

УДК 624.012.3/4

Е. П. Герасимов

К определению нормативной надежности по деформациям железобетонных изгибаемых элементов

Поступила	10.04.2018
Рецензирование	23.06.2018
Принята к печати	11.07.2018

Вопросы нормирования надежности строительных конструкций волновали многих исследователей. Они имеют сложные решения, которые связаны с учетом экономических и неэкономических (социальных) последствий отказов. Если первые удастся учесть при расчете, то вторые учету поддаются не всегда. Задача нормирования надежности строительных конструкций по деформациям связана с учетом обоих видов последствий отказов. Знать величину нормативной надежности по деформациям так же важно, как и знать значение нормативной надежности по несущей способности, поскольку это решает ряд социальных и технических задач. Сложность нахождения значения нормативной надежности по деформации для большинства конструкций заключается в том, что неэкономические (социальные) последствия, скорее всего, будут преобладать над экономическими.

В статье предлагаются методы определения нормативной надежности по деформациям железобетонных изгибаемых конструкций. Рассмотрен метод определения с учетом экономических последствий отказа, но более подробно изложена методика, предполагающая учет неэкономических (социальных) последствий отказа. В основу расчета принята чувствительность человека к вибрациям, возникающим при деформации конструкций. Предлагаемая методика расчета нормативной надежности с учетом неэкономических (социальных) последствий учитывает только физиологические требования, предъявляемые к деформациям конструкций.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, вероятностные методы расчета, нормативная надежность строительных конструкций, расчет по деформациям.

Проектирование любой строительной конструкции подразумевает проведение ряда расчетов по прочности, устойчивости, жесткости и другим параметрам в зависимости от вида конструкции. Расчет по деформациям входит во вторую группу предельных состояний и включает в себя расчет по определению вертикальных перемещений конструкций (прогибов).

Расчет по деформациям сводится к выполнению неравенства

$$f \leq [f], \quad (1)$$

где f – прогиб от действующих нагрузок; $[f]$ – предельный прогиб.

СП 20.13330.2011 [1] установил предельные значения прогибов исходя из ряда требований:

- технологических,
- физиологических,
- конструктивных,
- эстетико-психологических.

Если выполняется расчет по вероятностному методу, то неравенство (1) преобразится и примет вид

$$P_f \geq [P_f], \quad (2)$$

где P_f – вероятность того, что фактический прогиб не превысит предельно допустимого

значения (вероятность безотказной работы по деформации или надежность по деформации); $[P_f]$ – минимально допустимое значение вероятности того, что прогиб не превысит предельно допустимого значения (нормативная надежность).

Определение вероятности P_f не составляет особой сложности при наличии соответствующих исходных данных. Так, с использованием метода статистического моделирования [2] были определены проектные надежности по деформациям некоторых сборных железобетонных подкрановых балок, изготавливаемых по серии 1.426.1-8. Результаты приведены в табл. 1.

Для плиты марки ПК63.15-8-АПВ теоретическая и фактическая вероятности безотказной работы по деформациям сборных железобетонных многопустотных плит перекрытия составят 0,999. Теоретическая надежность была определена на основании метода статистического моделирования, фактическая – на основе натурных испытаний [3].

Как видим, конструкции имеют разные значения надежности по деформациям, но о степени ее достаточности можно говорить только

Таблица 1

Значения надежности по деформациям сборных железобетонных подкрановых балок

Марки балок	Вероятность безотказной работы по деформациям
БК6-1AIV-C, БК6-1AIV-K, БК6-1AIV-T	0,993
БК6-1AV-C, БК6-AV-K, БК6-AV-T	0,979
БК6-1AIIIв-C, БК6-1AIIIв-K, БК6-1AIIIв-T	0,999
БК6-2AIIIв-C, БК6-2AIIIв-K, БК6-2AIIIв-T	0,972
БК6-6AIIIв-C, БК6-6AIIIв-K, БК6-6AIIIв-T	0,709

при сравнении этих значений с нормативным значением, т. е. при выполнении условия (2).

Назначение величины нормативной вероятности связано с определенными трудностями и на сегодняшний день не имеет единого решения. Имеется ряд предложений по назначению нормативного значения в пределах 0,9...0,999 [4–6]. Данные значения установлены исходя из пригодности к нормальным условиям эксплуатации и назначены волевым путем или на основе опыта эксплуатации.

Можно считать, что значение нормативной вероятности в формуле (2), как и в случае назначения нормативной надежности по несущей способности, зависит от последствий отказа, которые необходимо учитывать при расчете. Эти последствия подразделяются на экономически исчисляемые и экономически неисчисляемые (социальные). Каждое требование, предъявляемое к предельным прогибам, может быть отнесено к тому или иному последствию (рис. 1).

Задача определения нормативной надежности по деформациям при учете только экономически исчисляемых потерь может быть решена минимизацией целевой функции, в которой начальная стоимость выражена через коэффициент запаса [7–9]:

$$C = C_0 + C_f e^{-\varepsilon t} Q_f \rightarrow \min, \quad C_0 = C^* K^{1-\theta}, \quad (3)$$

где C – общая стоимость; C_0 – начальная стоимость конструкции; C_f – затраты, возникающие в случае возникновения отказа; $\varepsilon = \ln(1 + E)$, 1/год; E – норматив для приведения разновременных затрат к единому показателю; t – период, на который определяется нормативная надежность (число лет эксплуатации конструкции); Q_f – вероятность отказа; C^* – стоимость конструкции при $K = 1$; $K = \frac{[f]}{f}$ – коэффициент запаса; θ – величина,

зависящая от вида напряженного состояния и формы поперечного сечения.

Выражение (3) предполагает возможность возникновения только одного отказа за период эксплуатации здания.

Для минимизации целевой функции правую ее часть продифференцируем по коэффициенту запаса:

$$\frac{d(C^* K^{1-\theta})}{dK} + \frac{d(C_f e^{-\varepsilon t} Q_f)}{dK} = 0. \quad (4)$$

После выполнения соответствующих преобразований получаем

$$\frac{1-\theta}{K^\theta} = -\xi e^{-\varepsilon t} \frac{dQ_f}{dK}, \quad (5)$$

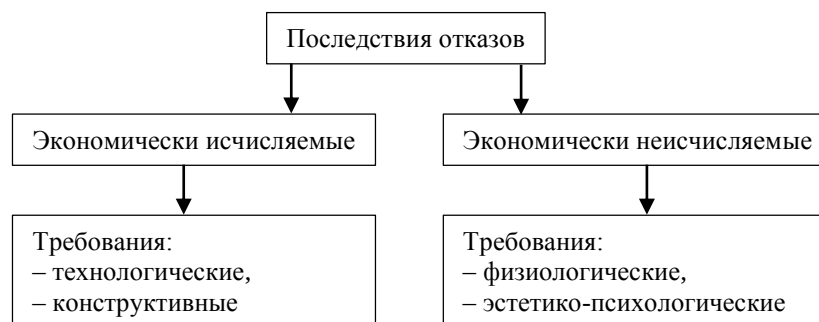


Рис. 1. Классификация требований в зависимости от последствий отказов

где $\xi = \frac{C_f}{C^*}$ – коэффициент экономической ответственности.

Дальнейшее преобразование зависит от вида законов распределений, применяемых при нахождении вероятности отказа. В случае применения нормального закона получаем

$$\begin{aligned} \frac{1-\theta}{K^0} &= -\xi e^{-\xi t} \frac{d(0,5 - \Phi(\beta))}{dK} \Rightarrow \\ \Rightarrow \frac{1-\theta}{K^0} &= \xi \frac{e^{-\xi t}}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{\beta^2}{2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{v_Q^2 + K^2 v_R^2}}, \end{aligned} \quad (6)$$

где β – характеристика безопасности; v_Q – коэффициент вариации деформаций от внешних воздействий; v_R – коэффициент вариаций допускаемых значений деформаций.

Так как допускаемые деформации имеют четко установленные значения, то можно считать, что $v_R = 0$, следовательно,

$$\frac{1-\theta}{K^0} = \xi \frac{e^{-\xi t}}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{\beta^2}{2}} \cdot \frac{1}{v_Q}. \quad (7)$$

Используя данное выражение, можно определить нормативную надежность конструкции по деформациям исходя только из экономически исчисляемых потерь. Решением выражения (7) будет служить характеристика безопасности β при известном коэффициенте экономической ответственности и коэффициент запаса K . Исходя из значения характеристики безопасности определяется вероятность безотказной работы, которая может быть принята за нормативную надежность.

Определение нормативной надежности по деформациям с учетом экономически неисчисляемых потерь – более сложная задача. Сложность заключается в том, что потери не

поддаются количественной оценке. Выходом является замена потерь некими рабочими характеристиками, с помощью которых может быть решена поставленная задача. Одной из таких характеристик может служить параметр вибрации, воздействующей на человеческий организм [10, 11].

Человек весьма чувствителен к колебаниям, и эта чувствительность изменяется в довольно широких пределах. Характер восприятия может быть определен шестью категориями чувствительности [12]. Каждая категория характеризуется предельными амплитудами ускорения (табл. 2).

Амплитуда ускорения зависит от жесткости конструкции. Используя данную зависимость и предельные значения амплитуды, можно определить нормативную надежность по деформациям исходя только из физиологических требований.

Амплитуда ускорения выражается формулой [12]:

$$W(\alpha) = \frac{b_r X_r(\alpha)}{p_r^2 - \omega^2}, \quad (8)$$

где b_r – коэффициент разложения нагрузки; $X_r(\alpha)$ – нормированная форма собственных колебаний; p_r^2 – квадрат круговой частоты; ω – частота колебаний.

Значение круговой частоты зависит от жесткости конструкции, способа ее опирания и вида действующих нагрузок [12]. Таким образом, задавая жесткость конструкции, можно определить амплитуду ускорения.

Для определения нормативной надежности по деформациям с учетом экономически неисчисляемых потерь предлагается использовать вероятностно-оптимизационную модель:

$$C = C_0 + C_f Q_f \rightarrow \min. \quad (9)$$

Таблица 2

Характеристика воздействия колебаний на людей в зависимости от ускорения гармонических перемещений

Характеристика воздействия колебаний на людей	Предельные амплитуды ускорения, мм/с ² (для частот до 10 Гц)
Неощутимые	10
Слабо оощутимые	40
Хорошо оощутимые	125
Сильно оощутимые	400
Вредны при длительном воздействии	1 000
Безусловно вредны	Более 1 000

Вместо экономических показателей (C_0 и C_f) предлагается применить некие величины, характеризующие чувствительность человека к амплитуде ускорения:

- C_0 – мера чувствительности человека к амплитуде ускорения при определенной жесткости конструкции;
- C_f – предельная мера чувствительности человека.

Для удобства расчетов формулу (9) представим в следующем виде:

$$C = \left(1 - \frac{C_0}{C_f}\right) + C_f Q_f \rightarrow \min. \quad (10)$$

Соотношение C_0 / C_f есть некая величина чувствительности человека. Она колеблется от 0 до 1. Если это соотношение близко к нулю, то увеличиваются благоприятные условия, при этом вероятность отказа Q_f уменьшается. С приближением к единице все сильнее будет ощущаться дискомфорт и вероятность отказа увеличится.

Значения C_0 и C_f предлагается определять при помощи графика, приведенного на рис. 2.

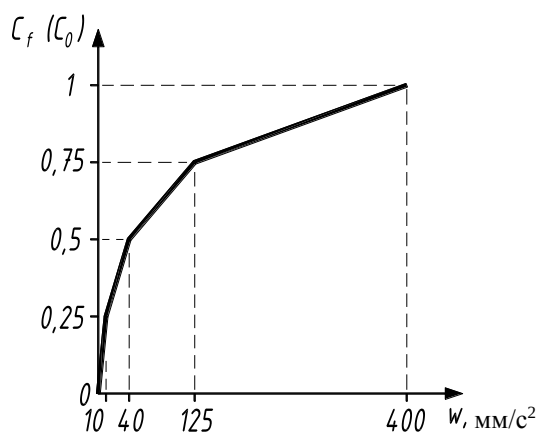


Рис. 2. Зависимость меры чувствительности человека от амплитуды ускорения

Ось абсцисс отражает значения амплитуд ускорений, ось ординат – мера чувствительности человека. Ордината разделена поровну на четыре участка:

- от 0 до 0,25 – колебания не ощутимы для человека;
- от 0,25 до 0,5 – колебания слабо ощущаются;
- от 0,5 до 0,75 – колебания хорошо ощущаются;
- от 0,75 до 1 – колебания ощущаются сильно.

Каждому значению ординаты соответствует определенная величина амплитуды ускорения (см. табл. 2). При построении графика предельное значение амплитуды ускорения принято равным 400 мм/с², ему соответствует максимальная, самая неблагоприятная мера чувствительности человека – единица.

Предельная мера амплитуды ускорения в 400 мм/с² принята из соображения, что для большинства строительных конструкций вряд ли можно ожидать амплитуду ускорений более 400 мм/с².

Порядок определения нормативной надежности следующий:

1. Исходя из предельного прогиба $[f]$ определяется минимально допустимая жесткость конструкции при известных действующих нагрузках.

2. По формуле (8) определяется амплитуда ускорения при минимально допустимой жесткости. Данное значение амплитуды будет являться предельно допустимым для рассматриваемой конструкции.

3. Исходя из значения предельно допустимой амплитуды по графику (см. рис. 2) определяется предельная мера чувствительности человека C_f .

4. Производится варьирование жесткости конструкции с определенным шагом.

При каждом значении жесткости определяется:

- амплитуда ускорения – по формуле (8);
- мера чувствительности человека C_0 – по графику (см. рис. 2) в зависимости от значения вычисленной амплитуды ускорения;
- среднее значение $\bar{f}$ и среднеквадратическое отклонение прогиба конструкции S_f ;
- вероятность отказа Q_f как вероятность достижения предельно допускаемого прогиба:

$$\beta = \frac{[f] - \bar{f}}{S_f}, \quad Q_f = 0,5 - \Phi(\beta); \quad (11)$$

- величина C – по формуле (10).

Таким образом, варьируя жесткость конструкции, можно добиться такого состояния, при котором в формуле (10) $C = \min$. По вероятности отказа Q_f определяется вероятность безотказной работы, которая принимается за нормативную надежность.

С использованием предложенной методики была вычислена нормативная надежность железобетонной подкрановой балки марки БК6-1AIV по деформации. Все исходные данные для расчета были приняты согласно проектным данным.

Расчет показал, что нормативная надежность балки по деформации составляет 0,988, что при проектной надежности 0,993

(см. табл. 1) указывает на достаточную надежность балки.

Таким образом, предложенная методика определения нормативной надежности по деформации железобетонных изгибаемых элементов довольно сложна и не лишена недостатков, но она помогает решить одну из проблем, связанных с назначением нормативной надежности строительных конструкций.

Библиографический список

1. СП 20.13330.2011. Свод правил. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07–85*. М., 1985.
2. Краковский М. Б. Определение надежности конструкций методами статистического моделирования // Строительная механика и расчет сооружений. 1982. № 2. С. 10–13.
3. Сапронов С. П. Надежность преднапряженных железобетонных плит на стадии изготовления : дис. ... канд. техн. наук. Усть-Каменогорск, 2001. 167 с.
4. Таль К. Э. Вопросы надежности железобетонных сооружений за рубежом // Бетон и железобетон. 1973. № 11. С. 42–43.
5. Громацкий В. А. Оценка надежности железобетонных изгибаемых элементов по деформациям // Строительная механика и расчет сооружений. 2007. № 2. С. 35–40.
6. Шпете Г. Надежность несущих строительных конструкций. М. : Стройиздат, 1994. 288 с.
7. Ржаницын А. Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. М. : Стройиздат, 1978. 239 с.
8. Снарский Б. И. К статистико-экономическому обоснованию несущей способности конструкций // Тр. АН Литовской ССР. Сер. Б. 1962, № 2 (29) ; 1963, № 1 (32).
9. Лычев А. С. Надежность строительных конструкций : учеб. пособие. М. : АСВ, 2008. 184 с.
10. Перемутьер А. В. Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций. М. : АСВ, 2007. 256 с.
11. Цейтлин А. И., Неустроев Э. А., Кобахидзе М. О. О динамической жесткости (зыбкости) междуэтажных перекрытий // Строительная механика и расчет сооружений. 1988. № 4. С. 30–33.
12. Инструкция по расчету несущих конструкций промышленных зданий и сооружений на динамические нагрузки / ЦНИИСК им. Кучеренко. М. : Стройиздат, 1970. 288 с.

Е. П. Gerasimov

To the Definition of Normative Reliability by Deformations Reinforced Concrete Bending Elements

Abstract. The questions of rationing the reliability of building structures excited many researchers. They have complex solutions that are related to the economic and non-economic (social) consequences of failures. If the former can be taken into account in the calculation, the second accounts are not always amenable. The task of normalizing the reliability of building structures by deformations is related to the consideration of both failure consequences types. Knowing the value of normative reliability by deformations is just as important as knowing the value of normative reliability in terms of carrying capacity, because it solves a number of social and technical problems. The difficulty of finding the value of normative reliability by deformation for the majority of designs is that non-economic (social) consequences are likely to prevail over economic ones.

The article proposes methods for determining the standard reliability for deformations of reinforced concrete bent structures. The method of determination is considered taking into account the economic consequences of the refusal, but a more detailed procedure is presented that presumes taking into account the noneconomic (social) consequences of the refusal. The calculation is based on the sensitivity of a person to vibrations that occur when deformation of structures. The proposed methodology for calculating the normative reliability, taking into account non-economic (social) consequences, takes into account only the physiological requirements imposed on the deformations of the structures.

Key words: reinforced concrete structures; probabilistic calculation methods; normative reliability of building structures; calculation by deformations.

Герасимов Евгений Петрович – кандидат технических наук, доцент кафедры строительного производства НГУАДИ. E-mail: Evgeniy_30_04_82@mail.ru