

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ВОЗВЕДЕННЫХ МОНОЛИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПО ИЗМЕНЕНИЮ ИНДЕКСА НАДЕЖНОСТИ И СРОКА БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

С.В. Никоноров

METHOD OF QUALITY EVALUATION OF ERECTED MONOLITH CONSTRUCTIONS BY CHANGES OF RELIABILITY INDEX AND SAFE OPERATION LIFE

S.V. Nikonorov

Представленная методика позволяет определить влияния отклонений параметров монолитных конструкций, полученных в результате статистического контроля качества, на их показатели надежности, такие как изменения индекса надежности и срока безопасной эксплуатации.

Ключевые слова: монолитные конструкции, несущая способность, надежность, срок безопасной эксплуатации, результаты оценки.

The suggested method allows identifying the effects of parameter divergence of monolith constructions, acquired as the result of statistical quality control, upon their reliability indices, such as the change of reliability index and safe operation life.

Keywords: monolith constructions, carrying capacity, reliability, safe operation life, evaluation results.

В инженерной практике наиболее часто используется модель расчета надежности строительных конструкций по несущей способности конструкции, нагрузке, воспринимаемой конструкцией, и их стандартным отклонениям. Среди многочисленных параметров, определяющих несущую способность по прочности монолитных бетонных и железобетонных конструкций, можно выделить группу параметров, которые одновременно контролируются при возведении монолитных зданий по СНиП 3.03.01-87 «Несущие и ограждающие конструкции» и входят в состав расчетных формул СНиП 2.03.01-84* «Бетонные и железобетонные конструкции». В число этих параметров входят: прочность бетона R_b ; размер поперечного сечения b и h ; площадь сечения арматуры A_s ; прочность рабочей арматуры R_s ; величина защитного слоя a . Перечисленные параметры, согласно результатам исследования качества возводимых монолитных конструкций, имеют нормальное распределение случайных значений.

Для оценки качества возведенной конструкции по надежности мною назначен коэффициент изменения индекса надежности K_z :

$$K_z = \frac{Z_\phi}{Z_{np}}, \quad (1)$$

где Z_ϕ - фактическое значение индекса надежности конструкции; Z_{np} - проектное значение индекса надежности конструкции.

Индекс надежности конструкции по методу «двух моментов» [1] равен

$$Z = \frac{\bar{R} - \bar{F}}{\sqrt{S_R^2 + S_F^2}}, \quad (2)$$

где \bar{R} - среднее значение несущей способности по прочности конструкции, для определения которой используются средними значениями сопротивления материалов; \bar{F} - нагрузка на конструкцию, в качестве которой можно рассматривать несущую способность конструкции, при расчетных значениях сопротивления материалов; S_R - стандартное отклонение прочности конструкции; S_F - стандартное отклонение нагрузки на конструкцию.

В предлагаемой методике нагрузка детерминируется, так как в гражданских зданиях она имеет небольшую вариацию, и значение нагрузки принимается с учетом коэффициентов надежности. Исходя из этого, допустим $S_F=0$.

Следовательно, индекс надежности будет равен

$$Z = \frac{\bar{R} - F}{S_R}. \quad (3)$$

Для определения проектного индекса надежности используют проектные значения параметров и их проектные стандартные отклонения. Для определения фактического индекса надежности используют фактические значения параметров и их стандартные отклонения.

Для определения среднего значения несущей способности по прочности монолитной конструкции \bar{R} будем принимать средние значения параметров, определяющих прочность конструкции.

Стандартное отклонение несущей способности по прочности конструкции зависит от стандартных отклонений параметров:

$$S_R = \sqrt{\sum_{i=1}^n (k_i S_i)^2}, \quad (4)$$

где n - количество параметров; k_i - коэффициент влияния i -го параметра на прочность монолитной конструкции:

$$k_i = \frac{\partial R}{\partial x_i}, \quad (5)$$

где x_i - i -й параметр, определяющий прочность конструкции.

Учитывая, что при небольших изменениях параметров, зависимости между ними и несущей способности по прочности конструкции можно считать линейными, коэффициент влияния будет равен

$$k_i = \frac{\Delta R}{\Delta x_i} = \frac{\bar{R} - R_i}{\bar{x}_i - (\bar{x}_i - S_i)} = \frac{\bar{R} - R_i}{S_i}, \quad (6)$$

где \bar{R} - средняя несущая способность по прочности монолитной конструкции, определяемая средними значениями параметром монолитной конструкции; R_i - несущей способности по прочности монолитной конструкции, определяемая с i -м параметром, уменьшенным на его стандартное отклонение ($\bar{x}_i - S_i$); \bar{x}_i - среднее значение i -го параметра; S_i - стандартное отклонение i -го параметра.

Подставляя выражение (6) в выражение (4), получаем стандартное отклонение несущей способности по прочности конструкции равно

$$S_R = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\bar{R} - R_i)^2}. \quad (7)$$

Для определения несущей способности по прочности конструкции используются формулы из расчета по первому предельному состоянию в соответствии с требованиями СНиП 2.03.01-84*.

Алгоритм оценки возведенной монолитной конструкции по коэффициенту изменения индекса надежности

1. Определяется нагрузка на конструкцию F . Нагрузка принимается равной несущей способности по прочности конструкции, рассчитанной с нормативными значениями прочности материалов.

2. Определяется проектное значение несущей способности по прочности конструкции $R_{пр}$. Проектное значение несущей способности по прочности конструкции равна несущей способности по прочности конструкции, рассчитанной со средними значениями сопротивления материалов и с проектными значениями геометрических параметров.

3. Определяются стандартное проектное откло-

нение несущей способности по прочности конструкции по формуле (7).

4. Определяется проектное значение индекса надежности по формуле (3).

5. Определяется фактическое значение несущей способности по прочности конструкции $R_{ф}$. Фактическая прочность несущей способности по прочности конструкции равна несущей способности по прочности конструкции, рассчитанной с фактическими средними значениями параметров, определяющими несущей способности по прочности конструкции.

6. Определяется стандартное фактическое отклонение несущей способности по прочности конструкции по формуле (7).

7. Определяется фактическое значение индекса надежности по формуле (3).

8. Определяется коэффициент изменения индекса надежности по формуле (1).

В предложенной методике оценки надежности, основанной на методе «двух моментов», автором разработана формула (7) для определения стандартного отклонения несущей способности по прочности конструкции. Для проверки предложенной методики был использован метод Монте-Карло [2], основанный на генерации случайных, нормально распределенных чисел, которые определяют значения параметров в соответствии с их стандартным отклонением. На их основе вычислялись случайные значения прочности конструкции. Далее по полученным значениям находилось среднее значение прочности монолитной конструкции и его стандартное отклонение. Для выполнения численных экспериментов авторами была разработана программа на языке «BASIC».

По результатам статистических данных контроля качества возведения монолитных конструкций [3] проведена оценка надежности по изменению индекса надежности. Расчет проводился по изложенной выше методике и методике статистических испытаний (число испытаний 10 000). Результаты расчетов представлены в таблице.

Результаты расчетов по указанным методикам показывают высокую степень корреляции, поэтому можно сделать вывод о том, что методика, изложенная в статье, может быть применима для оценки надежности возведенных монолитных конструкций.

Оценка срока безопасной эксплуатации возведенных монолитных конструкций

Срок эксплуатации конструкции зависит от достигнутого уровня мгновенной безотказности возведенной конструкции, интенсивности износа конструкции и предельно допустимого уровня надежности конструкции.

В разрабатываемой методике под сроком безопасной эксплуатации конструкции подразумевается период времени между моментом возведения конструкции и моментом необходимости проведения капитального ремонта конструкции, то есть первый «жизненный цикл» конструкции.

Результаты оценки возведенных монолитных конструкций по изменению индекса надежности и сроку безопасной эксплуатации конструкций

Конструкция	№	F	R_{np}	S_{np}	Z_{np}	R_{ϕ}	S_{ϕ}	Z_{ϕ}	K_Z	T_{ϕ}
Перекрытие	1	69,48	$\frac{114,6}{114,5}$	$\frac{8,75}{8,62}$	$\frac{5,159}{5,223}$	$\frac{121,0}{121,0}$	$\frac{9,64}{9,51}$	$\frac{5,350}{5,426}$	$\frac{1,037}{1,039}$	56
	2	60,40	$\frac{99,34}{99,26}$	$\frac{7,76}{7,66}$	$\frac{5,018}{5,081}$	$\frac{104,8}{104,9}$	$\frac{9,13}{9,04}$	$\frac{4,872}{4,927}$	$\frac{0,971}{0,970}$	45
	3	52,02	$\frac{85,33}{85,30}$	$\frac{6,57}{6,49}$	$\frac{5,071}{5,132}$	$\frac{86,16}{86,21}$	$\frac{7,00}{6,92}$	$\frac{4,878}{4,940}$	$\frac{0,962}{0,963}$	44
	4	69,48	$\frac{114,6}{114,5}$	$\frac{8,75}{8,62}$	$\frac{5,159}{5,223}$	$\frac{116,8}{116,9}$	$\frac{9,25}{9,15}$	$\frac{5,118}{5,182}$	$\frac{0,992}{0,992}$	49
	5	14,35	$\frac{23,50}{23,52}$	$\frac{2,26}{2,22}$	$\frac{4,050}{4,137}$	$\frac{24,29}{24,30}$	$\frac{2,49}{2,47}$	$\frac{3,993}{4,020}$	$\frac{0,986}{0,972}$	48
	6	24,59	$\frac{40,71}{40,71}$	$\frac{3,43}{3,36}$	$\frac{4,704}{4,803}$	$\frac{40,98}{40,99}$	$\frac{3,46}{3,40}$	$\frac{4,732}{4,831}$	$\frac{1,006}{1,006}$	51
	9	69,48	$\frac{114,6}{114,5}$	$\frac{8,75}{8,62}$	$\frac{5,159}{5,223}$	$\frac{116,2}{116,1}$	$\frac{8,76}{8,60}$	$\frac{5,326}{5,418}$	$\frac{1,032}{1,037}$	55
Колонна	1	3,540	$\frac{7,673}{7,684}$	$\frac{0,947}{0,937}$	$\frac{4,361}{4,423}$	$\frac{8,881}{8,895}$	$\frac{1,220}{1,203}$	$\frac{4,377}{4,452}$	$\frac{1,004}{1,007}$	51
	2	3,254	$\frac{7,131}{7,120}$	$\frac{0,870}{0,859}$	$\frac{4,455}{4,500}$	$\frac{7,320}{7,317}$	$\frac{0,742}{0,726}$	$\frac{5,480}{5,593}$	$\frac{1,230}{1,243}$	88
	4	3,326	$\frac{7,321}{7,321}$	$\frac{0,945}{0,939}$	$\frac{4,230}{4,279}$	$\frac{7,780}{7,798}$	$\frac{0,820}{0,829}$	$\frac{5,427}{5,390}$	$\frac{1,283}{1,254}$	97
	7	4,780	$\frac{10,19}{10,17}$	$\frac{1,135}{1,124}$	$\frac{4,764}{4,794}$	$\frac{10,41}{10,43}$	$\frac{1,061}{1,051}$	$\frac{5,307}{5,374}$	$\frac{1,114}{1,121}$	69
Диафрагма	2	2,314	$\frac{4,983}{4,976}$	$\frac{0,650}{0,653}$	$\frac{4,108}{4,076}$	$\frac{5,743}{5,744}$	$\frac{0,726}{0,740}$	$\frac{4,721}{4,637}$	$\frac{1,149}{1,138}$	75
Стена	5	1,21	$\frac{2,517}{2,502}$	$\frac{0,451}{0,446}$	$\frac{2,896}{2,896}$	$\frac{2,713}{2,732}$	$\frac{0,418}{0,440}$	$\frac{3,591}{3,456}$	$\frac{1,240}{1,193}$	90
	6	1,21	$\frac{2,517}{2,502}$	$\frac{0,451}{0,446}$	$\frac{2,896}{2,896}$	$\frac{2,930}{2,835}$	$\frac{0,608}{0,525}$	$\frac{2,825}{3,095}$	$\frac{0,975}{1,069}$	46

Примечания:

1. № - номер здания; F - нагрузка на конструкцию; R_{np} и K_{ϕ} - соответственно проектная и фактическая прочность конструкции; S_{np} и S_{ϕ} - соответственно проектное и фактическое стандартное отклонение прочности конструкции (для перекрытий в кНм, для колонн и стен в МН); Z_{np} и Z_{ϕ} - соответственно проектный и фактический индекс надежности конструкции; K_Z - коэффициент изменения индекса надежности; T_{ϕ} - значение фактического срока безопасной эксплуатации конструкции, год (проектный срок эксплуатации конструкции равен 50 годам).

2. Данные в числителе - результаты расчета по разработанной автором методике, в знаменателе - результаты расчета по методике статистических испытаний.

3. 1-е, 2-е и 4-е здания - монолитные гражданские здания с каркасной несущей системой; 5-е и 6-е здания - монолитные гражданские здания со стеновой несущей системой; 3-е здание - гражданское здание на металлическом каркасе с монолитными перекрытиями; 7-е и 9-е - сборно-монолитные гражданские здания с каркасной несущей системой.

По различным источникам [4, 5] долговечность монолитных железобетонных конструкций равна 100-200 лет, но за этот период времени проводят 2-3 капитальных ремонта конструкций. Исходя из этого, периодичность капитальных ремонтов в среднем равна 40-60 лет. Поэтому проектный срок эксплуатации монолитных конструкций примем равным 50 лет.

Изменение прочности конструкции во времени подчиняется экспоненциальному закону [6] и значение прочности конструкции во времени равно

$$R(t) = R_0 \cdot \exp(-\lambda t), \quad (8)$$

где R_0 - прочность возведенной конструкции, λ - суммарный коэффициент, характеризующий относительную скорость потери прочности конструкции в результате коррозии, старения и т.п., t - момент времени, год.

В исследованиях А.Г. Тамаразяна [7] установлено, что для железобетонных конструкций суммарный коэффициент, характеризующий относительную скорость потери прочности конструкции λ равен 0,0053. Поэтому потеря несущей способности по прочности конструкции к 50 годам составляет 23 %, а наступление предельного состоя-

ния происходит за 130 лет, так как в нормах проектировании железобетонных конструкций заложенный запас прочности конструкции в среднем равен 2 (см. таблицу).

Индекс надежности конструкции зависит от ее несущей способности по прочности, в соответствии с этим индекс надежности во времени тоже будет снижаться. В связи с этим подставляем выражение (8) в формулу (3) и, учитывая, что $S_R = V_R R$, где V_R - вариация прочности конструкции, получаем следующее выражение:

$$Z(t) = \frac{R_0 \cdot \exp(-\lambda t) - F}{V_R R_0 \cdot \exp(-\lambda t)}, \quad (9)$$

где $Z(t)$ - индекс надежности конструкции в момент времени t .

Исходя из того, что средняя вариация несущей способности по прочности монолитных железобетонных конструкций гражданских зданий равна 12 % (из анализа данных таблицы), а запас прочности конструкции равен 2 (из анализа данных табл.), при $\lambda = 0,0053$ (из исследований А.Г. Тамаразяна [7]), формула (9) примет следующий вид:

$$Z(t) = 8,333 - 4,167 \cdot \exp(-0,0053t). \quad (10)$$

Данная зависимость практически линейна, поэтому рост вероятности отказа во времени подчиняется функции нормального закона, так как индекс надежности конструкции является аргументом функции нормального распределения. Также Г. Шпете отмечает, что вероятность отказа во времени распределена по нормальному закону [2].

Изменение индекса надежности за первые 50 лет эксплуатации составляет 0,70.

На рисунке представлены графики роста вероятности отказа и плотности распределения отказа конструкции во времени и показаны временные отрезки проектной и фактической продолжительности эксплуатации конструкции.

Согласно рисунку через индексы надежности конструкции Z и стандартное отклонение долговечности конструкции S , выразим фактическую и нормативную продолжительность эксплуатации конструкции:

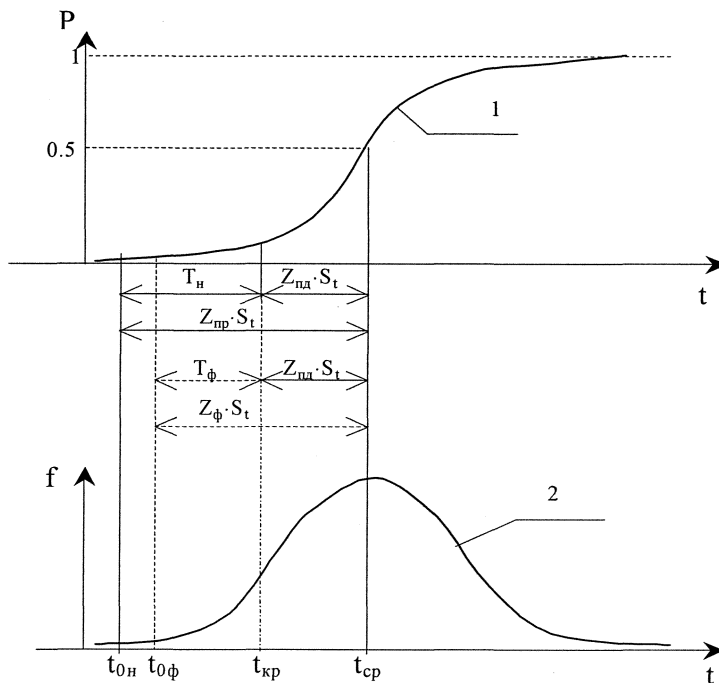
$$T_n = Z_{np} S_t - Z_{нд} S_t, \quad (11)$$

$$T_\phi = Z_\phi S_t - Z_{нд} S_t, \quad (12)$$

где T_n - нормативная продолжительность эксплуатации конструкции, год; T_ϕ - фактическая продолжительность эксплуатации конструкции, год; Z_{np} - проектный индекс надежности конструкции; Z_ϕ - фактический индекс надежности конструкции; $Z_{нд}$ - предельно допустимый индекс надежности конструкции, то есть когда вероятность отказа конструкции становится неприемлемой.

Введем коэффициент изменения продолжительности эксплуатации конструкции K_t , который равен

$$K_t = \frac{T_\phi}{T_n} = \frac{Z_\phi S_t - Z_{нд} S_t}{Z_{np} S_t - Z_{нд} S_t} = \frac{Z_\phi - Z_{нд}}{Z_{np} - Z_{нд}} = \frac{\frac{Z_\phi}{Z_{np}} - \frac{Z_{нд}}{Z_{np}}}{1 - \frac{Z_{кр}}{Z_{np}}}. \quad (13)$$



Зависимость вероятности отказа от времени:

1 – функция нормального распределения отказов конструкции во времени; 2 – плотность нормального распределения отказов конструкции во времени. $t_{0н}$ – начальный момент эксплуатации конструкции при проектном индексе надежности; $t_{0ф}$ – начальный момент эксплуатации конструкции при фактическом индексе надежности; $t_{кр}$ – момент эксплуатации конструкции при предельно допустимом индексе надежности; $t_{ср}$ – момент эксплуатации конструкции равный средней долговечности конструкции

Введем коэффициент предельно допустимого снижения индекса надежности конструкции $K_z^{пл}$, который равен

$$K_z^{пл} = \frac{Z_{пл}}{Z_n}. \quad (14)$$

Подставляя (1) и (14) в формулу (13) получаем:

$$K_t = \frac{K_z - K_z^{пл}}{1 - K_z^{пл}}. \quad (15)$$

Фактическая продолжительность эксплуатации конструкции T_ϕ будет равна:

$$T_\phi = T_n \frac{K_z - K_z^{пл}}{1 - K_z^{пл}}. \quad (16)$$

Учитывая, что проектный срок эксплуатации конструкции равен 50 годам, а предельно допустимое значение изменения индекса надежности равно 0,70, выражение (16) примет следующий вид:

$$T_\phi = 166,7K_z - 116,7.$$

На основании полученной формулы (17) можно определить фактический срок безопасной эксплуатации для массовых монолитных конструкций гражданских зданий на основании изменения индекса надежности.

По результатам оценки надежности по изменению индекса надежности проведена оценка срока безопасной эксплуатации монолитных конструкций. Результаты расчетов представлены в таблице.

Оценку срока безопасной эксплуатации монолитного здания в целом необходимо проводить по

конструкции с минимальным сроком безопасной эксплуатации.

Литература

1. Ржаницын, А. Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность / А.Р. Ржаницын. — М.: Стройиздат, 1978. — 239 с.
2. Шпете, Г. Надежность несущих строительных конструкций / Г. Шпете; пер. с нем. О.О. Андреева. - М ; Стройиздат, 1994. - 288 с.
3. Байбурин, А.Х. Оценка качества строительства монолитных зданий / А.Х. Байбурин, С.В. Никоноров // Известия вузов. Строительство. - 2002. - №9. - С 129-132.
4. Мельчаков, А.П. Квалиметрия при оценке технического состояния объектов строительства / А.П. Мельчаков // Предотвращение аварий зданий и сооружений: межвуз. сб. тр. — Магнитогорск, МГТУ, 2002. - Вып. 2. - С 96-100.
5. Руководство по определению экономической эффективности повышения качества и долговечности строительных конструкций / НИИЖБ Госстроя СССР. - М.: Стройиздат, 1981. - 56 с.
6. Рахимо, Р.З. Долговечность строительных материалов/Р.З. Рахимо. -Казань: КХТИ, 1988. - 82 с.
7. Тамразян, А.Г. Определение рационального уровня усиления железобетонных конструкций / А.Г. Тамразян // Предотвращение аварий зданий и сооружений: межвуз. сб. тр. — Магнитогорск, МГТУ, 2002. - Вып. 2. - С. 123-129.

Поступила в редакцию 10 июня 2009 г.