

НАЧАЛЬНАЯ БЕЗОТКАЗНОСТЬ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И ПУТИ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ ИХ НАДЕЖНОСТИ В ЗДАНИЯХ И СООРУЖЕНИЯХ

В. Н. Левченко, к.т.н., профессор; О. Э. Брыжатый, к.т.н., доцент; С. Н. Машталер, к.т.н., доцент; Е. А. Дмитренко, к.т.н., доцент

ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка

Аннотация. 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.

При проектировании зданий и сооружений должны устанавливаться научно обоснованные показатели теоретической надежности элементов и конструкций, а их действительная надежность должна обеспечиваться комплексом технологических и организационных мероприятий на заводах-изготовителях, монтажных и общестроительных площадках.

Для полноценного решения проблемы надежности подчеркивается необходимость комплексного осуществления необходимых мероприятий на всех стадиях возведения и эксплуатации строительных конструкций. Основные критерии полноценной надежности могут быть получены на основе анализа точности технологических процессов производства всех предприятий строительной отрасли.

Ключевые слова: надежность, эффективность, безотказность, вероятностная оценка, сопряжения элементов, долговечность, ремонтпригодность.



*Левченко
Виктор Николаевич*



*Брыжатый
Олег Эдуардович*



*Машталер
Сергей Николаевич*



*Дмитренко
Евгений Анатольевич*

Для обеспечения надежности конструкций в зданиях и сооружениях 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.

Исследованиям по начальной безотказности конструкций в промышленных зданиях и сооружениях посвящено достаточное количество трудов как зарубежных, так и отечественных ученых. Наиболее детально вопросы рационального использования различного вида конструкций применительно к отечественным условиям рассмотрены в работах следующих авторов: Авиром Л. С., Бондаренко В. М., Пухонто Л. М., Райзер В. Д.

Несмотря на интерес к проблеме исследования многих современных авторов, необходим постоянный анализ и уточнение тенденций развития строительного производства с целью повышения начальной безотказности конструкций в промышленных зданиях и сооружениях.

Целью статьи является анализ методики расчета начальной безотказности отдельных строительных конструкций и систем, а значит и повышения надежности и долговечности строительных конструкций.

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 [1, 2, 3].

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

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

где Q – вероятность отказа системы (конструкции);

q – вероятность отказа одного элемента;

n – число элементов.

То же при различных вероятностях отказа элементов:

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

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» необходимо 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

$$P = p^n \quad (3)$$

Соответственно, вероятность начальной безотказности системы при разных начальных безотказностях элементов будет

$$P = p_1 p_2 \dots p_n = \prod_{k=1}^n p_k \quad (4)$$

Формулы (1) и (3) могут быть заменены зависимостью

$$P = (1 - q)^n, \quad (5)$$

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 (5) можно представить в виде:

$$P = (1 - q)^n \approx 1 - nq + \frac{(nq)^2}{1 \cdot 2}. \quad (6)$$

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 $1 \cdot 2$ величины четвертого члена) будут меньше требуемой точности и не окажут существенного влияния на результат вычислений.

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

$$P \approx 1 - nq \quad (7)$$

Аналогично вместо формулы (4) имеем:

$$P = (1 - q_1)(1 - q_2) \dots (1 - q_n), \quad (8)$$

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

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

$$P = 1 - q_1 - q_2 - \dots - q_n = 1 - \sum_{k=1}^n q_k^2, \quad (9)$$

если же они малы, но не слишком малы, то

$$P = 1 - q_1 - q_2 - \dots - q_n + q_1 q_2 + \dots + q_{n-1} q_n = 1 - \sum_{k=1}^n q_k^2 + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n q_k q_k, \quad (10)$$

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

Для удобства пользования формула (10) может быть приведена к виду:

$$P \approx \sum_{k=1}^n q_k + \frac{1}{2} \left[\sum_{k=1}^n q_k - \sum_{k=1}^n q_k^2 \right]. \quad (11)$$

Эта формула справедлива до тех пор, пока суммой тройных произведений можно пренебрегать [3, 7].

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

$$H_k = H_y^n - H_y^n, \quad (12)$$

где H_k – надежность конструкции;

H_y и H_y – соответственно надежность элементов и узлов;

n_y и n_y – соответственно количество элементов и узлов.

По результатам анализа надежности конструкции должны быть прокорректированы (если это требуется) первоначально принятым проектным решениям.

Приведенные ниже примеры иллюстрируют методику расчетов начальной безотказности и долговечности строительных конструкций. При этом считается, что отказ в работе отдельных элементов или системы элементов, 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 конструкции на надежность [5, 6, 11].

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 участ-

ки. 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:

$$P = (1 - q^2)^N, \quad (13)$$

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 (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 (13) имеет вид:

$$P = 1 - Nq^2 + \frac{N(N-1)}{1 \cdot 2} \cdot q^4 \approx 1 - \frac{1}{2} \cdot n^2 \cdot q^2 + \frac{1}{8} \cdot n^4 \cdot q^4, \quad (14)$$

$$P = 1 - Nq^2 = 1 - \frac{n(n-1)}{1 \cdot 2} \cdot q^2 \approx 1 - \frac{1}{2} \cdot n^2 \cdot q^2. \quad (15)$$

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

$$P = (1 - Qq^2)^N, \quad (16)$$

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

Приближенно:

$$P \approx 1 - NQq^2 \approx 1 - \frac{1}{2} \cdot Q \cdot n^2 \cdot q^2 \quad (17)$$

Если учесть, что вероятность отказов q_k различна для разных элементов, то вместо выражения (16) получим:

$$P = \prod_{k=1}^n p_k (1 - q_1 q_k), \quad (17a)$$

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

Для удобства расчета упростим формулу (17). Считая, что q_k достаточно малы, получим:

$$P \approx 1 - \frac{1}{2} \sum_{i,k=1}^n q_i q_k, \quad (18)$$

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

соответствующих q .

Здесь, как и в формуле (10), штрих у знака суммы означает, что в сумму не входят выражения q_i^2 , т.е. произведения, где множители имеют одинаковый индекс.

Если учесть, что вероятность отказа конструкции зависит от того, какие именно элементы отказали, вместо выражения (17) получим:

$$P = \prod_{i,k=1}^n p_k (1 - Q_{i,k} q_i q_k), \quad (19)$$

где $i \neq k$ и $i > k$, или

$$P \approx 1 - \sum_{i,k=1}^n Q_{i,k} q_i q_k. \quad (20)$$

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

Полноценное решение проблемы надежности может быть достигнуто лишь при комплексном осуществлении необходимых мероприятий на всех стадиях возведения и эксплуатации строительных конструкций:

- проектирование с учетом характеристик надежности;

- технологическое обеспечение установленных проектом характеристик качества и прежде всего надежности;

- поддержание требуемого уровня качества конструкций в течение всего срока их службы.

При этом в практике могут встретиться две основные задачи: прямая – проектирование элементов и конструкций по заданным (ранее установленным, нормативным) критериям надежности, и обратная – оценка надежности существующих элементов и конструкций.

Обе задачи тесно связаны между собой, ибо необходимые для проектирования количественные характеристики надежности могут быть установлены только на основе статистического анализа действительной надежности существующих элементов и конструкций, аналогичных проектируемым. В свою очередь, при организации производства должны учитываться требования устанавливаемых проектом количественных характеристик теоретической надежности. В результате должны быть созданы условия, при которых действительная надежность строительных конструкций будет соответствовать теоретической (проектной) [4].

В настоящее время в подавляющем большинстве случаев проектирование ведется пассивным методом, при котором расчеты прочности и устойчивости элементов и конструкций выполняются без учета их надежности. Естественно, что такое положение не позволяет управлять качеством строительства и не отвечает требованиям современного уровня развития строительной науки и техники.

В процессе проектирования должны устанавливаться научно обоснованные показатели теоретической надежности элементов и конструкций, а их действительная надежность обеспечиваться комплексом технологических и организационных мероприятий на заводах-изготовителях, монтажных и общестроительных площадках. Для этого необходимо располагать экономически оправданными количественными критериями характеристик надежности, отвечающими конструктивным требованиям и обеспечиваемыми соответствующей производственной базой. Такие критерии могут быть получены на основе анализа точности технологических процессов производства одного предприятия, группы предприятий или отрасли строительной индустрии.

Проблема надежности строительных конструкций, в основе которой лежит установление тесной органической связи между проектированием и производством, пока еще не в полной мере решена, но уже сегодня намечаются основные пути ее решения.

В области проектирования проектная (теоретическая) надежность зависит, прежде всего, от соответствия расчетной модели действительной работе конструкции. Здесь, наряду с совершенствованием общей методики расчета, необходимо внести ряд уточнений по важным локальным вопросам [8].

Так, например, распределение и величина расчетных усилий могут существенно изменяться в зависимости от податливости элементов в узлах, которая в свою очередь зависит от условий опира-

ния, величины зазоров или натягов, от материала сопрягаемых элементов и способов их соединения. Очевидно, что податливость существенно зависит от качества изготовительных и монтажных работ, оцениваемых соответствующими классами точности (допусками). При современном многообразии применяемых материалов, конструктивных решений и способов производства работ податливость может изменяться в широких пределах. Традиционное разделение сопряжений на «шарнир» и «заделку» можно рассматривать лишь как предельные, «идеальные», характеристики. Промежуточные характеристики сопряжений и соответствующие им расчетные коэффициенты должны быть установлены на основе теоретических и экспериментальных исследований [8].

Важным резервом повышения проектной надежности является оптимальное укрупнение элементов сборных конструкций и дальнейшее развитие работ по стандартизации, унификации и технологичности проектных решений. Необходимо также учитывать требования ремонтпригодности и долговечности, предъявляемые к проектируемым строительным конструкциям.

Оценка качества проектных решений должна производиться с учетом количественных характеристик проектной (теоретической) надежности, согласующихся с конкретными производственными и эксплуатационными условиями [8].

В области производства. Качество несущих и ограждающих конструкций зданий и сооружений зависит от степени изменчивости физико-механических и геометрических характеристик элементов и узлов сопряжений.

Для этого необходимо обеспечить:

- систематическое изучение закономерностей причин, влияющих на производственное качество элементов и конструкций, возводимых разными методами из различных материалов, обобщение и накопление экспериментальных данных;

- обеспечение надежности строительных конструкций путем стабилизации технологических процессов производства с помощью активного производственного контроля качества;

- разработку статистических методов анализа точности технологических процессов и установление производственных физико-механических и геометрических характеристик качества применительно к различным технологическим условиям.

Оценка качества строительства должна производиться путем сопоставления проектных и действительных характеристик надежности и других количественных показателей качества.

В области эксплуатации. Для улучшения характеристики ремонтпригодности и долговечности конструкций необходима разработка методики проведения профилактических и капитальных ремонтов, создание эксплуатационных условий, обеспечивающих требуемую долговечность конструкций в заданный промежуток времени, накопление и анализ статистических данных о постепенном износе и старении конструкций.

В области экономики. Для определения экономического эффекта при проектировании с учетом надежности и затрат на ее технологическое и эксплу-

атационное обеспечение необходимо экономическое обоснование требуемого уровня надежности и сроков службы строительных конструкций [3].

Оценка надежности строительных конструкций тремя основными характеристиками (начальная безотказность, долговечность, ремонтпригодность) позволяет конкретизировать пути комплексного решения проблемы. По результатам технико-экономического анализа оптимального уровня теоретической и действительной надежности можно установить количественные критерии оценки качества несущих ограждающих конструкций.

Выводы. 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.

Несмотря на большие достижения отечественных и зарубежных ученых, и сегодня многие строительные лаборатории не в полной мере обладают оперативными методами оценки надежности конструкций зданий и сооружений. Разработка долговечных железобетонных конструкций и эффективных методов их защиты возможна лишь на основе количественного обсчета деструктивных и структурных процессов, которые протекают в конструкциях в условиях их эксплуатации.

Список литературы

1. Авиром, Л. С. Пути повышения надежности и долговечности сборных конструкций зданий и сооружений / Л. С. Авиром // Научные и проектные работы: сборник ин-та ЛенЗНИИЭП. – Москва, Стройиздат, 1976. – 196 с. – Текст : непосредственный.
2. Бондаренко, В. М. Надежность строительных конструкций и мостов / В. М. Бондаренко, Л. И. Иосилевский, В. П. Чирков. – Москва, РААСН. 1996. – 230 с. – Текст : непосредственный.
3. Левченко, В. Н. Эффективные конструктивные и технические инженерные решения и анализ факторов, влияющих на долговечность железобетонных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений : учебное пособие / В. Н. Левченко, Д. В. Левченко, Н. А. Невгень. – Макеевка, ДонНАСА, 2018. – 243 с. – Текст : непосредственный.
4. Пухонто, Л. М. Долговечность железобетонных конструкций инженерных сооружений / Л. М. Пухонто. – Москва, АСВ, 2004. – 435 с. – Текст : непосредственный.
5. Райзер, В. Д. Теория надежности в строительном проектировании / В. Д. Райзер. – Москва, АСВ, 1998. – 304 с. – Текст : непосредственный.
6. Райзер, В. Д. Расчет и нормирование надежности строительных конструкций / В. Д. Райзер. – Москва, Стройиздат, 1995. – 352 с. – Текст : непосредственный.
7. Рекомендации по обеспечению надежности и долговечности железобетонных конструкций промышленных зданий и сооружений при их реконструкции и восстановлении / Харьковский Проектный НИИ (ПромстройНИИпроект) Госстроя СССР. – Москва, Стройиздат, 1990. – 176 с. – Текст : непосредственный.
8. Чирков, В. П. Надежность и долговечность железобетонных конструкций зданий и сооружений / В. П. Чирков // Российская архитектурно-строительная энциклопедия, в 16 томах. Том 5. Наука, материалы и технологии в строительстве России XXI века. – Москва, ВНИИНТПИ Госстроя РФ. 1998. – с. 86-117. – Текст : непосредственный.
9. Bossel, Hartmut. Systeme, Dynamik, Simulation. Modellbildung, Analyse und Simulation komplexer Systeme. / Hartmut, Bossel. – Norderstedt: BoD GmbH, 2004. – 400 p. – Текст : непосредственный.
10. EN 1990 Eurocode. Basis of structural design. – Berlin : Springer-Verlag, 2014. – Текст : непосредственный.
11. Брыжатый, О. Э., Брыжатый, Э. П. Влияние состояния узловых сопряжений сборных конструкций на работу элементов каркаса многоэтажного здания [Электронный ресурс] / О. Э. Брыжатый, Э. П. Брыжатый // Строитель Донбасса. – 2021. № 2 (15), 2021 – С. 15 – 19. – Режим доступа: [http://donnasa.ru/publish_house/journals/sd/2021/sd_2021-2\(15\).pdf](http://donnasa.ru/publish_house/journals/sd/2021/sd_2021-2(15).pdf).