

## Прогнозирование срока службы изгибаемых железобетонных конструкций на основе оценки надежности их технического состояния

*А.Г. Тамразян, Г.А. Садоян*

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет*

**Аннотация:** Железобетонные конструкции должны обладать достаточной надежностью на протяжении всего срока службы. В задачах, касающихся прогнозирования срока службы на основе оценки технического состояния, надежность можно рассматривать как вероятность безотказной работы конструкций, заключающаяся в способности выполнять требуемые функции в заданных условиях в течение расчетного срока эксплуатации. Одними из методов решения такого рода задач являются статистические методы.

**Ключевые слова:** железобетонная конструкция, изгибаемая конструкция, прогнозирование, срок службы, надежность, техническое состояние, деградационное воздействие.

В соответствии с российскими нормами рассматриваются пять категорий технических состояний: исправное состояние, работоспособное состояние, ограниченно работоспособное состояние, недопустимое состояние, аварийное состояние [1-3].

Согласно рекомендациям по оценке надежности строительных конструкций зданий и сооружений от ЦНИИПРОМЗДАНИЙ между категориями технического состояния и надежностью существует взаимосвязь, сведенная в таблицу 1.

Таблица 1

Категории технического состояния

Категория технического состояния	Вероятность безотказной работы	Вероятность отказа
Исправное состояние	1	0
Работоспособное состояние	0,95	0,05
Ограниченно работоспособное состояние	0,85	0,15
Недопустимое состояние	0,75	0,25
Аварийное состояние	0,65	0,35

Обозначим внешнее воздействие на изгибаемую конструкцию  $F$ , а несущую способность  $R$ . Предполагается оценка вероятности по частоте события  $F > R$  при большом количестве статистических испытаний по схеме Бернулли, когда на каждом испытании генерируются случайные количества реализации всех исходных величин [4-6]. Сначала выполняется расчет значений  $F$  и  $R$  и проверяется условие  $F > R$ . При выполнении условия, исходом испытания считается отказ. В данном методе частота  $\nu$  появления отказа рассматривается как оценка его вероятности и определяется следующей формулой:

$$\nu = \frac{k}{m} \approx P_f, \quad (1)$$

где  $\nu$  – частота появления отказа;  $k$  – число отказов;  $m$  – общее число испытаний;  $P_f$  – вероятность отказа.

В качестве изгибаемой конструкции будем рассматривать шарнирно-опертую железобетонную балку (рис.1). В качестве бетона балки используется бетон В25, рабочая (нижняя) арматуры балки представлена 4-мя стержнями А500С 20-го диаметра.

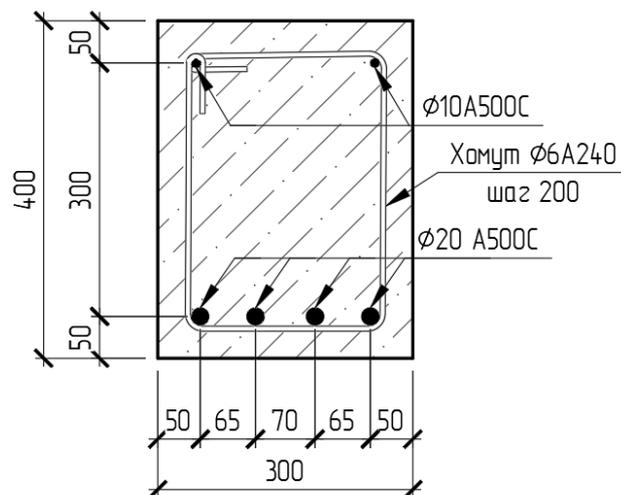


Рис. 1 – Сечение рассматриваемой балки

Несущую способность железобетонной балки будем определять согласно СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения» по следующей формуле:

$$R = M_u = R_b b x (h_0 - 0,5x) , \quad (2)$$

где  $M_u$  – максимальный момент, воспринимаемый сечением балки;  $R_b$  – сопротивление бетона сжатию;  $b$  – ширина сечения балки;  $x$  – высота сжатой зоны бетона, определяемая по формуле:

$$x = \frac{R_s A_s}{R_b b} , \quad (3)$$

где  $R_s$  – сопротивление арматуры растяжению;  $A_s$  – площадь армирования.

Далее определяем относительную высоту сжатой зоны бетона по формуле:

$$\xi = \frac{x}{h_0} , \quad (4)$$

где  $h_0$  – рабочая высота сечения, т.е. расстояние от сжатой грани элемента до центра тяжести растянутой продольной арматуры, определяемая по следующей формуле:

$$h_0 = h - a , \quad (5)$$

где  $h$  – высота сечения балки;  $a$  – расстояние от центра тяжести растянутой продольной арматуры до растянутой грани элемента.

Сравниваем данное значение с граничным значением сжатой зоны бетона, определяемой по формуле:

$$\xi_R = \frac{0,8}{1 + \frac{\varepsilon_{s,el}}{\varepsilon_{b2}}} , \quad (6)$$

где  $\varepsilon_{b2}$  – относительная деформация растянутой зоны бетона, принимаем 0,0035;  $\varepsilon_{s,el}$  – относительная деформация растянутой арматуры при напряжениях, равных  $R_s$ , определяемая по формуле:

$$\varepsilon_{s,el} = \frac{R_s}{E_s}, \quad (7)$$

где  $E_s$  – модуль упругости арматуры, принимаем 200000 МПа.

Примем варьируемыми параметрами  $R_b, R_s, b, h$ .

Согласно [4,5] среднее значение сопротивления бетона сжатию  $\overline{R_b}$  и стандартное отклонение сопротивления бетона сжатию  $s_{R_b}$  будут определяться по следующим формулам:

$$\overline{R_b} = \frac{R_b^n}{1,07(1 - 2v_m)} \quad (8)$$

$$s_{R_b} = \overline{R_b} v_m, \quad (9)$$

где  $R_b^n$  – нормативное значение сопротивления бетона сжатию в соответствии с СП 63.13330.2018, принимаем 18,5 МПа;  $v_m$  – коэффициент вариации.

Согласно [4,5] среднее значение сопротивления арматуры растяжению  $\overline{R_s}$  и стандартное отклонение сопротивления арматуры растяжению  $s_{R_s}$  будут определяться по следующим формулам:

$$\overline{R_s} = \frac{R_s^n}{1 - 1,64v_m} \quad (10)$$

$$s_{R_s} = \overline{R_s} v_m, \quad (11)$$

где  $R_s^n$  – нормативное значение сопротивления арматуры растяжению в соответствии с СП 63.13330.2018, принимаем 500 МПа.

Сведем в таблицу 2 основные характеристики балки, необходимые для проведения вероятностного расчета балки.

Таблица 2

Основные характеристики балки

Основные характеристики балки	Значения
Прочность сжатого бетона	$\bar{R}_b = 20,485 \text{ МПа}; s_{R_b} = 1,702 \text{ МПа}; v_m = 0,078$
Сопротивление арматуры растяжению	$\bar{R}_s = 598,086 \text{ МПа}; s_{R_s} = 59,809 \text{ МПа}; v_m = 0,100$
Ширина сечения балки	$\bar{b} = 300,31 \text{ мм}; s_b = 1,86 \text{ мм}; v_m = 0,0062$
Высота сечения балки	$\bar{h} = 400,12 \text{ мм}; s_h = 2,21 \text{ мм}; v_m = 0,0055$
Площадь растянутой арматуры	$A_s = 12,57 \text{ см}^2$
Расстояние от центра тяжести растянутой арматуры до нижней грани сечения балки	$a = 5 \text{ см}$
Расчетная длина балки	$l = 5,43 \text{ м}$
Ширина грузовой полосы	$B = 6 \text{ м}$

Для примера произведем расчет для одного случая. Сгенерируем случайные значения характеристик балки:

$$R_{b1} = 20,75 \text{ МПа}; R_{s1} = 586,04 \text{ МПа}; b_1 = 298,21 \text{ мм}; h_1 = 400,80 \text{ мм}$$

Высоту сжатой зоны бетона определим по формуле (3):

$$x = \frac{586040 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2} \times 0,00126 \text{ м}^2}{20750 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2} \times 0,2982 \text{ м}} = 0,1194 \text{ м} = 11,94 \text{ см}$$

Относительная высота сжатой зоны бетона согласно формуле (4) равна:

$$\xi = \frac{11,94 \text{ см}}{40,08 \text{ см} - 5 \text{ см}} = 0,340$$

В соответствии с формулой (5), граничное значение сжатой зоны бетона равно:

$$\xi_R = \frac{0,8}{1 + \frac{\left(\frac{586,04 \text{ МПа}}{2,0 \times 10^5 \text{ МПа}}\right)}{0,0035}} = 0,435$$

Т.к.  $\xi < \xi_R$  несущая способность балки согласно формуле (2) составит:

$$M_u = 20750 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2} \times 0,2982 \text{ м} \times 0,1194 \text{ м} \times (0,4008 \text{ м} - 0,0500 \text{ м} - 0,5 \times 0,1194 \text{ м}) = 215,07 \text{ кН} \times \text{м}$$

Выполним аналогичные операции для 100, 1000, 5000, 10000 случайных величин. На рис. 2 представлены результаты вычислений.

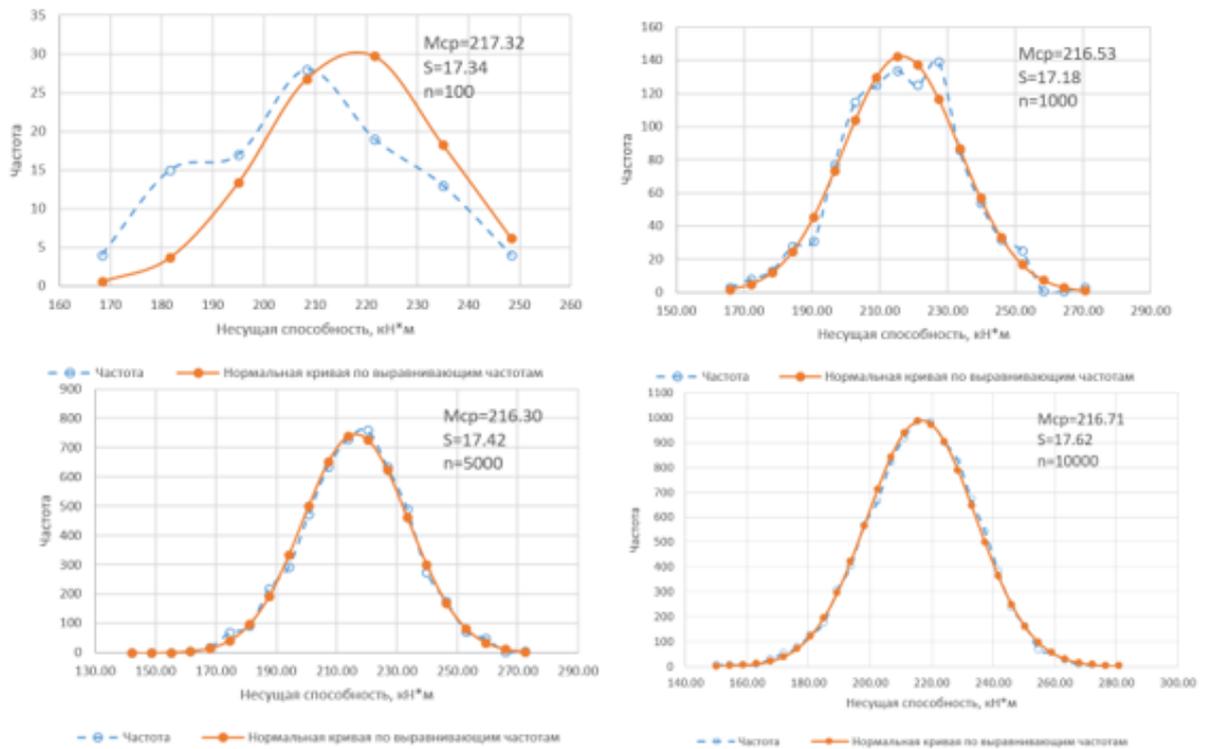


Рис. 2 – Несущая способность балки при количествах испытаний 100, 1000, 5000, 10000

Чем больше количество произведенных испытаний, тем выше точность полученных результатов [6-7]. Как видно из рис. 2, при  $m \rightarrow \infty$  растет достоверность испытаний и несущая способность балки стремится к

нормальному распределению [8]. В дальнейшем примем количество испытаний  $m=1000000$ .

На балку будут действовать следующие нагрузки, сведенные в таблицу 3.

Таблица 3

Нагрузки, действующие на балку

Название нагрузки	Вид воздействия	Закон распределения	Значение
Собственный вес балки	Постоянная	Нормальный	$\bar{g} = 24,525 \text{кН} / \text{м}^3$ ; $s_g = 2,453 \text{кН} / \text{м}^3$
Вес пола	Постоянная	Нормальный	$\bar{q} = 4,040 \text{кН} / \text{м}^2$ ; $s_q = 0,308 \text{кН} / \text{м}^2$
Вес от перегородок	Длительная	Нормальный	$\bar{q} = 0,5 \text{кН} / \text{м}^2$ ; $s_q = 0,1 \text{кН} / \text{м}^2$
Полезная нагрузка	Кратковременная	Нормальный	$\bar{q} = 0,803 \text{кН} / \text{м}^2$ ; $s_q = 0,218 \text{кН} / \text{м}^2$

Сгенерируем случайные значения нагрузок, действующих на балку: собственный вес балки  $g_1 = 26,98 \text{кН} / \text{м}^3$ ; вес пола  $q_1 = 4,21 \text{кН} / \text{м}^2$ ; вес перегородок  $q_1 = 0,61 \text{кН} / \text{м}^2$ ; полезная нагрузка  $q_1 = 1,05 \text{кН} / \text{м}^2$ .

Внешний момент, действующий на балку, будем определять по следующей формуле:

$$F = M = \frac{q_n l^2}{8}, \quad (12)$$

где  $q_n$  – погонная нагрузка, действующая на балку.

Погонная нагрузка от собственного веса балки равна:

$$q_n = 26,98 \frac{\text{кН}}{\text{м}^3} \times 0,298 \text{м} \times 0,401 \text{м} = 3,22 \frac{\text{кН}}{\text{м}}$$

Погонная нагрузка веса пола равна:

$$q_n = 4,21 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2} \times 6 \text{ м} = 25,26 \frac{\text{кН}}{\text{м}}$$

Погонная нагрузка от веса перегородок равна:

$$q_n = 0,61 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2} \times 6 \text{ м} = 3,66 \frac{\text{кН}}{\text{м}}$$

Погонная нагрузка от полезной нагрузки равна:

$$q_n = 1,05 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2} \times 6 \text{ м} = 6,30 \frac{\text{кН}}{\text{м}}$$

Суммарная линейная нагрузка, действующая на балку равна:

$$\sum q_n = 38,44 \text{ кН} / \text{ м}.$$

Тогда, в соответствии с формулой (11), внешний момент, действующий на балку, равен:

$$M = \frac{38,44 \frac{\text{кН}}{\text{м}} \times 5,43^2 \text{ м}^2}{8} = 141,68 \text{ кН} \times \text{ м}$$

Сравнив значение внешнего воздействия с несущей способностью балки  $M = 141,68 \text{ кН} \times \text{ м} < M_u = 215,07 \text{ кН} \times \text{ м}$  получаем, что несущая способность балки обеспечена.

При принятом количестве испытаний  $m=1000000$  вероятность безотказной работы составляет  $P_f = 0,999988$ .

Предположим, что на рассматриваемую балку действует деградационное воздействие [8-10] по следующей схеме (рис.3).

До деградационного воздействия для изгибаемой балки можно записать два уравнения равновесия:

$$M_{u0} = R_b b x_0 (h_0 - 0,5 x_0) \quad (12)$$

$$R_b b x_0 = R_s A_s \quad (13)$$

Так как  $R_b b x_0 = R_s A_s$ , то обозначив  $\xi_0 = x_0 / h_0$ , получим  $\xi_0 = \mu (R_s / R_b)$ , где  $\mu = A_s / (b h_0)$ .

Тогда формула (12) примет следующий вид:

$$M_{u0} = \xi_0 (1 - 0,5 \xi_0) R_b b h_0^2 \quad (14)$$

Для второго случая, когда деградационное воздействие не равно нулю (рис. 3) уравнения равновесия примут следующий вид:

$$M_{u1} = R_b b (x_1 - x_{11}) [h_0 - 0,5(x_1 - x_{11}) - x_{11}] \quad (15)$$

$$R_b b (x_1 - x_{11}) = R_s A_s, \quad (16)$$

где  $x_{11}$  – глубина проникновения деградационного воздействия.

Пусть  $\xi_1 = x_1 / h_0$ ;  $\xi_{11} = x_{11} / h_0$ ;  $\xi_0 = \mu (R_s / R_b)$ , тогда  $\xi_0 = \xi_1 - \xi_{11}$ .

Тогда соотношение предельных моментов, воспринимаемых сечением до и после деградационного процесса можно определить следующей формулой:

$$M_{u1} = M_{u0} \left( 1 - \frac{\xi_{11}}{1 - 0,5 \xi_0} \right) \quad (17)$$

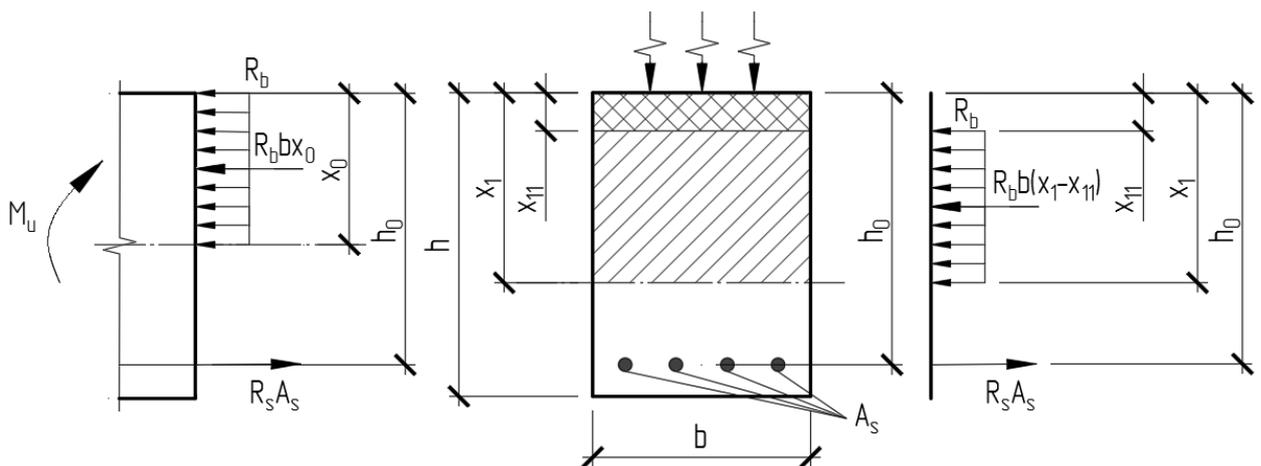


Рис. 3 – Схема деградационного воздействия для расчета изгибаемого элемента

Пусть  $x_{11} = z$ . Тогда в соответствии с [8] глубина проникновения деградационного воздействия в сжатую зону бетона может определяться следующей формулой:

$$z = 0,1\sqrt{Dt} , \quad (18)$$

где  $D$  – коэффициент скорости продвижения зоны разрушения в объем материала, величина которого зависит от вида среды и уровня напряжений, определяется опытным путем;  $t$  – время с момента начала деградационного воздействия.

В дальнейших расчетах принимается  $D = 1 \times 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{час} = 87,6 \text{ см}^2 / \text{год}$ .

Вычислим глубину проникновения деградационного воздействия в сжатую зону сечения балки спустя 10 лет:

$$z = 0,1 \times \sqrt{87,6 \times 10} = 2,96 \text{ см}$$

Аналогичным образом высчитываются остальные значения. На рис. 4 представлена зависимость  $z$  от времени  $t$ .

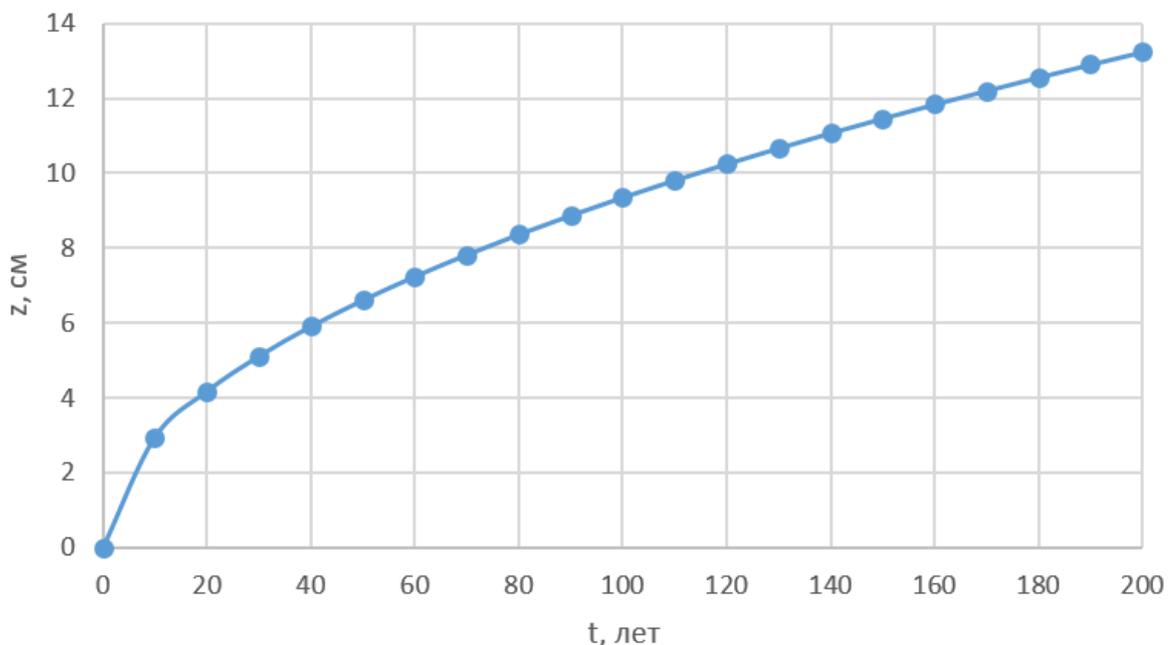


Рис. 4 – График зависимости глубины проникновения деградационного воздействия  $z$  от времени  $t$

Далее по полученному графику (рис.4), для принятых случайных характеристик балки, построим график зависимости соотношения предельных моментов, воспринимаемых сечением от времени (рис.5).

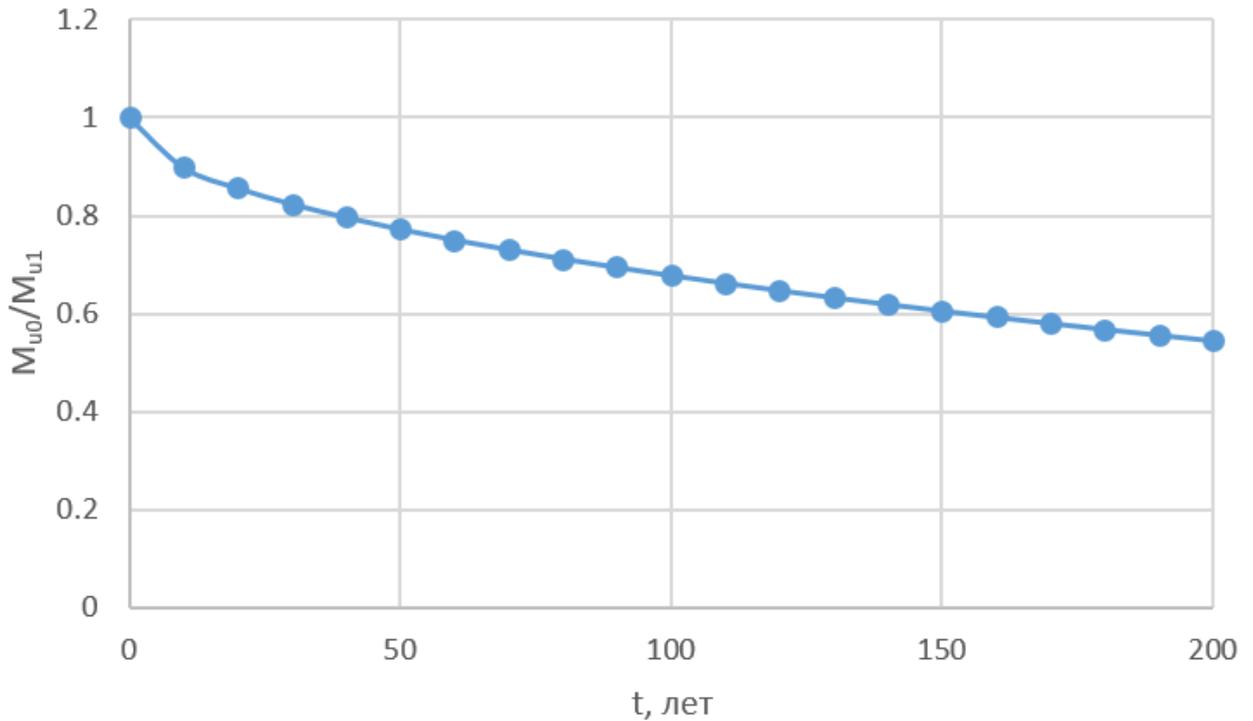


Рис. 5 – График зависимости соотношения предельных моментов  $M_{u0} / M_{u1}$ , воспринимаемых сечением от времени  $t$

В дальнейшем, вычисляется надежность во времени с учетом проникновения деградационного воздействия в сжатую зону бетона. Аналогичные вычисления выполняются для 1000000 испытаний. Все вычисления производятся с использованием программного комплекса «Microsoft Excel». Граничные (переходные) значения между категориями технического состояния определяются в соответствии с таблицей 1.

По полученным результатам построим график зависимости надежности от времени, обозначив границы категорий технического состояния (рис.6).

По полученному графику (рис.6) можно сделать следующий вывод: рассматриваемая балка сохранит исправное состояние в течение 81,05 лет.

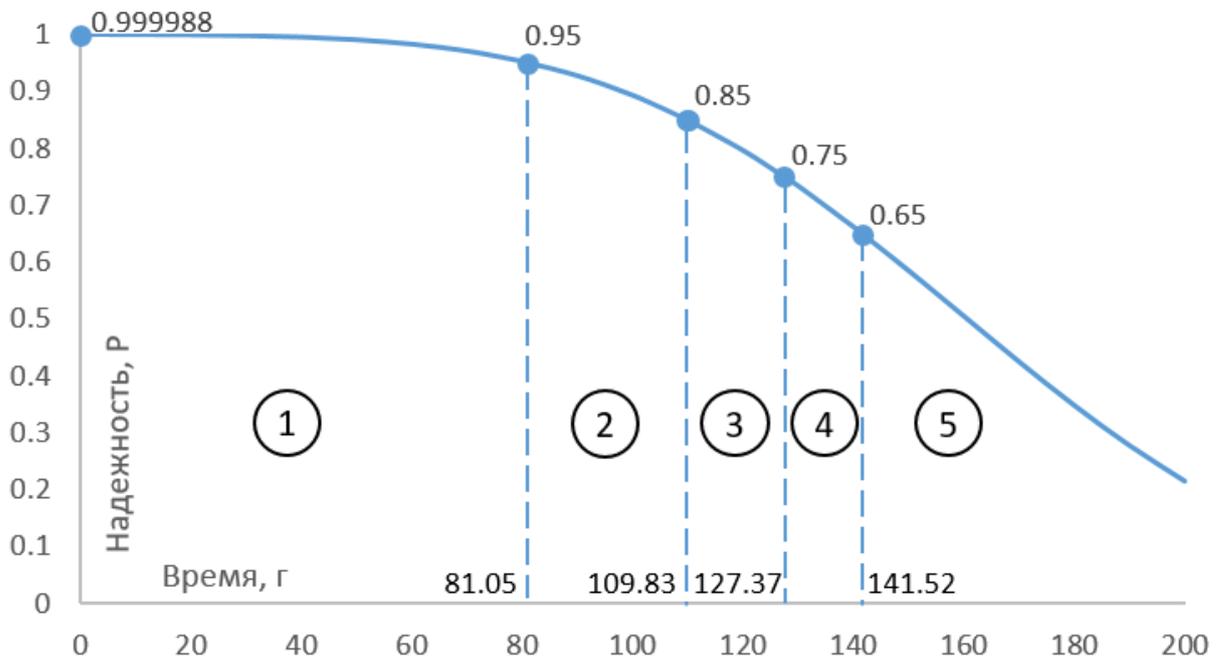


Рис. 6 – График изменения надежности во времени

На рисунке 6 приняты следующие обозначения: 1 – исправное состояние; 2 – работоспособное состояние, 3-ограниченно работоспособное состояние, 4 – недопустимое состояние, 5 – аварийное состояние.

### Литература

1. Соколов В. А. Методология оценки технического состояния и надежности эксплуатируемых зданий на основе вероятностного аппарата технической диагностики: дисс. ... док. техн. наук: 05.23.01. Санкт – Петербург: 2017. С. 78-80.

2. Соколов В.А. Категории технического состояния строительных конструкций зданий при их диагностике вероятностными методами // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 6-6. – С. 1159-1164; URL: [fundamental-research.ru/ru/article/view?id=34305](http://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=34305) (дата обращения 02/05/2024).

3. Тупицына Д. С., Байбурин А. Х. Анализ оценки категорий технического состояния строительных конструкций // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2021. № 1. – С. 75-84.

4. Райзер В. Д. Расчет и нормирование надежности строительных конструкций. Москва.: Стройиздат, 1995. 348 с.
5. Мкртычев, О. В., Райзер. В.Д. Теория надежности в проектировании строительных конструкций. Москва: Издательство АСВ, 2016. 908 с.
6. Тамразян А.Г., Мацеевич Т.А. Анализ надежности железобетонной плиты с корродированной арматурой // Строительство и реконструкция. 2022. № 1. С. 89-98.
7. Тамразян А.Г. Методология анализа и оценки надежности состояния и прогнозирование срока службы железобетонных конструкций // Железобетонные конструкции. 2023. № 1. С. 5-18.
8. Сорокин Е. В. Расчет и прогнозирование долговечности железобетонных конструкций: дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Саранск: 2014. С. 77-89.
9. Frederiksen J.M., Mejlbro L., Poulsen E. The HETEK model of chloride ingress into concrete made simpler by approximations // In Proceedings of 2nd International RILEM Workshop on Testing on Modelling the Chloride Ingress into Concrete, Paris: 2000. pp. 317-336.
10. Ciampoli M. et al. Probability-based durability design of reinforced concrete structures: In Proceedings of First International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management. Barcelona: 2002. pp. 211-215.

### References

1. Sokolov V. A. Metodologiya ocenki texnicheskogo sostoyaniya i nadezhnosti e`kspluatiruemy`x zdaniy na osnove veroyatnostnogo apparata texnicheskoy diagnostiki [Methodology for assessing the technical condition and reliability of existing buildings based on probabilistic technical equipment]: diss. ... dok. texn. nauk: 05.23.01. Sankt – Peterburg: 2017. pp 78-80.
2. Kategorii texnicheskogo sostoyaniya stroitel`ny`x konstrukcij zdaniy pri ix diagnostike veroyatnostny`mi metodami [Categories of technical condition of

building structures during their diagnostics using probabilistic methods] URL: [fundamental-research.ru/ru/article/view?id=34305](http://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=34305) (accessed 02/05/2024).

3. Tupitsyna D. S., Bayburin A. Kh. Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura. 2021. № 1. pp. 75-84.

4. Rajzer V. D. Raschet i normirovanie nadezhnosti stroitel'ny`x konstrukcij [Calculation and rationing of reliability of building structures]. Moskva: Stroyizdat, 1995. 348 p.

5. Mkrty`chev, O. V., Rajzer. V.D. Teoriya nadezhnosti v proektirovanii stroitel'ny`x konstrukcij [The theory of reliability in the design of building structures]. Moskva: Izdatel'stvo ASV, 2016. 908 p.

6. Tamrazyan A.G., Maceevich T.A. Stroitel'stvo i rekonstrukciya. 2022. № 1. pp. 89-98.

7. Tamrazyan A.G. Zhelezobetonny`e konstrukcii. 2023. № 1. pp. 5-18.

8. Sorokin E. V. Raschet i prognozirovanie dolgovechnosti zhelezobetonny`x konstrukcij [Calculation and forecasting of the durability of reinforced concrete structures]: diss. ... kand. texn. nauk: 05.23.01. Saransk: 2014. pp 77-89.

9. Frederiksen J.M., Mejlbro L., Poulsen E. Proceedings of 2nd International RILEM Workshop on Testing on Modelling the Chloride Ingress into Concrete, Paris: 2000. pp. 317-336.

10. Ciampoli M. et al. Probability-based durability design of reinforced concrete structures: In Proceedings of First International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management. Barcelona: 2002. pp. 211-215.

**Дата поступления: 4.04.2024**

**Дата публикации: 28.05.2024**