г. Оценка площади поперечного сечения рабочей арматуры в железобетонных балках по результатам вибрационных испытаний. // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. № 4. С. 26–32.

19. Пат. 2473880 Российская федерация, С2 МПК G01N 3/30. Способ определения модуля упругости бетона в упругих железобетонных конструкциях балочного типа. / В.И. Коробко, А.В. Коробко, Е.Г. Абашин; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Госуниверситет - УНПК». № 2011116856; заявл. 27.04.2011; опубл. 27.01.2013, Бюл. №3. 3 с.

20. 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.

21. Ядгаров У.Т. О затухании волн в структурно неоднородных упругих средах // Молодой ученый. 2016. №2. С. 280–282.

22. 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.

23. Korobko A.V., Kalashnikova N.G., Tyurin V.O. Geometric rigidity of torsion of thin-walled pipes: theory and experiment // Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 687. Pp. 61–66.

24. Пат. 2719793 Российская Федерация, G01M5/00 G01N29/11 Способ определения модуля упругости бетона в упругих железобетонных балках / Е.Г. Абашин; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Орловский ГАУ. № 2019102569 ; заявл. 30.01.2019 ; опубл. 23.04.2020, Бюл. № 3. 4 с.

#### Информация об авторах

**Абашин Евгений Геннадьевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры агропромышленного и гражданского строительства. E-mail: evabashin@yandex.ru. Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина. Россия, 302019, Орел, ул. Генерала Родина, д. 69.

Поступила 10.07.2023 г.

© Абашин Е.Г., 2023

#### **Abashin E.G.**

*Oryol State Agrarian University named after N.V. Parakhin*

*E-mail: evabashin@yandex.ru*

### **DETERMINATION OF THE ELASTIC MODULUS OF CONCRETE IN REINFORCED CONCRETE BEAMS BY THE RATE OF VIBRATION DAMPING**

**Abstract.** *The article shows a method for determining the modulus of elasticity of concrete by the measured dynamic characteristics of the tested structure – the damping coefficient of vibrations of reinforced concrete unstressed beams operating in the first stage of the stress-strain state.*

*We have proposed to use this characteristic of reducing the amplitude of vibrations, which takes into account the loss of kinetic energy in a reinforced concrete beam. It is assumed that a change in the modulus of elasticity of concrete in the considered range will significantly affect the rate of damping of vibrations, since with an increase in the modulus of elasticity of concrete, the elastic properties of the reinforced concrete element prevail over the plastic properties. When conducting experiments, one should strive for the same support conditions and introduce an equal level of energy into the oscillatory system. In this case, the energy loss in the reinforced concrete beam, expressed by the value of the vibration damping coefficient, will allow to determine the modulus of elasticity of concrete with a higher degree of probability in comparison with the practiced mechanical or ultrasonic methods.*

*We have developed a new method for determining the elastic modulus of concrete, based on the empirical determination of the vibration-damping coefficient of reference structures of a given type and size and the construction of a graphical dependence of the vibration damping coefficient on the elastic modulus of concrete. We have obtained greater accuracy in determining the modulus of elasticity of concrete in comparison with the practiced mechanical or ultrasonic methods.*

**Keywords:** *vibration-damping coefficient, reinforced concrete beams without prestressing reinforcement, modulus of elasticity of concrete, non-destructive testing methods.*

## REFERENCES

1. Bajkov V.N., Sigalov E.E. Reinforced concrete structures: general course [Zhelezobetonnye konstrukcii: obshchij kurs]. M.: Izd-vo Strojizdat, 2013. 767 p. (rus)
2. Kozachek V.G., Nechaev N.V., Notenko S.N. Inspection and testing of buildings and structures [Obsledovanie i ispytanie zdaniy i sooruzhenij]. M.: Izd-vo Vysshaya shkola, 2018. 447 p. (rus)
3. Sekhniashvili E.A. Integral assessment of the quality and reliability of prestressed structures [Integral'naya ocenka kachestva i nadezhnosti predvaritel'no napryazhennykh konstrukcij]. M.: Nauka, 1988. 217 p. (rus)
4. Caj T.N. Building structures. Reinforced concrete structures [Stroitel'nye konstrukcii. Zhelezobetonnye konstrukcii]. Lan', 2022. 464 p. (rus)
5. Gabrusenko V.V., Bekker V.A. Stone and reinforced concrete structures of single-storey buildings [Kamennye i zhelezobetonnye konstrukcii odnoetazhnykh zdaniy]. Novosibirskij GASU, 2021. 223 p. (rus)
6. Abeele K. Damage assessment in reinforced concrete using spectral and temporal nonlinear vibration techniques. Cement and Concrete Research. 2018. No. 30. Pp. 1453–1464.
7. Zhang W. Application of wide band AE sensor in model test of reinforced concrete structures. 17-th World conference on nondestructive testing (25–28 oct. 2013 y., Shanghai, China). Shanghai, 2013. Pp. 362–369.
8. Korobko A.V., Savin S.Y., Balikhina Y.E. Estimation of geometrical torsion rigidity of triangular and rectangular sections using interpolation method. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2018. Pp. 1293–1301. DOI: 10.1007/978-3-319-95630-5\_136
9. Korobko V.I., Korobko A.V. Stone and reinforced concrete structures of single-storey buildings Quality control of building structures: Vibroacoustic technologies [Kontrol' kachestva stroitel'nykh konstrukcij: Vibroakusticheskie tekhnologii]. M.: ASV, 2003. 288 p. (rus)
10. Korobko V.I., Kalashnikova N.G., Abashin E.G. Transverse bending and free oscillations of elastic isotropic plates in the form of isosceles triangles [Poperechnyj izgib i svobodnye kolebaniya uprugih izotropnykh plastinok v vide ravnobedrennykh treugol'nikov]. Construction and reconstruction. 2021. No. 6 (98). Pp. 20–27. (rus)
11. Savin S.Yu., Balikhina Yu.E. Estimation of Geometrical Torsion Rigidity of Triangular and Rectangular Sections Using Interpolation Method. Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering. 2019. Pp. 1283–1291.
12. Korobko A.V., Korobko V.I., Interrelation of rigidity of triangular cross-sections under bar torsion with conformal radii relation. Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 687. Pp. 32–37.
13. Kim U.A. Nondestructive testing method for crack in carbon fiber reinforced concrete with infrared thermography. Journal key engineering materials. 2015. Vol. 32. Pp. 2128–2133.
14. Limaye B. Need for non-destructive testing (NDT) of reinforced concrete & various ND tests. National seminar of ISNT Chennai. 2002. Pp. 472–483.
15. Korobko V.I., Kalashnikova N.G., Kalashnikova O.V. Control of the stiffness of elastic plates using the vibration method [Kontrol' zhestkosti uprugih plastinok s pomoshch'yu vibracionnogo metoda]. Construction and reconstruction. 2017. No. (74). Pp. 26–31. (rus)
16. Korobko V.I., Kalashnikova N.G. Experimental determination of the fundamental frequency of vibrations of plates in the form of a rhombus and an isosceles triangle [Eksperimental'noe opredelenie osnovnoj chastoty kolebanij plastinok v vide romba i ravnobedrennogo treugol'nika]. Fundamental and applied problems of engineering and technology. 2018. No. 3 (329). Pp. 57–63. (rus)
17. Gunger Yu.R. Ultrasonic and vibration monitoring of the condition of reinforced concrete pillars supports and foundations of overhead power lines of the triangle [Ul'trazvukovoj i vibracionnyj kontrol' sostoyaniya zhelezobetonnykh stoek opor i fundamentov vozduzhnykh linij elektroperedachi]. Elektro-info. 2022. No. 11. Pp. 40–43. (rus)
18. Abashin E.G. Evaluation of the cross-sectional area of the working reinforcement in reinforced concrete beams based on the results of vibration tests [Ocenka ploshchadi poperechnogo secheniya rabochej armatury v zhelezobetonnykh balkah po rezul'tatam vibracionnykh ispytaniy]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2018. No. 4. Pp. 26–32. (rus)
19. Korobko V.I., Korobko A.V., Abashin E.G. Method for determining the modulus of elasticity of concrete in elastic reinforced concrete structures of beam type. Patent RF, no. 2011116856, 2013.
20. Abashin E.G. Determination of the initial modulus of elasticity of concrete by the main frequency of vibrations of reinforced concrete beams [Opredelenie nachal'nogo modulya uprugosti betona po osnovnoj chastote kolebanij zhelezobetonnykh balok]. Scientific Journal of Construction and Architecture. 2017. No. 4 (48). Pp. 21–28. (rus)
21. Yadgarov U.T. On wave attenuation in structurally inhomogeneous elastic media [O zatuhanii voln v strukturno neodnorodnykh uprugih sredah]. Molodoj uchenyj. 2016. No. 2. Pp. 280–282. (rus)

22. Zhogoleva O.A., Giyasov B.I., Fedorova O.O. Methodology for determining the sound insulation of apartment fences according to the conditions of noise protection [Metodika opredeleniya zvukoizolyacii ograzhdenij kvartir po usloviyam zashchity ot shuma]. Bulletin MGBU. 2017. No. 10 (109). Pp. 1153–1162. (rus)

23. Korobko A.V., Kalashnikova N.G., Tyurin V.O. Geometric rigidity of torsion of thin-walled pipes: theory and experiment. (Scopus). Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 687 Pp. 61–66.

24. Abashin E.G. Method for determining the modulus of elasticity of concrete in elastic reinforced concrete beams. Patent RF, no. 2019102569, 2020.

*Information about the authors*

**Abashin, Evgeniy G.** PhD. E-mail: evabashin@yandex.ru. Oryol State Agrarian University named after N.V. Parakhin. Russia, 302019, Oryol, st. General Rodina, 69.

---

*Received 10.07.2023*

**Для цитирования:**

Абашин Е.Г. Определение модуля упругости бетона в железобетонных балках по скорости затухания колебаний // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 9. С. 23–30. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-9-23-30

**For citation:**

Abashin E.G. Determination of the elastic modulus of concrete in reinforced concrete beams by the rate of vibration damping. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 9. Pp. 23–30. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-9-23-30