

УДК 624.012.3/4

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-2-87-94

*Е.П. ГЕРАСИМОВ,
Новосибирский государственный университет
архитектуры, дизайна и искусств имени А.Д. Крячкова*

НОРМИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПО ДЕФОРМАЦИЯМ ИСХОДЯ ИЗ ЭСТЕТИКО-ПСИХОЛОГИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ

В настоящее время расчеты всех строительных конструкций выполняются по методу предельных состояний. Выполнение всех требований по прочности, жесткости, трещиностойкости и т. д. обеспечивает конструкции необходимую надежность. Но определить численное значение надежности методом предельных состояний не представляется возможным.

Это можно сделать, только применив вероятностные методы расчета, получившие большое развитие во второй половине XX в. Внедрению их в практику препятствует ряд факторов, среди которых – отсутствие обоснованных значений нормативной надежности. Это, в свою очередь, связано с учетом последствий отказа, т. к. некоторые последствия не поддаются какой-либо численной оценке, например социальные последствия.

Определение нормативной надежности конструкций по пригодности к нормальной эксплуатации: деформаций, колебаний и т. д. – также вызывает определенные трудности. Отказы конструкций в этом случае имеют как экономические, так и социальные последствия. Работ, рассматривающих данный вопрос, очень мало.

Настоящая статья посвящена вопросу определения нормативной надежности по деформациям строительных конструкций исходя из эстетико-психологических требований. Предложен метод определения нормативной надежности, основанный на зависимости впечатлений от прогиба, который, в свою очередь, зависит от действующей нагрузки и жесткости конструкции.

Ключевые слова: изгибаемые строительные конструкции; нормативная надежность; вероятностные методы расчета строительных конструкций; деформация.

Для цитирования: Герасимов Е.П. Нормирование надежности строительных конструкций по деформациям исходя из эстетико-психологических требований // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 2. С. 87–94.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-2-87-94

*E.P. GERASIMOV,
Kryachkov Novosibirsk State University of Architecture, Design and Arts*

BUILDING RELIABILITY SPECIFICATION BY DEFORMATION BASED ON AESTHETIC AND PSYCHOLOGICAL REQUIREMENTS

The structural analysis is currently based on the limit state method. Meeting the strength, rigidity, crack resistance requirements ensures the required structural reliability. But the limit state method does not allow to determine the numerical value of reliability. This can be done only by applying probabilistic methods that are greatly developed in the late 20th century.

Their practical use is hindered by a number of factors, among which is the lack of reasonable values of the reliability specification. The reliability specification of structures is determined by their normal operation including deformation and vibrations causing certain difficulties. Structural failures in this case have both economic and social consequences. There are very few works considering this problem. This is most likely due to the fact that the calculation of suitability for normal operation plays a secondary role. Violation of serviceability conditions does not lead to large economic, environmental and social consequences. But it is still necessary to consider the reliability specification in this area.

This article determines the reliability specification by structure deformations based on aesthetic and psychological requirements. The proposed method for determining the reliability specification is based on deflection, which, in turn, depend on the effective load and structural rigidity.

Keywords: bending structures; reliability specification; probabilistic method; deformation.

For citation: Gerasimov E.P. Normirovanie nadezhnosti stroitel'nykh konstrukttsii po deformatsiyam, iskhodya iz estetiko-psikhologicheskikh trebovaniy [Building reliability specification by deformation based on aesthetic and psychological requirements]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2022. V. 24. No. 2. Pp. 87–94. DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-2-87-94

Назначение нормативных значений вероятности безотказной работы есть неотъемлемая часть развития вероятностного метода расчета строительных конструкций. Первоначально данные значения назначались интуитивно, на основе накопленного опыта проектирования и эксплуатации строительных конструкций. С развитием вероятностно-оптимизационного метода расчета появилась возможность обоснованно рассчитывать и назначать оптимальную вероятность безотказной работы, численное значение которой можно отождествить с нормативной надежностью. Сами численные значения нормативной надежности варьируются в пределах от 0,9 до 0,9999 и выше [1–6] в зависимости от последствий отказа. Причем данные последствия, как правило, экономически исчисляемые. Что касается определения значения нормативной надежности с учетом экономически неисчисляемых (социальных) потерь, то в данном случае возникают определенные трудности. Имеется ряд работ [7–9], посвященных данной проблеме, где авторы предлагают способы учета социальных потерь при определении нормативной надежности строительных конструкций. Но в данных работах определение нормативной надежности осуществляется с точки зрения несущей способности, что вполне верно. Работ, где обсуждается вопрос о назначении (или расчете) нормативной надежности по пригодности к нормальной эксплуатации, очень мало [3]. Нарушение данной пригодности хотя и не влечет за собой больших экономических и социальных последствий, но все равно требует правильного обоснования значения нормативной надежности.

Пожалуй, самым распространенным расчетом по пригодности к нормальной эксплуатации является расчет по деформациям. Данный расчет выполняется, прежде всего, для изгибаемых элементов. Согласно СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия», предельные значения прогибов назначаются из следующих требований:

- конструктивных;
- технологических;
- физиологических;
- эстетико-психологических.

Нарушение первых двух требований влечет за собой экономические последствия. Нарушение физиологических или эстетико-психологических требований – социальные последствия. В настоящей статье рассматривается вопрос о назначении нормативной надежности строительных конструкций по деформациям только исходя из эстетико-психологических требований.

Социальные последствия невозможно оценить в привычных единицах. Поэтому данные последствия предлагается выразить в условных единицах – баллах. Сами последствия отражают впечатления от прогиба конструкции. В случае достижения прогиба конструкции своего предельного значения впечатления будут максимально негативные. И численное значение таких впечатлений предлагается принять равным единице. При этом зависимость впечатлений от прогиба конструкции предполагается линейной (рис. 1).

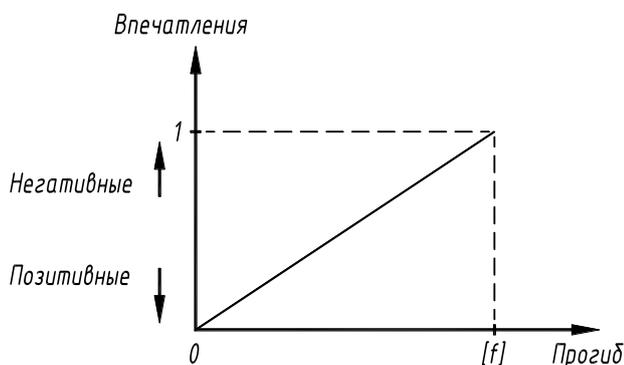


Рис. 1. Зависимость меры впечатления от прогиба

Для определения нормативной надежности предлагается использовать вероятностно-оптимизационную модель [10]:

$$C = C_0 + C_f \cdot Q_f \rightarrow \min. \quad (1)$$

Вместо экономических показателей (C_0 и C_f) предлагается применить баллы, характеризующие впечатления от прогиба.

C_0 – впечатления от прогиба конструкции при условии, что прогиб не достиг предельного значения.

C_f – наиболее негативные впечатления от прогиба конструкции в случае достижения им предельного значения (т. е. $C_f = 1$).

Впечатления зависят от величины прогиба, которая, в свою очередь, зависит от действующей нагрузки и жесткости конструкций.

Рассмотрим наиболее распространенную расчетную схему изгибаемых строительных конструкций – двухшарнирную балку, нагруженную равномерно распределенной нагрузкой (рис. 2).

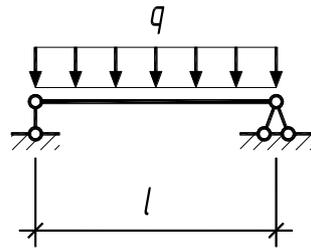


Рис. 2. Расчетная схема

Величина прогиба по такой схеме определяется по формуле

$$f = \frac{5}{384} \frac{q}{E \cdot I} l^4. \quad (2)$$

Соотношение действующей нагрузки к жесткости конструкции – $\frac{q}{E \cdot I}$ является величиной случайной. Обозначим данное соотношение как

$$\tilde{z} = \frac{\tilde{q}}{\tilde{E} \cdot \tilde{I}}. \text{ При достижении прогиба конструкции}$$

своего допустимого значения, т. е. при $f = [f]$, данное соотношение будет иметь конкретное, причем максимальное значение: $[z] = \frac{q}{E \cdot I}$. Соответственно, при любом случайном значении прогиба конструкции меньше предельно допустимого имеем: $\frac{\tilde{z}}{[z]} < 1$. При $\tilde{z} = [z]$ прогиб конструкции достигает своего

предельного значения, и впечатления будут максимально негативными, а чем \tilde{z} меньше $[z]$, наоборот, – прогиб будет небольшим, и впечатления будут более положительными. Формулу (1) в таком случае можно преобразовать и представить в следующем виде:

$$C = 1 - \frac{\tilde{z}}{[z]} + Q_f \rightarrow \min. \quad (3)$$

Выражение $1 - \frac{\tilde{z}}{[z]}$ отражает впечатления от прогиба, учитывая при этом значение действующей нагрузки и жесткости конструкции.

Численное значение $[z]$ вычисляется в зависимости от предельного прогиба и пролета конструкции. Так, при пролете $l = 6$ м допускаемый прогиб $[f]$ составляет 0,03 м, тогда

$$[f] = \frac{5}{384} \frac{q}{E \cdot I} l^4 \Rightarrow 0,03 = \frac{5}{384} \frac{q}{E \cdot I} 6^4 \Rightarrow 0,03 = \frac{5}{384} [z] \cdot 6^4, \quad [z] = \frac{2}{1125} \text{ м}^{-3}. \quad (4)$$

Случайное значение прогиба при этом определяется по выражению

$$\tilde{f} = \frac{5}{384} \frac{\tilde{q}}{\tilde{E} \cdot \tilde{I}} l^4 \Rightarrow \tilde{f} = \frac{5}{384} \tilde{z} \cdot 6^4 \Rightarrow \tilde{f} = \frac{135}{8} \tilde{z}. \quad (5)$$

Вероятность отказа Q_f – это вероятность того, что прогиб конструкции превысит допускаемую величину. Вероятность отказа определяется в зависимости от закона распределения, так при нормальном законе вероятность отказа определяется через индекс надежности [10]:

$$\beta = \frac{[f] - \bar{f}}{\sqrt{s_{[f]}^2 + s_f^2}}. \quad (6)$$

Допускаемый прогиб имеет конкретное значение, и это величина постоянная, $s_{[\bar{f}]}^2 = 0$, и, следовательно:

$$\beta = \frac{[f] - \bar{f}}{s_f} \text{ или } \beta = \frac{[f] - \bar{f}}{f \cdot v_f}. \quad (7)$$

Коэффициент вариации прогиба v_f определим при помощи метода линеаризации:

$$\frac{\partial f}{\partial q} = \frac{5}{384} \frac{l^4}{E \cdot I}, \quad (8)$$

$$\frac{\partial f}{\partial E} = -\frac{5}{384} \frac{q \cdot l^4}{E^2 \cdot I}, \quad (9)$$

$$\frac{\partial f}{\partial I} = -\frac{5}{384} \frac{q \cdot l^4}{E \cdot I^2}, \quad (10)$$

$$s_f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial q}\right)^2 s_q^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial E}\right)^2 s_E^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial I}\right)^2 s_I^2}. \quad (11)$$

После преобразования получаем

$$s_f = \frac{5}{384} \frac{q \cdot l^4}{E \cdot I} \sqrt{v_q^2 + v_E^2 + v_I^2} \text{ или } v_f = \frac{s_f}{f} = \sqrt{v_q^2 + v_E^2 + v_I^2}. \quad (12)$$

Ввиду малой изменчивости геометрических размеров поперечного сечения можно принять, что $v_I \approx 0$, и тогда

$$v_f = \sqrt{v_q^2 + v_E^2}. \quad (13)$$

Таким образом, общий порядок определения нормативной надежности по деформациям исходя из эстетико-психологических требований предлагается следующий:

1. Исходя из пролета конструкции и допускаемого прогиба, определяем максимальное значение отношения действующей нагрузки к жесткости конструкции: $[z] = \frac{q}{E \cdot I}$. Например, при $l = 6$ м и $[f] = 0,03$ м $[z] = \frac{2}{1125} \text{ м}^{-3}$.

2. Определяем коэффициент вариации значения прогиба, формула (13).

3. При определенном значении \bar{z} ($\bar{z} < [z]$) определяется:

– соотношение $\frac{\bar{z}}{[z]}$;

– среднее значение прогиба. Например, при $l = 6$ м $\bar{f} = \frac{135}{8} \bar{z}$ м;

– вероятность отказа Q_f :

$$\beta = \frac{[f] - \bar{f}}{f \cdot v_f}, \quad Q_f = 0,5 - \Phi(\beta); \quad (14)$$

– значение целевой функции, формула (3).

Таким образом, варьируя значение \bar{z} , можно добиться такого состояния, при котором значение целевой функции в формуле (3) $C = \min$. По вероятности отказа Q_f при $C = \min$ определяется нормативная надежность:

$$[P_f] = 1 - Q_f. \quad (15)$$

Таким образом, была вычислена нормативная надежность для конструкции, расчетная схема которой представлена на рис. 2, в зависимости от коэффициентов вариации нагрузок и модуля упругости. Нагрузки имеют большую изменчивость, и при расчете было принято три варианта: $v_q = 0,1$; $v_q = 0,2$ и $v_q = 0,35$ [7]. Изменчивость модуля упругости, как правило, небольшая, постоянная и принята $v_E = 0,1$ [Там же]. Результаты расчета в виде графика представлены на рис. 3.

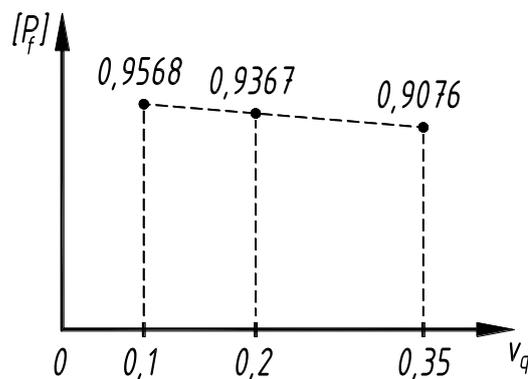


Рис. 3. Значения нормативной надежности в зависимости от изменчивости нагрузки

По вышеприведенному порядку были вычислены значения нормативной надежности для балок пролетом 3 и 24 м (расчетная схема балок – см. рис. 2).

Для данных балок приняты следующие параметры:

– пролет 3 м: $[f] = 0,02$ м, $[z] = \frac{64}{3375} \text{ м}^{-3}$, $\bar{f} = \frac{135}{128} \bar{z}$ м;

– пролет 24 м: $[f] = 0,096$, $[z] = \frac{1}{45000} \text{ м}^{-3}$, $\bar{f} = 4320 \cdot \bar{z}$ м.

Результаты расчета оказались такими же, как и для балки пролетом 6 м (см. рис. 3).

Временные нагрузки не всегда описываются нормальным законом распределения. Есть предложение описывать их двойным экспоненциальным законом. При учете данного закона немного математически меняется формула определения отказа. Поэтому были дополнительно определены значения нормативной надежности при комбинации нормального и двойного экспоненциального законов. Результаты, в виде графика, приведены на рис. 4.

Как видно, эти результаты не сильно отличаются от результатов, полученных ранее, разница в пределах 1 %.

Исходя из результатов расчета, можно сделать следующие выводы:

1. При использовании вероятностного метода расчета строительных конструкций значение нормативной надежности по прогибам, исходя из эстетико-психологических факторов, предлагается назначить в пределах от 0,9 до 0,95.

2. Значение нормативной надежности зависит главным образом от изменчивости действующей нагрузки. Чем меньше изменчивость нагрузки, тем выше численное значение нормативной надежности.

3. Использование при расчете наиболее распространенных законов распределения (нормального или комбинация нормального и двойного экспоненциального) приводит практически к одним и тем же результатам.

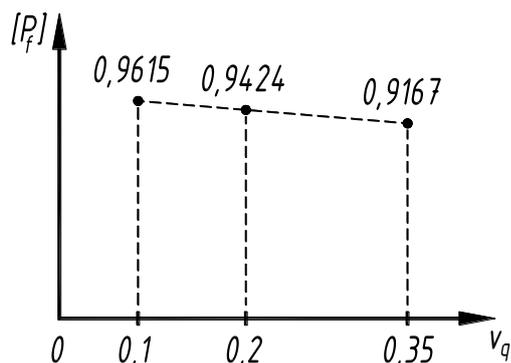


Рис. 4. Значения нормативной надежности в зависимости от изменчивости нагрузки (комбинация нормального и двойного экспоненциального законов)

Предложенная в статье методика определения нормативной надежности изгибаемых элементов исходя из эстетико-психологических требований не лишена недостатков, но позволяет приблизиться к обоснованию нормативных значений вероятности безотказной работы строительных конструкций. И это очень важно для дальнейшего развития вероятностного метода расчета.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шпете Г. Надежность несущих строительных конструкций. Москва : Стройиздат, 1994. 288 с.
2. Таль К.Э. Вопросы надежности железобетонных сооружений за рубежом // Бетон и железобетон. 1973. № 11. С. 42–43.
3. Громацкий В.А. Оценка надежности железобетонных изгибаемых элементов по деформациям // Строительная механика и расчет сооружений. 2007. № 2. С. 35–40.
4. Тамарзян А.Г. К оценке определения уровня риска ЧС по основным признакам его проявления на сооружение // Бетон и железобетон. 2001. № 5. С. 8–10.
5. Райзер В.Д. Анализ надежности конструкций при износе несущих элементов // Строительная механика и расчет сооружений. 2013. № 6. С. 16–20.
6. Перельмутер А.В. Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций. Москва : Изд-во АСВ, 2007. 256 с.
7. Лычев А.С. Надежность строительных конструкций. Москва : Изд-во АСВ, 2008. 184 с.
8. Райзер В.Д. Расчет и нормирование надежности строительных конструкций. Москва : Стройиздат, 1995. 352 с.
9. Райзер В.Д. Оптимизация надежности конструкций и безопасность человека // Строительная механика и расчет сооружений. 2009. № 6. С. 54–58.

10. *Ржаницын А.Р.* Теория расчета строительных конструкций на надежность. Москва : Стройиздат, 1978. 239 с.

REFERENCES

1. *Shpete G.* Nadezhnost' nesushchikh stroitel'nykh konstruktssii [Reliability of load-bearing structures]. Moscow: Stroiizdat, 1994. 288 p. (rus)
2. *Tal' K.E.* Voprosy nadezhnosti zhelezobetonnykh sooruzhenii za rubezhom [Reliability of reinforced concrete structures abroad]. *Beton i zhelezobeton*. 1973. No. 11. Pp. 42–43. (rus)
3. *Gromatskii V.A.* Otsenka nadezhnosti zhelezobetonnykh izgibaemykh elementov po deformatsiyam [Reliability assessment of reinforced concrete bending elements by deformations]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii*. 2007. No. 2. Pp. 35–40. (rus)
4. *Tamarzyan A.G.* K otsenke opredeleniya urovnya riska ChS po osnovnym priznakam ego proyavleniya na sooruzhenie [Assessing the emergency risk level by the main signs]. *Beton i zhelezobeton*. 2001. No. 5. Pp. 8–10. (rus)
5. *Raizer V.D.* Analiz nadezhnosti konstruktssii pri iznose nesushchikh elementov [Strength analysis of wear and tear of load-bearing elements]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii*. 2013. No. 6. Pp. 16–20. (rus)
6. *Peremul'ter A.V.* Izbrannye problemy nadezhnosti i bezopasnosti stroitel'nykh konstruktssii [Selected problems of reliability and safety of buildings]. Moscow: ASV, 2007. 256 p. (rus)
7. *Lychev A.S.* Nadezhnost' stroitel'nykh konstruktssii [Structural reliability]. Moscow: ASV, 2008. 184 p. (rus)
8. *Raizer V.D.* Raschet i normirovanie nadezhnosti stroitel'nykh konstruktsiy [Structural analysis and reliability specification]. Moscow: Stroyizdat, 1995. 352 p. (rus)
9. *Raizer V.D.* Optimizatsiya nadezhnosti konstruktsiy i bezopasnost cheloveka [Optimisation of structural reliability and human safety]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii*. 2009. No. 6. Pp. 54–58. (rus)
10. *Rzhanitsyn A.R.* Teoriya rascheta stroitel'nykh konstruktssii na nadezhnost' [The theory of structural reliability]. Moscow: Stroiizdat, 1978. 239 p. (rus)

Сведения об авторе

Герасимов Евгений Петрович, канд. техн. наук, доцент, Новосибирский государственный университет архитектуры, дизайна и искусств, 630099, г. Новосибирск, Красный проспект, 38, GerasimovEP@mail.ru

Author Details

Evgeniy P. Gerasimov, PhD, A/Professor, Kryachkov Novosibirsk State University of Architecture, Design and Arts, 38, Krasnyi Ave., 630099, Novosibirsk, Russia, GerasimovEP@mail.ru