

УДК 69.04

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ АРМИРОВАНИЯ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНУЮ ХАРАКТЕРИСТИКУ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ КОНСТРУКЦИИ

Г. А. Столповский, А. М. Нестеренко

Оренбургский государственный университет (г. Оренбург)

Аннотация. Определение как расчётных, так и фактических частотных характеристик строительных конструкций (СК) – актуальная задача для инженеров-строителей. Данная характеристика может использоваться не только в расчётах на прочность и устойчивость при динамических нагрузках, но и при оценке фактической конструктивной целостности зданий и сооружений. Однако присутствует большое количество факторов, влияющих на колебания СК и усложняющих вычисление собственных частот и обертонов. Один из факторов – наличие арматуры в железобетонных (ж/б) конструкциях и её предварительное натяжение. Арматура и бетон имеют различные значения модуля упругости, что влияет на изгибную жёсткость конструкции. Предварительное натяжение арматуры в свою очередь прибавляет передаваемое на бетон дополнительное напряжение, которое наряду со значением нагрузки, равной модулю упругости, необходимо преодолеть, чтобы продольно деформировать конструкцию. В существующей технической литературе слабо освещён вопрос о влиянии степени и типа армирования на колебательные свойства железобетонных конструкций. В статье приводятся аналитические выражения для вычисления изгибной жёсткости и периодов колебаний основного тона ж/б балки с учётом наличия арматуры, а также её предварительного натяжения. Рассматриваются три балки с одинаковыми геометрическими параметрами: бетонная неармированная, железобетонная без предварительного напряжения и железобетонная с предварительным напряжением. Учёт арматуры производится через коэффициент приведения арматуры к бетону и вычисление приведённого момента инерции. Расчёт собственных частот осуществляется с помощью дифференциальных уравнений с решением для случая балки на двух опорах. Приводится сопоставление полученных данных с частотными характеристиками неармированной бетонной балки. Период основного тона собственных колебаний армированной балки по расчёту получается меньше в 1,056 раза, или на 6,6 %. В свою очередь, влияние предварительного напряжения конструкции проявляется в уменьшении периода еще на 0,55 %. Общее уменьшение периода колебаний составило 7,15 %. Дальнейшее увеличение степени армирования приведёт к повышению приведённого момента инерции с коэффициентом 8,33, что необходимо учитывать при определении амплитудно-частотных характеристик железобетонных конструкций.

Ключевые слова: конструкции; колебания; изгибная жёсткость; армирование; предварительное напряжение.

Введение. Оценка частотных характеристик строительных конструкций (СК), как расчётных, так и фактических, – актуальная задача для инженеров и строителей в настоящее время. Данная характеристика может использоваться не только в расчётах на прочность и устойчивость при динамических нагрузках, но и при оценке фактической конструктивной целостности зданий и сооружений [1]. Однако присутствует множество факторов, влияющих на колебательные характеристики СК и усложняющих определение

этих параметров: конструктивная схема, напряжённо-деформированное состояние, наличие трещин и зон пониженной прочности [2]. Также одним из факторов является наличие арматуры в железобетонных конструкциях и её предварительное натяжение. В существующей технической литературе слабо освещён вопрос о влиянии степени и типа армирования на колебательные свойства железобетонных конструкций [3]. Основной показатель, характеризующий данные свойства, – это основная частота собственных колебаний

(основной тон или проектная частота). Многочисленные опыты показывают, что при одинаковых поперечных сечениях, способах закрепления, длинах и внешних нагрузках бетонные и железобетонные конструкции имеют разные частотные характеристики.

Цель работы – численная оценка влияния армирования на частотные характеристики железобетонных конструкций.

Методика исследования – аналитическое вычисление изгибной жёсткости как результата произведения модуля упругости и момента инерции, а также периодов основных форм колебаний через дифференциальное уравнение для балки на двух опорах. Учёт армирования в балке учитывался с помощью коэффициента приведения арматуры к бетону и введения в расчёт приведённого момента инерции.

Результаты исследований

1. Отличающиеся значения изгибной жёсткости

Строительные материалы – бетон и арматурная сталь – имеют разные значения модуля упругости E . Известно, что данный параметр является характеристикой продольной жёсткости рассматриваемого образца. В случаях, когда речь идёт о колебаниях конструкции, вызванных поперечными волнами, в литературе применяют такое понятие как *изгибная жёсткость* B . На амплитудно-частотные характеристики поперечных колебаний влияют не только упругие свойства материала, но и форма образца, учитываемая моментом инерции J . Соответственно, изгибная жёсткость B определяется выражением $B = EJ$ [4].

Рассмотрим теоретическую оценку влияния степени армирования на динамические характеристики на примере двух железобетонных балок $120 \times 140 \times 5000$. Одна балка бетонная неармированная ($\rho_{\text{неарм}} = 2000 \text{ кг/м}^3$), у другой продольное армирование по нижней зоне сечения представлено двумя стержнями класса А-III диаметром 8 мм, защитный слой бетона 10 мм. Класс бетона В15.

Момент инерции прямоугольного сечения бетонной балки относительно центральной оси определим по известной формуле:

$$J = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{12 \cdot 14^3}{12} = 2744 \text{ см}^4 = 2744 \cdot 10^{-5} \text{ м}^4,$$

где b – ширина сечения балки, см; h – высота сечения балки, см.

Момент инерции железобетонной балки вычислим как приведённый момент инерции ($J_{\text{прив}}$) с учётом всей площади сечения бетонной балки и площадей сечения арматуры с учётом коэффициента приведения арматуры к бетону [3]:

$$J_{\text{прив}} = J + J_S \cdot \alpha, \quad (1)$$

где $\alpha = E_S/E_b$ – коэффициент приведения арматуры к бетону.

J_S – момент инерции площади рабочей растянутой арматуры в нижней зоне относительно центра тяжести всего сечения (ц.т.):

$J_S = A_S(y_c - \alpha)^2 = 1,01(7 - 1)^2 = 36,36 \text{ см}^2$, где y_c – расстояние от ц.т. сечения до наиболее растянутого волокна ($y_c = h/2 = 14/2 = 7 \text{ см}$); α – защитный слой бетона.

Для классов бетона В25 и арматуры А-III сформируем исходные данные для последующего определения моментов инерции:

- модуль упругости E , МПа:

$$E_{\text{В15}} = 24 \cdot 10^3; E_{\text{А-III}} = 20 \cdot 10^4.$$

- плотность ρ , кг/м³:

$$\rho_{\text{В15арм}} = 2500.$$

Коэффициент приведения арматуры к бетону α :

$$\alpha = E_S / E_b = 20 \cdot 10^4 / 24 \cdot 10^3 = 8,33.$$

С учётом исходных данных выполним вычисления приведённого момента инерции железобетонной балки:

$$J_{\text{ред}} = 2744 + 36,36 \cdot 8,33 = 3047 \text{ см}^4 = 3047 \cdot 10^{-5} \text{ м}^4.$$

Составим отношение моментов инерции армированной балки и неармированной:

$$\frac{J_{\text{прив}}}{J} = \frac{3047}{2744} = 1,11.$$

Применительно к тем же балкам найдём периоды T и частоты ω свободных колебаний. Свободные колебания балки описываются дифференциальным уравнением

$$\frac{EJ}{\rho} \cdot \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0. \quad (2)$$

Для балки на двух опорах решение данного дифференциального уравнения приводит к следующей зависимости круговой частоты ω , рад/с:

$$\omega = \sqrt{\frac{48 \cdot 0,85 \cdot EJ}{ml^3}}, \quad (3)$$

где l – длина балки, м; m – сосредоточенная масса всей балки, кг; 0,85 – коэффициент, учитывающий снижение жёсткости под влиянием неупругих деформаций бетона растянутой зоны.

Так, для заданной бетонной неармированной балки круговая частота свободных колебаний:

$$\begin{aligned} \omega_6 &= \sqrt{\frac{48 \cdot 0,85 \cdot 24 \cdot 10^9 \cdot 2744 \cdot 10^{-5}}{210 \cdot 5^3}} = \\ &= 1012 \text{ рад/с.} \end{aligned}$$

Линейная частота $\eta = 1012/(2 \cdot \pi) \approx 161$ Гц.

Период свободных колебаний $T_6 = 1/107 = 0,00621$ с.

Для железобетонной балки круговая частота свободных колебаний:

$$\begin{aligned} \omega_6 &= \sqrt{\frac{48 \cdot 0,85 \cdot 24 \cdot 10^9 \cdot 3047 \cdot 10^{-5}}{210 \cdot 5^3}} = \\ &= 1066 \text{ рад/с.} \end{aligned}$$

Линейная частота $\eta = 1043/(2 \cdot \pi) \approx 170$ Гц.

Период свободных колебаний $T_6 = 1/166 = 0,00588$ с.

Как видно, период свободных колебаний армированной балки больше в 1,056 раза, или на 6,6 %.

2. Влияние предварительного напряжения

Предварительное напряжение в железобетонных конструкциях создают с целью увеличения жёсткости. Тем самым повышается трещиностойкость конструкции и уменьшаются перемещения от внешней полезной нагрузки [5].

Также за счёт увеличения жёсткости изменяются периоды собственных колебаний в меньшую сторону. Предварительное обжатие бетона даёт дополнительное напряжение σ_{sp} , которое наряду с модулем упругости E необ-

ходимо преодолеть, чтобы продольно деформировать образец. Аналогичный принцип работ можно наблюдать на примере струны музыкального инструмента: чем сильнее натянута струна, тем с большей частотой она совершает колебания. Таким образом, изгибную жёсткость при наличии предварительного напряжения стоит рассчитывать:

$$B = 0,85 \cdot (E_b + \sigma_{sp}) \cdot J_{red}, \quad (4)$$

где σ_{sp} – величина предварительного напряжения с учётом потерь, МПа.

Определим изменения, которые произойдут с частотной характеристикой рассмотренной выше железобетонной балки при замене арматуры на класс А-IV и устройством предварительного напряжения.

Зададим величину предварительного натяжения $\sigma_{sp} = 0,9 R_{s,ser} = 0,9 \cdot 600 = 540$ МПа. С учётом потерь $\sigma_{sp} = 370$ МПа.

Изгибная жёсткость составит

$$\begin{aligned} B &= 0,85 \cdot (24 \cdot 10^9 + 370 \cdot 10^6) \times \\ &\times 3047 \cdot 10^{-5} = 631170815 \text{ Н} \cdot \text{м}^2. \end{aligned}$$

Тогда круговая частота свободных колебаний

$$\omega_6 = \sqrt{\frac{48 \cdot 631170815}{210 \cdot 5^3}} = 1074 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Линейная частота $\eta = 1074/(2 \cdot \pi) \approx 171$ Гц.

Период свободных колебаний $T_6 = 1/107 = 0,00585$ с.

По сравнению с армированной, но не преднапряжённой балкой период основного тона колебаний увеличился на 0,55 %.

Выводы. Увеличение частоты основного тона балки при её армировании и устройстве предварительного напряжения по сравнению с обычной бетонной балкой составило $6,6+0,55 = 7,15$ %. Стоит отметить, что при дальнейшем повышении степени армирования данной балки приведённый момент инерции будет расти с коэффициентом 8,33. Соответственно, разница между бетонной и армированной предварительно напряжённой балкой будет еще более значительной, что необходимо учитывать при определении частотных характеристик железобетонных конструкций.

Список литературы

1. Нестеренко М. Ю., Нестеренко А. М. Обследование зданий и сооружений методом сейсмического зондирования // Бюллетень Оренбургского научного центра УрО РАН. 2014. № 2. С. 5.
2. Исследование поглощающих свойств материала строительных конструкций на примере железобетонной перемычки / В. И. Жаданов [и др.] // Известия вузов. Строительство. 2016. № 9 (693). С. 76-86.
3. Акатьев В. А., Нигметов Г. М., Нигметов Т. Г. Влияние степени армирования железобетонной балки на ее амплитудно-частотную характеристику // Современные наукоёмкие технологии. 2015. № 3. С. 10.
4. Байков В. Н., Сигалов Э. Е. Железобетонные конструкции. Общий курс: учеб. для вузов. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1991. 767 с.: ил.
5. Улицкий И. И. Железобетонные конструкции (Расчёт и конструирование). Изд. третье, перераб. и доп. Киев: Будівельник, 1972. С. 992.
6. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003.

Информация об авторах

СТОЛПОВСКИЙ Георгий Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций, Оренбургский государственный университет, директор ООО «Промтехнологии», г. Оренбург. Область научных интересов – соединения строительных конструкций зданий и сооружений на основе древесины. E-mail: stolpovskij@mail.ru

НЕСТЕРЕНКО Алексей Михайлович – магистрант Оренбургского государственного университета по направлению «Строительство», ведущий инженер отдела геоэкологии ОНЦ УрО РАН. Область научных интересов – динамика зданий и сооружений, сейсмология. E-mail: Alexnes@mail.ru

UDC 69.04

**DETERMINATION OF REINFORCEMENT AND PRE-STRESSING INFLUENCE
ON FREQUENCY CHARACTERISTICS OF CONCRETE BEAM**

G. A. Stolpovskij, A. M. Nesterenko
Orenburg State University (Orenburg)

Abstract. Determination of the frequency characteristics of building structures – both the calculated and actual – an urgent problem for structural engineers. This characteristic can be used not only in the calculations for strength and stability under dynamic loads, but also in the evaluation of the actual structural integrity of buildings. However, there is a great number of factors affecting the structure oscillations and complicating the calculation of natural frequencies and overtones. One of these factors – a presence of reinforcement in concrete constructions and its pretension. Concrete and steel of armature have different elastic modulus values that affect the flexural rigidity of structure. Pre-tensioning, in turn, adds additional stress transmitted to the concrete and which, together with the load value equal to the modulus of elasticity must be overcome in order to deform longitudinally structure. The article provides analytical equations for calculating the flexural stiffness and oscillation basis tone periods for a concrete beam, considering the presence of reinforcement and its pretension. Three beams with identical geometrical parameters are considered: unreinforced concrete, reinforced concrete without prestressing reinforced concrete and prestressed. Accounting armature made through reinforcement to concrete adduction coefficient and calculation of reduced moment of inertia. Calculation of natural frequencies produced by the differential equations with the solution for the case of a beam on two supports. A comparison of the data with the frequency characteristics of non-reinforced concrete beam is also given. The period of basis tone oscillations of reinforced beams on the calculation turns out less than 1,056 times or by 6.6 %. In turn, the effect of pre-stressing appears in decrease period of a further 0.55 %. Overall decrease of the period of basis

tone oscillations has become about 7.15 %. Further increase of reinforcement degree results in addition of reduced moment of inertia with the rate of 8.33. That fact is important to consider during determination of the frequency characteristics of concrete structures.

Keywords: construction; oscillations; bending stiffness; reinforcement; prestressing.

REFERENCES

1. Nesterenko M. Yu., Nesterenko A. M. Obsledovanie zdaniy i sooruzhenii metodom seismicheskogo zondirovaniya [Inspection of buildings and structures by seismic sounding], *Byulleten' Orenburgskogo nauchnogo tsentra UrO RAN* [Bulletin of Orenburg Scientific Center UrD of RAS], 2014, No. 2, pp. 5.
2. Zhadanov V. I. [and others]. Issledovanie pogloshchayushchikh svoystv materiala stroitel'nykh konstruksii na primere zhelezobetonnoi peremychki [Study of absorbing properties of construction materials: concrete bulkhead case study], *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [Higher education institutes news. Civil engineering], 2016, No. 9 (693), pp. 76-86.
3. Akat'ev V. A., Nigmatov G. M., Nigmatov T. G. Vliyaniye stepeni armirovaniya zhelezobetonnoi balki na ee amplitudno-chastotnuyu kharakteristiku [Influence degree reinforcement of concrete beams on the ITS frequency response], *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern high technologies], 2015, No. 3, p. 10.
4. Baikov V. N., Sigalov E. E. Zhelezobetonnye konstruksii. Obshchii kurs [Reinforced concrete structures. General Course]: Textbook. vuzov. For 5-th ed., Revised. and ext., Moscow: Stroyizdat, 1991, 767 p.
5. Ulitsky I. I. Zhelezobetonnye konstruksii (Raschet i konstruirovaniye) [Reinforced concrete constructions (calculation and design)], Ed. third, revised. and complement, Kiev: Budivel'nik, 1972, p. 992.
6. SP 63.13330.2012. Betonnye i zhelezobetonnye konstruksii. Aktualizirovannaya redaktsiya SNIp 52-01-2003 [SP 63.13330.2012. Concrete and reinforced concrete structures. The updated edition of SNIp 52-01-2003].

Information about the authors

STOLPOVSKIY Georgiy Aleksandrovich – PhD, Orenburg State University, Russia. Research interests – construction connections of buildings based on wood. E-mail: stolpovskij@mail.ru

NESTERENKO Aleksey Mikhaylovich – student, Orenburg State University, Russia. Research interests – dynamics of buildings and structures, Seismology. E-mail: Alexnes@mail.ru

Библиографическая ссылка

Столповский Г. А., Нестеренко А. М. Определение влияния армирования и предварительного напряжения на амплитудно-частотную характеристику железобетонной конструкции // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2017. – № 3. – С. 62-66.