

УДК 69.059.4.003

В. Н. ЛЕВЧЕНКО, Д. В. ЛЕВЧЕНКО, В. Ф. КИРИЧЕНКО, А. Ю. ИВАНОВ, Е. А. КОВАЛЕВА

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры

НАЧАЛЬНАЯ БЕЗОТКАЗНОСТЬ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Оценка надежности строительных конструкций – сложная комплексная задача, которая должна решаться с учетом затрат, направленных на обеспечение требуемых показателей качества в процессе проектирования, возведения и эксплуатации зданий и сооружений. Явление, после которого наступает одно из недопустимых предельных состояний в строительных конструкциях, называется отказом. Антиподом надежности является ненадежность, которая оценивается вероятностью возникновения отказов в течение заданного промежутка времени эксплуатации конструкции или отдельных ее частей. Нарушение начальной безотказности сопровождается внезапными отказами или авариями. В статье приводятся пути получения равнонадежных конструкций при их проектировании. Приведены необходимые теоретические предпосылки и практические рекомендации, на основании которых могут быть сделаны важные шаги на пути коренного улучшения качества строительства.

надежность, эффективность, безотказность, вероятностная оценка, сопряжения элементов, долговечность

При проектировании строительных конструкций следует стремиться к обеспечению их равнонадежности, т. е. к созданию условий, при которых надежность отдельных элементов и узлов их сопряжений оценивалась бы приблизительно равными количественными характеристиками.

Конструкции, которые отказывают при разрушении одного из составляющих их элементов, могут быть отнесены к категории простых систем. Конструкции, отказывающие в случае выхода из строя двух или более элементов, относятся к сложным системам. И в том и в другом случае вероятность отказа, или начальная безотказность конструкции, может быть оценена вероятностными методами.

Начальная безотказность простой системы. Если отказ одного из элементов влечет за собой отказ всей конструкции, то при одинаковых вероятностях отказа отдельных элементов имеем:

$$Q = 1 - (1 - q)^n, \quad (1.1)$$

где Q – вероятность отказа системы (конструкции);
 q – вероятность отказа одного элемента;
 n – число элементов.

То же при различных вероятностях отказа элементов:

$$Q = 1 - (1 - q_1)(1 - q_2) \dots (1 - q_n) = 1 - \prod_{k=1}^n (1 - q_k), \quad (1.2)$$

где q_1, q_2, \dots, q_n – вероятности отказа отдельных элементов системы;
 q_k – вероятность отказа k -го элемента;
 \prod – знак произведений.

Для упрощения расчетных формул вместо понятий «отказ элемента» и «отказ системы» будем пользоваться понятиями «начальная безотказность элемента» и «начальная безотказность системы».

Тогда вероятность начальной безотказности системы ($P = 1 - Q$), состоящей из n элементов, при одинаковых начальных безотказностях этих элементов ($p = 1 - q$) будет

$$P = p^n, \quad (1.3)$$

Соответственно вероятность начальной безотказности системы при разных начальных безотказностях элементов будет

$$P = p_1 p_2 \dots p_n = \prod_{k=1}^n p_k. \quad (1.4)$$

Формулы (1.1) и (1.3) могут быть заменены зависимостью

$$P = (1 - q)^n, \quad (1.5)$$

где $q = 1 - p$ – вероятность отказа.

При малых вероятностях отказа (т. е. при начальных безотказностях, близких к единице), используя биномиальную формулу (при не слишком большом n), выражение (1.5) можно представить в виде:

$$P = (1 - q)^n \approx 1 - nq + \frac{(nq)^2}{1 \cdot 2}. \quad (1.6)$$

Здесь взяты три первые члена бинома Ньютона, причем третий упрощен. Это справедливо в предположении, что величины $\frac{(nq)^2}{1 \cdot 2}$ (поправка в третьем члене) и $\frac{(nq)^3}{1 \cdot 2 \cdot 3}$ (порядок величины четвертого члена) будут меньше требуемой точности и не окажут существенного влияния на результат вычисления.

В случаях, когда значение $(nq)^2$ тоже удовлетворяет этому условию, выражение (1.6) принимает вид:

$$P \approx 1 - nq. \quad (1.7)$$

Аналогично вместо формулы (1.4) имеем:

$$P = (1 - q_1)(1 - q_2) \dots (1 - q_n), \quad (1.8)$$

где q_1, q_2, \dots, q_n – вероятности соответствующих отказов.

Если эти вероятности малы, а n не очень велико (т. е. $q_n \ll 1$)

$$P = 1 - q_1 - q_2 - \dots - q_n = 1 - \sum_{k=1}^n q_k^2, \quad (1.9)$$

если же они малы, но не слишком малы, то

$$P \approx 1 - q_1 - q_2 - \dots - q_n + q_1 q_2 + \dots + q_{n-1} q_n = 1 - \sum_{k=1}^n q_k^2 + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n q_k q_k, \quad (1.10)$$

где $\sum_{k=1}^n$ – сумма попарных произведений соответствующих q_k .

Для удобства пользования формула (1.10) может быть приведена к виду:

$$P \approx \sum_{k=1}^n q_k + \frac{1}{2} \left[\sum_{k=1}^n q_k - \sum_{k=1}^n q_k^2 \right]. \quad (1.11)$$

Эта формула справедлива до тех пор, пока суммой тройных произведений можно пренебрегать.

Зная характеристики начальной безотказности элементов j_i узлов какой-либо сборной конструкции, оценим ее надежность, пользуясь формулой, основанной на теореме умножения вероятностей

$$H_k = H_{\vartheta}^{n_{\vartheta}} \cdot H_y^{n_y}, \quad (1.12)$$

где H_k – надежность конструкции;
 H_{ϑ} и H_y – соответственно надежность элементов и узлов;
 n_{ϑ} и n_y – соответственно количество элементов и узлов.

По результатам анализу надежности конструкции должны быть прокорректированы (если это требуется) первоначально принятые проектные решения.

Приведенные ниже примеры иллюстрируют методику расчетов начальной безотказности и долговечности строительных конструкций. При этом считается, что отдельные элементы или системы элементов, отказ в работе, который влечет за собой аварию конструкции в целом, определены на основании расчетов прочности и устойчивости всей конструкции. Оценка аварийного состояния или безотказности сложных систем является самостоятельной задачей теории расчетов и относится к стадии анализа конструкций на надежность.

В настоящее время отсутствует стройная теория, которая могла бы служить основанием для определения последовательности отказов элементов сложной системы и наступления ее предельного состояния. Тем не менее, при прочих равных условиях, проектирование с учетом надежности создает дополнительные условия, позволяющие повысить качество и снизить стоимость возведения строительных конструкций.

При выполнении проверочного расчета конструктивная схема разбивается на расчетные участки. Под расчетными участками с последовательным сопряжением элементов понимается система взаимосвязанных конструктивных элементов, в которой отказ одного или нескольких звеньев означает потерю эксплуатационных свойств всей системы. Примером может служить многоярусная сборная колонна каркаса или несущая стена многоэтажного крупнопанельного здания.

Расчетные участки с параллельными сопряжениями элементов отличаются тем, что отказ одного из звеньев не оказывает существенного влияния на работу остальных. Так, например, авария одного из настилов междуэтажного перекрытия не означает аварии перекрытия в целом и не исключает возможности его частичной эксплуатации. В этом случае оценка надежности конструкции основана на теореме сложения вероятностей.

Начальная безотказность сложной системы. На практике нередко встречаются конструкции, отказ в работе которых наступает после выхода из строя не одного, а нескольких элементов. Примером служит вантовое покрытие типа «велосипедное колесо». Здесь отказ одного из рабочих вантов может и не вызвать аварии. Если откажут несколько соседних вантов, то нагрузка на элементы, окаймляющие поврежденный участок, может превысить разрушающую, и тогда авария покрытия неизбежна. В случае отказа нескольких вантов, расположенных в разных участках покрытия, это не обязательно приведет к аварии. Тем не менее одновременный или последовательный выход из строя одного или нескольких рабочих вантов соответственно увеличивает вероятность отказа всей конструкции покрытия.

Существует взаимосвязь между отказом сложной системы (конструкции), спроектированной с некоторым запасом прочности, и отказами составляющих ее элементов и узлов. Конструкция, спроектированная с учетом взаимодействия составляющих ее элементов, которые могут до некоторой степени дублировать друг друга, обладает известной устойчивостью по отношению к отказам отдельных элементов или узлов. Такая конструкция отличается более высоким уровнем надежности, чем состоящая из n элементов, которые не могут дублировать друг друга, так как здесь имеется как бы дополнительный резерв прочности – увеличенный коэффициент запаса.

Если отказ всей системы обуславливается одновременным отказом двух элементов, имеем:

$$P = (1 - q^2)^N, \quad (1.13)$$

где q – вероятность отказа одного элемента;

$N = \frac{n \cdot (n-1)}{1 \cdot 2}$ – число всех возможных пар элементов, при отказе которых наступает авария (n – число элементов).

Действительно, вероятность отказа двух данных элементов равна произведению вероятностей их отказов, т. е. q^2 . Число возможных комбинаций из двух элементов равно числу сочетаний из n по два, т. е. C_n^2 . Тогда начальная безотказность конструкции вычисляется по формуле (1.15), где q заменяем на q^2 , а n – на N .

При практических расчетах строительных конструкций мы обычно сталкиваемся с малыми величинами отказов q и сравнительно небольшим количеством элементов n .

В этом случае приближенное значение вероятности отказа системы из формулы (1.13) имеет вид:

$$P = 1 - Nq^2 + \frac{N(N-1)}{1 \cdot 2} \cdot q^4 \approx 1 - \frac{1}{2} \cdot n^2 q^2 + \frac{1}{8} \cdot n^4 q^4, \quad (1.14)$$

или

$$P = 1 - Nq^2 = 1 - \frac{n(n-1)}{1 \cdot 2} \cdot q^2 \approx 1 - \frac{1}{2} \cdot n^2 q^2. \quad (1.15)$$

Если считать, что отказ двух элементов не обязательно приводит к отказу всей конструкции, а только к отказу с некоторой (возросшей) вероятностью, то

$$P = (1 - Qq^2)^N, \quad (1.16)$$

где Q – условная вероятность отказа конструкции при отказе двух элементов.

Приближенно

$$P \approx 1 - NQq^2 \approx 1 - \frac{1}{2}Qn^2q^2. \quad (1.17)$$

Если учесть, что вероятности отказов q_k различны для разных элементов, то вместо выражения (1.16) получим

$$P = \prod_{k=1}^n p_k (1 - q_i q_k), \quad (1.17a)$$

где штрих у знака произведения показывает, что нужно брать только те произведения, где $i \neq k$ и $i > k$.

Для удобства расчета упростим формулу (1.17). Считая, что q_k достаточно малы, получим:

$$P \approx 1 - \frac{1}{2} \sum_{i,k=1}^n q_i q_k, \quad (1.18)$$

где $\sum_{i,k=1}^n q_i q_k$ – сумма всех попарных произведений, соответствующих q .

Здесь, как и в формуле (1.10), штрих у знака суммы означает, что в сумму не входят выражения q_i^2 , т. е. те произведения, где множители имеют одинаковый индекс.

Если учесть, что вероятность отказа конструкции зависит от того, какие именно элементы отказали, вместо выражения (1.17) получим:

$$P = \prod_{i,k=1}^n p_k (1 - Q_{i,k} q_i q_k), \quad (1.19)$$

где $i \neq k$ и $i > k$, или

$$P \approx 1 - \sum_{i,k=1}^n Q_{i,k} q_i q_k. \quad (1.20)$$

При решении практических задач целесообразно разбить элементы на группы, для которых вероятности Q можно считать одинаковыми.

ВЫВОД

Предложена методика расчета начальной безотказности отдельных строительных конструкций и систем, а значит и повышения надежности и долговечности строительных конструкций. Данная методика основана на учете изменения прочности элементов и узлов строительных конструкций в результате постепенного их износа за время эксплуатации зданий и сооружений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агаджанов, В. И. Экономика повышения долговечности и коррозионной стойкости строительных конструкций [Текст] / В. И. Агаджанов. – М. : Стройиздат, 1988. – 173 с.
2. Михайлов, К. В. Бетон и железобетон в строительстве [Текст] / К. В. Михайлов, Ю. С. Волков. – М. : Стройиздат, 1987. – 104 с.
3. Колотилкин, Б. М. Проблемы долговечности и надежности зданий [Текст] / Б. М. Колотилкин. – М. : Знание, 1969. – 46 с.
4. Парабук, Г. Вопросы качества, надежности и долговечности в строительстве [Текст] / Г. Парабук // Экономика строительства. – 1962. – № 7. – С. 11–17.
5. Кочерженко, В. В. Технология конструкции зданий и сооружений : учебное пособие [Текст] / В. В. Кочерженко, В. М. Лебедев. – М. : Из-во ассоциации строительных вузов, 2007. – 224 с. (Строительство). – ISBN 5-222-07353-х.
6. Рогожский, В. А. Экспериментальная надежность зданий [Текст] / В. А. Рогожский. – Л. : Стройиздат, 1983. – 95 с.
7. ДСТУ Б 2.6.-145:2010 Захист бетонних і залізобетонних конструкцій від корозії. Загальні технічні умови [Текст] ; чинний від 26.10.2010-10-26. – К. : Мінрегіонбуд України, 2010. – 51 с.

Получено 20.12.2013

В. М. ЛЕВЧЕНКО, Д. В. ЛЕВЧЕНКО, В. Ф. КИРИЧЕНКО, О. Ю. ІВАНОВ,
О. А. КОВАЛЬОВА

ПОЧАТКОВА БЕЗВІДМОВНІСТЬ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ
БУДІВЕЛЬ І СПОРУД

Донбаська національна академія будівництва і архітектури

Оцінка надійності будівельних конструкцій – складне комплексне завдання, яке має вирішуватися з урахуванням витрат, спрямованих на забезпечення потрібних показників якості в процесі проектування, зведення й експлуатації будівель і споруд. Явище, після якого настає один із неприпустимих граничних станів у будівельних конструкціях, називається відмовою. Антиподом надійності є ненадійність, що оцінюється ймовірністю виникнення відмов протягом заданого проміжку часу експлуатації конструкції або окремих її частин. Порушення початкової безвідмовності супроводжується раптовими відмовами чи аваріями. У статті наводяться шляхи одержання рівнонадійних конструкцій при їх проектуванні. Наведено необхідні теоретичні передумови та практичні рекомендації, на підставі яких можуть бути зроблені важливі кроки на шляху до корінного покращення якості будівництва.

надійність, ефективність, безвідмовність, ймовірна оцінка, сполучання елементів, довговічність

VICTOR LEVCHENKO, DMITRY LEVCHENKO, VLADIMIR KIRICHENKO,
ALEKSANDR IVANOV, EKATERINA KOVALEVA

ORIGINAL FAILURE-FREE PERFORMANCE OF BUILDING STRUCTURES

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

To analyze the reliability of building structures is a difficult complex task. It should be solved taking into account expenses to provide the required quality while designing, constructing and operating buildings and structures. The condition which causes one of the critical limiting states of the structure is called failure. The antipode of reliability is unreliability which is estimated by random failures within given period of structure or its parts operation. The failure-free performance operation disturbance is followed by the random failures and breakdowns. The article gives the ways of obtaining equal reliability in designing the structure. The have been given the recommendations for improving the construction quality.

reliability, efficiency, failure-free performance, estimation of probability, durability

Левченко Віктор Миколайович – кандидат технічних наук, професор, проректор з науково-педагогічної і виховної роботи Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: проектування економічних будівельних конструкцій і розробка оптимальних конструктивних і об'ємно-планувальних рішень промислових будівель та інженерних споруд.

Левченко Дмитро Вікторович – кандидат технічних наук, доцент кафедри металевих конструкцій Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: проектування економічних будівельних конструкцій і розробка оптимальних конструктивних і об'ємно-планувальних рішень промислових будівель та інженерних споруд.

Кириченко Володимир Федорович – старший викладач кафедри технології, організації та охорони праці в будівництві Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: проектування економічних будівельних конструкцій і розробка оптимальних конструктивних і об'ємно-планувальних рішень промислових будівель та інженерних споруд.

Іванов Олександр Юрійович – магістр Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: проектування економічних будівельних конструкцій і розробка оптимальних конструктивних і об'ємно-планувальних рішень промислових будівель та інженерних споруд.

Ковальова Катерина Олександрівна – студентка Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: проектування економічних будівельних конструкцій і розробка оптимальних конструктивних і об'ємно-планувальних рішень промислових будівель та інженерних споруд.

Левченко Віктор Николаевич – кандидат технических наук, профессор, проректор по научно-педагогической и воспитательной работе Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: проектирование экономических строительных конструкций и разработка оптимальных конструктивных и объемно-планировочных решений промышленных зданий и инженерных сооружений.

Левченко Дмитрий Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры металлических конструкций Донбасской национальной академии строительства и архитектуры строительный институт, кафедра металлических

конструкций. Научные интересы: проектирование экономичных строительных конструкций и разработка оптимальных конструктивных и объемно-планировочных решений промышленных зданий и инженерных сооружений.

Кириченко Владимир Федорович – старший преподаватель кафедры технологии и организации строительства Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: проектирование экономичных строительных конструкций и разработка оптимальных конструктивных и объемно-планировочных решений промышленных зданий и инженерных сооружений.

Иванов Александр Юрьевич – магистр Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: проектирование экономичных строительных конструкций и разработка оптимальных конструктивных и объемно-планировочных решений промышленных зданий и инженерных сооружений.

Ковалева Екатерина Александровна – студентка Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: проектирование экономичных строительных конструкций и разработка оптимальных конструктивных и объемно-планировочных решений промышленных зданий и инженерных сооружений.

Levchenko Victor – PhD (Eng.), Professor, Vice-rector in education and pedagogic activities, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, chancellor's office. Scientific interests: economically attractive building structures design and developing the structural and spatial designs of industrial buildings and engineering structures.

Levchenko Dmitry – PhD (Eng.), Associated Professor, Metal Structures Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: economically attractive building structures design and developing the structural and spatial designs of industrial buildings and engineering structures.

Kirichenko Vladimir – senior lecturer, Technology and Management in Construction Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: economically attractive building structures design and developing the structural and spatial designs of industrial buildings and engineering structures.

Ivanov Aleksandr – the magistrate, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: economically attractive building structures design and developing the structural and spatial designs of industrial buildings and engineering structures.

Kovaleva Ekaterina – student, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: economically attractive building structures design and developing the structural and spatial designs of industrial buildings and engineering structures.