

УДК 624.012.3.003.13

**В. Н. ЛЕВЧЕНКО, В. И. КРОТЮК, С. Н. ВОДОЛАЗСКИЙ, Д. В. ОВЧАРЕНКО, В. И. ХОМИЧ**  
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

## **ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ**

**Аннотация.** В статье рассматриваются вопросы надежности зданий и сооружений и ее формирование на всех этапах существования зданий и сооружений. Оценка технического состояния зданий и сооружений предназначена для качественного и количественного представления показателей, характеризующих свойства материалов и состояние объектов, изучения процессов, происходящих в конструкциях, основаниях и оборудовании, а также выявления фактических эксплуатационных свойств материалов, элементов конструкций и установления их соответствия техническим требованиям. Обеспечение требуемого уровня надежности зданий и сооружений в процессе жизненного цикла выполняется техническими и организационными методами. Изложены общие вопросы и современное состояние данной проблемы включая основные положения проектирования долговечности железобетонных конструкций, существующие методы экономического обоснования ее оценки, понятия и критерии, связанные с долговечностью.

**Ключевые слова:** безотказность, долговечность зданий и сооружений, резервирование, дефекты, ремонтпригодность.

Надежность зданий и сооружений непрерывно формируется на всех этапах их существования. На стадии проектирования определяются нагрузки и воздействия, осуществляется выбор материалов и разрабатывается конструктивное решение, учитывающее основные факторы условий эксплуатации объекта. Тем самым формируется первоначальный уровень долговечности и безотказности здания и его элементов. Принятые в конструктивном решении соединения отдельных элементов формируют ремонтпригодность конструкций и инженерного оборудования. Кроме того, при проектировании закладывается определенный запас в основные параметры объекта (прочность, деформативность и др.), который называется начальным резервированием (рис. 1).

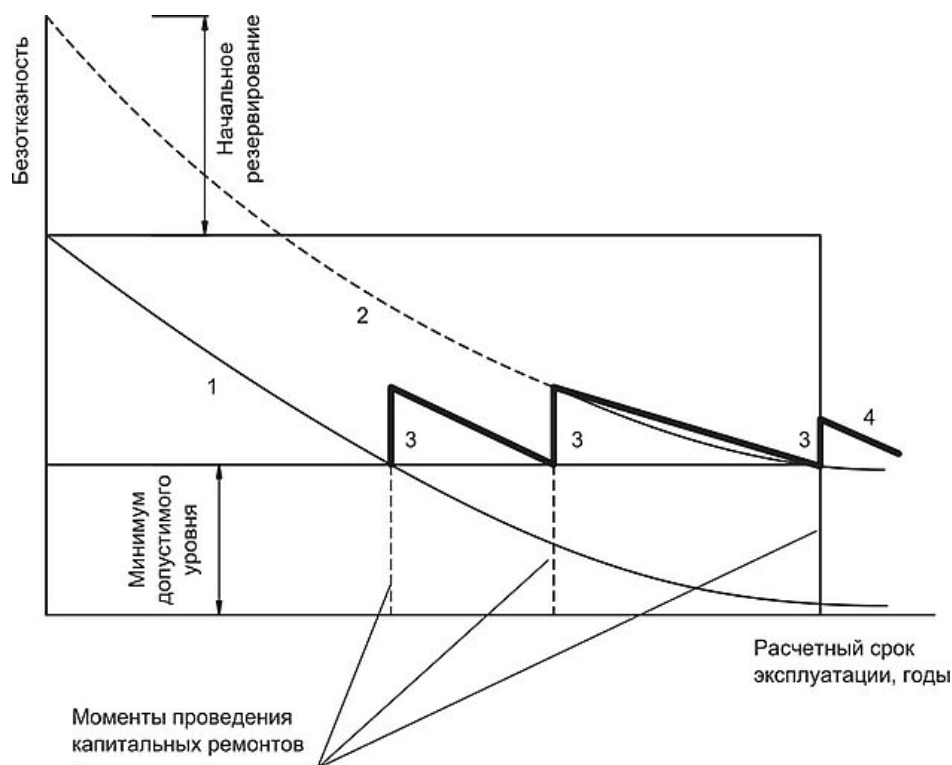
При возведении зданий и сооружений качество монтажных работ, соответствие экономически обоснованных материалов проекту и правильное выполнение технологических процессов вносят определенную корректировку в свойства безотказности и долговечности элементов объекта.

Выполнение ремонтных работ, замена изношенных элементов в определенной мере восстанавливает уровень безотказности конструкций и оборудования. Использование при ремонтах новых технологий и материалов, предупреждающих износ, повышает долговечность конструкций и оборудования, и наоборот, нарушение правил эксплуатации, несвоевременное выполнение предупредительных ремонтов приводят к уменьшению расчетного уровня долговечности.

Применение при плановых ремонтах новых конструктивных решений может повысить уровень ремонтпригодности объекта.

Оперативное устранение возникающих в процессе эксплуатации дефектов не позволяет им перерасти в отказ, и тем самым обеспечивается требуемый уровень надежности зданий и сооружений.

При проектировании (рис. 1, кривая 2) в результате удорожания объекта можно достичь высокого уровня начальной безотказности (ввести начальное резервирование) таким образом, чтобы с учетом снижения безотказности во времени безотказность достигла минимально допустимого уровня к концу расчетного срока эксплуатации. Также можно предположить, что объект и без начального



**Рисунок 1** – Формирование и изменение надежности здания на стадиях проектирования и эксплуатации: 1 – изменение безотказности объекта в результате старения и износа; 2 – то же при начальном резервировании; 3 – повышение безотказности при капитальном ремонте; 4 – увеличение долговечности объекта.

резервирования, что экономичнее первого варианта, предусмотреть такую последовательность капитальных ремонтов (кривая 1), которая бы обеспечивала уровень безотказности не ниже требуемого на всем этапе эксплуатации.

Такой подход потребует больших по сравнению с первым вариантом эксплуатационных затрат.

Таким образом, обеспечение требуемого уровня надежности зданий и сооружений в процессе их существования может выполняться техническими и организационными способами и должен обосновываться комплексными оценками: социальными, техническими, экономическими, экологическими и др. [5, 6].

При любых, даже самых совершенных технических решениях, вероятность отказа конструкций и оборудования всегда остается. Предотвратить отказы или сделать их последствия минимальными призваны организационные методы обеспечения надежности.

Организационным обеспечением надежности зданий и сооружений занимаются эксплуатационные службы, выполняющие две основные задачи [2, 8]:

- выявление первых признаков возникновения отказа конструкций или оборудования и предотвращение его дальнейшего развития;
- снижение предупредительными мероприятиями (плановые ремонты, техническое обслуживание и т. п.) вероятности возникновения отказов.

При возникновении неисправности в конструкции или оборудовании здания значения их эксплуатационных параметров отклоняются до величины  $R_i$ , которая выходит за пределы допустимых значений. Информация о нарушении появится у эксплуатационной службы через время  $t_1$ . Для выявления причин неисправности, ее оценки и принятия решения по ней требуется время  $t_2$ . На выполнение действий по устранению неисправности затрачивается время  $t_3$ , определяемое свойствами ремонтпригодности объекта. После завершения восстановительных работ для приведения отклонившегося параметра в исходное состояние требуется время  $t_4$ , обусловленное технической инерцией объекта. Таким образом, период существования неисправности определяется по формуле:

$$T_{\text{неисп}} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4. \quad (1)$$

Время прохождения информации о неисправности зависит от субъективных факторов и технического решения объекта. Время же выявления причин возникновения неисправности и выработки плана действий по ее ликвидации, а также время устранения неисправности зависит от эксплуатационной службы. В конкретных условиях у эксплуатационного персонала существуют определенные возможности по восприятию информации о неисправности и принятию управляющего решения  $t_{2min}$ , а также по выполнению ремонта  $t_{3min}$ . При этом время существования неисправности станет минимальным при выполнении следующего условия:

$$T_{неиспр\ min} = t_1 + t_{2min} + t_{3min} + t_4. \quad (2)$$

Не всегда, получив информацию о наличии неисправности, эксплуатационный персонал немедленно начинает заниматься ее устранением. В этом случае, если неисправность вызывает не скачкообразное, а постепенное отклонение параметров объекта, то до наступления отказа объекта через время  $T_{OT}$  его можно предотвратить. Для этого в момент времени  $t_x$  эксплуатационный персонал должен оперативно (за время  $t_{3min}$ ) выполнить ремонтные работы и не допустить возникновения отказа. Если описанная ситуация возможна, то это означает, что имеется некоторый избыток времени (резерв времени) над минимально необходимым, который определяется по формуле:

$$T_{рез} = T_{OT} - T_{рез} = T_{OT} - (t_1 + t_{2min} + t_{3min} + t_4). \quad (3)$$

Показатель резервного времени учитывает одновременно как внешние, так и внутренние ограничения эксплуатационного персонала, т. е. позволяет соотносить предъявляемые требования с возможностями эксплуатационной службы.

Вероятность безотказной работы является функцией времени. Чем более длительно объект находится в эксплуатации, тем больше вероятность того, что произойдет отказ в его работе. Заблаговременное проведение планово-предупредительных замен конструкций или их элементов до момента возникновения отказа повышает вероятность безотказной работы, но влечет за собой увеличение эксплуатационных затрат (рис. 2). Найти обоснованное соотношение между требуемым уровнем надежности объекта и материальными затратами, связанными с ее обеспечением, можно посредством разработки оптимальной стратегии выполнения ремонтов.



**Рисунок 2** – Зависимость между выигрышем в надежности и материальными затратами на его достижение при предупредительной замене конструкций.

Критериями оптимальной стратегии выполнения ремонтов служат частота возникновения отказов и экономические показатели. Суммарные материальные затраты, связанные с возникновением и существованием отказа, с мероприятиями по его предупреждению и ликвидации, отнесенные к единице времени, называются интенсивностью эксплуатационных затрат [1, 7].

Для каждой конструкции существует некоторый предельный уровень частоты отказов  $I_{дон}$ , который должны обеспечить эксплуатационные службы. Обеспечить допустимый уровень частоты

отказов можно изменением периода проведения плановых замен конструкции или ее элементов. Ожидаемая частота отказов при периодических плановых заменах конструкции рассчитывается по формуле:

$$I_{от} = \pi/4 \cdot T_{пл} / T_{ср}^2, \quad (4)$$

где  $T_{пл}$  – назначаемая периодичность проведения плановых замен конструкции (или ее элементов);  
 $T_{ср}$  – средний срок службы конструкции.

Задача обеспечения требуемого уровня частоты отказов сводится к выполнению неравенства:

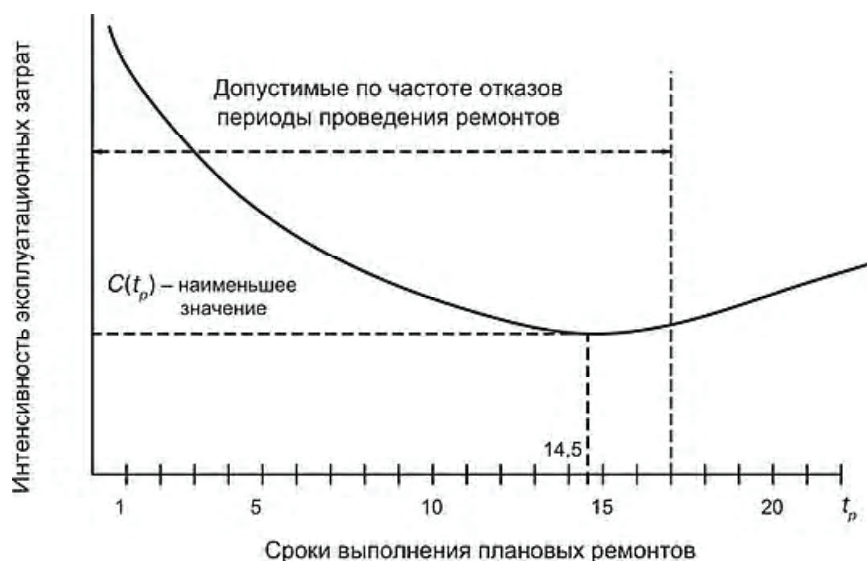
$$I_{от} \leq I_{доп}. \quad (5)$$

Отсюда определяется периодичность проведения плановым замен конструкции:

$$T_{ср} \leq \pi/4 \cdot I_{доп} \cdot T_{ср}^2. \quad (6)$$

Любой межремонтный период, удовлетворяющий приведенному неравенству, является целесообразным с учетом обеспечения надежности конструкции. Далее решается экономическая задача: из всех возможных межремонтных периодов, удовлетворяющих условию обеспечения надежности конструкции, выбрать тот, при котором интенсивность эксплуатационных затрат наименьшая. Для решения этой задачи строится график зависимости интенсивности эксплуатационных затрат от межремонтного периода конструкции, по которому определяется наименьшее значение функции. Это значение ординаты и будет соответствовать оптимальному межремонтному периоду.

**Пример.** Известно, что мастичная кровля «Вента» имеет средний срок службы 18,3 года. Допустимая частота отказов кровли  $I_{доп} = 0,04$  1/год. График изменения интенсивности эксплуатационных затрат в зависимости от межремонтного периода приведен на рис. 3.



**Рисунок 3** – Изменение интенсивности эксплуатационных затрат в зависимости от межремонтного периода.

Требуется выбрать оптимальный межремонтный период для кровли, который обеспечивал бы требуемый уровень ее надежности и был экономически оправданным.

**Решение.** Определяем значения межремонтных периодов, которые обеспечивают требуемый уровень частоты отказов кровли:

$$T_{ср} \leq \pi/4 \cdot I_{доп} \cdot T_{ср}^2 = \pi/4 \cdot 0,04 \cdot 18,3^2 = 17,01 \approx 17 \text{ лет}. \quad (7)$$

По графику интенсивность эксплуатационных затрат в диапазоне от 0 до 17 лет принимает наименьшее значение при  $T_{пл} = 14,5$  года. Поскольку плановые ремонты выполняются с периодичностью, кратной году, принимаем межремонтный период 14 лет, при котором частота равна  $I_{от} = 0,034$  1/год, что меньше допустимого значения  $I_{доп} = 0,041$  1/год.

Непременным условием уменьшения расчетного коэффициента надежности при заданном уровне надежности конструкции является получение надлежащих гарантий в том, что действительные характеристики качества (надежности) возведенной в натуре конструкции будут соответствовать расчетной модели. Эта задача решается способом организации активного производственного контроля качества и стабилизации технологических процессов, что связано с некоторыми материальными затратами.

В железобетонных конструкциях имеются еще и дополнительные резервы экономии [3]:

1. Повышение коэффициента однородности бетона и уменьшение коэффициента перегрузки от собственного веса позволяет уменьшить расчетные сечения.

2. Оценка физико-механических характеристик качества элементов железобетонных конструкций по их контрольной прочности. Сущность метода заключается в том, что на основе сплошного контроля готовой продукции неразрушающими методами определяются фактические значения физико-механических характеристик качества в различных сечениях элементов.

Как известно, по принятой методике расчета железобетонных конструкций проектом устанавливается один класс бетона для всего элемента, а величина сечения обычно принимается постоянной по длине. Естественно, что прочность, необходимая в расчетном сечении, оказывается излишней для других сечений. В силу особенностей технологии производства железобетонных конструкций имеет место изменчивость характеристик прочности в пределах элемента. Задача состоит в том, чтобы учесть вероятность совпадения действительных характеристик прочности в некоторых сечениях с расчетными усилиями, действующими в тех же сечениях.

Н. А. Крыловым [4] предложена методика вероятностной оценки этих совпадений, позволяющая уменьшить расчетный класс бетона (или, что тоже, расчетный коэффициент надежности) и получить существенный экономический эффект [2, 4].

Так, например, для сопоставления действительных характеристик прочности бетона однопролетной железобетонной балки (рис. 4) с сопротивлениями, допускаемыми по расчету для различных её сечений, строится специальная контрольная эпюра  $R_{bx}$ . Ординаты этой огибающей эпюры определены по результатам расчета бетона на сжимающие усилия от действующих моментов, а также сжимающие или перерезывающие усилия от поперечных сил при условии восприятия арматурой действующих усилий и обеспечения надежного ее сцепления с бетоном. Расчеты выполнены с учетом изменения величин изгибающих моментов и перерезывающих сил по длине балки (эпюры  $M$  и  $Q$ ).

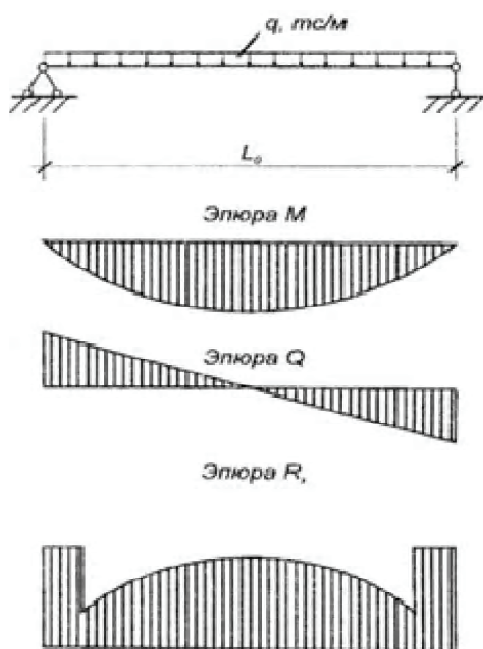


Рисунок 4 – Расчетные и контрольные эпюры для однопролетной железобетонной балки.

При сплошном контроле прочности бетона в изделиях для каждого контролируемого сечения должно быть соблюдено условие:

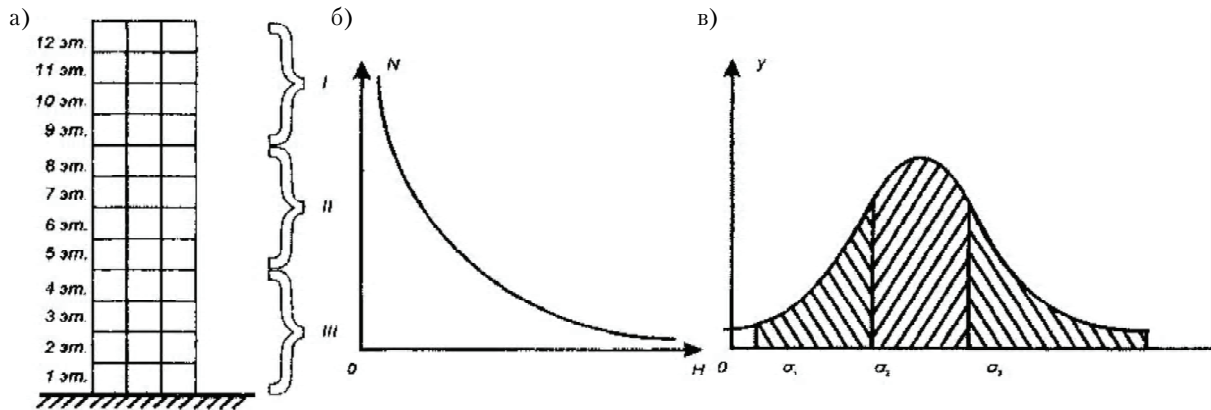
$$R_{b_{изм}} < R_{bx}, \quad (7)$$

где  $R_{b_{изм}}$  – действительная (измеренная) прочность бетона в контролируемом сечении элемента;  
 $R_{bx}$  – расчетное сопротивление бетона в том же сечении.

3. Применение селективного отбора при сплошном контроле физико-механических и геометрических характеристик качества.

Такой отбор позволяет дифференцировать однотипные элементы сборных конструкций по характеристикам надежности и рационально размещать их в конструкции.

Руководствуясь графиком, приведенным на рис. 5в, выполним селективный отбор, т. е. разбраковку партии по характеристикам прочности от  $\sigma_1$  до  $\sigma_2$ , от  $\sigma_2$  до  $\sigma_3$  и больше  $\sigma_3$ . Теперь ясно, что для первых четырех этажей (III участок) пойдут звенья колонн с характеристиками прочности больше  $\sigma_3$ , для 5–8 этажей (II участок) – с характеристиками от  $\sigma_2$  до  $\sigma_3$  и для 9–12 этажей (I участок) – от  $\sigma_1$  до  $\sigma_2$ . Соответственно должна быть дифференцирована и точность монтажных работ. В отдельных случаях по высоте здания может меняться и метод монтажа, обеспечивающий в нижних ярусах максимальную точность сопряжений, т. е. минимальные эксцентриситеты, а в верхних (где труднее добиться высокой точности) – максимально допустимые эксцентриситеты. Разумеется, это распределение должно быть подтверждено проверочным расчетом надежности конструкций и экономическими соображениями.



**Рисунок 5** – Обеспечение равнонадежности конструкций: а) схема каркаса; б) график изменения надежности конструкции по высоте здания; в) изменчивость характеристик прочности партии элементов сборных колонн; I – первый участок надежности (12–9 этажи); II – второй участок надежности (8–5 этажи); III – третий участок надежности (4–1 этажи);  $H$  – надежность конструкции;  $N$  – число ярусов (этажей) колонны;  $\sigma_b$  – прочность элементов;  $y$  – количество элементов данной прочности (частота распределения).

4. Улучшение качества строительства, сведение к минимуму доли дефектной продукции и удлинение межремонтного периода.

5. Осуществление рекомендаций службы надежности по совершенствованию проектных решений и технологических процессов производства, направленных на повышение уровня надежности и, следовательно, на улучшение технико-экономических показателей строительства.

Непременным условием решения проблемы надежности является четкое взаимодействие процессов проектирования, возведения и эксплуатации строительных конструкций. Особо важное значение здесь имеет проектирование характеристик надежности с учетом технического уровня производственной базы и организация производства, обеспечивающая безусловное соответствие действительных показателей качества проектным величинам.

Главной задачей производства следует считать организацию управления качеством возведения зданий и сооружений с использованием методов активного производственного контроля. Здесь большое значение имеет проектирование технологического оборудования, оснастки и производственных процессов с учетом проектных характеристик надежности и получение мгновенной информации о ходе технологических процессов производства.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агаджанов, В. И. Экономика повышения долговечности и коррозионной стойкости строительных конструкций / В. И. Агаджанов. – Москва : Стройиздат, 1988. – 144 с. – Текст : непосредственный.
2. Бабушкин, В. И. Защита строительных конструкций от коррозии, старения и износа / В. И. Бабушкин. – Харьков : Вища школа. Головное издательство, 1989. – 169 с. – Текст : непосредственный.
3. Порывай, Г. А. Предупреждение преждевременного износа зданий / Г. А. Порывай. – Москва : Стройиздат, 1979. – 284 с. – Текст : непосредственный.
4. Крылов, Н. А. Радиотехнические методы контроля качества железобетона / Н. А. Крылов, В. А. Калашников, А. М. Полищук. – Москва : Стройиздат, 1966. – 121 с. – Текст : непосредственный.
5. Рекомендации по обеспечению надежности и долговечности железобетонных конструкций промышленных зданий и сооружений при их реконструкции и восстановлении / Харьковский Промстройниипроект. – Москва : Стройиздат, 1990. – 176 с. – Текст : непосредственный.
6. Руководство по определению экономической эффективности повышения качества и долговечности строительных конструкций промышленных зданий и сооружений при их реконструкции и восстановлении / НИИЖБ Госстроя СССР. – Москва : Стройиздат, 1981. – 56 с. – Текст : непосредственный.
7. Райзер, В. Д. Расчет и нормирование надежности строительных конструкций / В. Д. Райзер. – Москва : Стройиздат, 1995. – 352 с. – Текст : непосредственный.
8. Чирков, В. П. Надежность и долговечность железобетонных конструкций зданий и сооружений / В. П. Чирков. – Текст : непосредственный // Российская архитектурно-строительная энциклопедия, 1998. – Том V. – С. 86–177.
9. Clanvil, I. Prediction of Concrete Durability / I. Clanvil, A. Neville, G. Sommerville. – London : EFN Spon, 1996. – 208 p. – Текст : непосредственный.

Получена 24.12.2021

В. М. ЛЕВЧЕНКО, В. І. КРОТЮК, С. М. ВОДОЛАЗСЬКИЙ, Д. В. ОВЧАРЕНКО,  
В. І. ХОМИЧ  
ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ НАДІЙНОСТІ ТА ДОВГОВІЧНОСТІ  
БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ БУДІВЕЛЬ ТА СПОРУД  
ДОНБАСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ»

**Анотація.** У статті розглядаються питання надійності будівель та споруд і її формування на всіх етапах існування будівель та споруд. Оцінка технічного стану будівель та споруд призначена для якісного та кількісного представлення показників, що характеризують властивості матеріалів та стан об'єктів, вивчення процесів, що протікають у конструкціях, основах та устаткуванні, а також виявлення фактичних експлуатаційних властивостей матеріалів, елементів конструкцій та встановлення їх відповідності технічним вимогам. Забезпечення необхідного рівня надійності будівель та споруд у процесі їхнього існування виконується технічними та організаційними методами. Викладено загальні питання та сучасний стан цієї проблеми, включаючи основні положення проектування довговічності залізобетонних конструкцій, існуючі методи економічного обґрунтування її оцінки, поняття та критерії, пов'язані з довговічністю.

**Ключові слова:** безвідмовність, довговічність, резервування, дефекти, ремонтпридатність.

VICTOR LEVCHENKO, VLADIMIR KROTIUK, SERGEI VODOLAZSKII,  
DARIA OVCHARENKO, VERA KHOMICH  
ECONOMIC JUSTIFICATION OF RELIABILITY AND DURABILITY OF  
ENGINEERING STRUCTURES OF BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS  
Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

**Abstract.** The article deals with the issues of reliability of buildings and structures, as well as its formation at all stages of the existence of buildings and structures. Assessment of the technical condition of buildings and structures is intended for the qualitative and quantitative presentation of indicators characterizing the properties of materials and the condition of objects, for studying the processes taking place in structures, foundations and equipment, as well as for identifying the actual performance properties of materials, structural elements and establishing their compliance with technical requirements. Ensuring the required level of reliability of buildings and structures in the process of their existence is carried out by technical and organizational methods. The general issues and the current state of this problem, including the main provisions of the design of the durability of reinforced concrete structures, existing methods, the economic justification for its assessment, concepts and criteria related to durability.

**Key words:** reliability, durability, redundancy, defects, maintainability.

**Левченко Виктор Николаевич** – кандидат технических наук, профессор; помощник ректора ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: проектирование экономических строительных конструкций и разработка оптимальных конструктивных и объемно-планировочных решений промышленных зданий и инженерных сооружений.

**Кротюк Владимир Игоревич** – ассистент кафедры железобетонных конструкций ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: влияние повышенных температур и увлажнения на прочность и деформацию высокопрочного бетона.

**Водолазский Сергей Николаевич** – магистрант кафедры железобетонных конструкций ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: проектирование экономических строительных конструкций и разработка оптимальных конструктивных и объемно-планировочных решений промышленных зданий и инженерных сооружений.

**Овчаренко Дарья Владимировна** – магистрант кафедры железобетонных конструкций ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: проектирование экономических строительных конструкций и разработка оптимальных конструктивных и объемно-планировочных решений промышленных зданий и инженерных сооружений.

**Хомич Вера Ивановна** – магистрант кафедры менеджмент строительных организаций ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: экономика и управление национальным хозяйством.

**Левченко Віктор Миколайович** – кандидат технічних наук, професор; помічник ректора ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: проектування економічних будівельних конструкцій і розробка оптимальних конструктивних і об'ємно-планувальних рішень промислових будівель та інженерних споруд.

**Кротюк Володимир Игоревич** – асистент кафедри залізобетонних конструкцій ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: вплив підвищених температур і зволоження на міцність і деформацію високоміцного бетону.

**Водолазський Сергій Миколайович** – магістрант кафедри залізобетонних конструкцій ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: проектування економічних будівельних конструкцій і розробка оптимальних конструктивних і об'ємно-планувальних рішень промислових будівель та інженерних споруд.

**Овчаренко Дар'я Володимирівна** – магістрант кафедри залізобетонних конструкцій ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: проектування економічних будівельних конструкцій і розробка оптимальних конструктивних і об'ємно-планувальних рішень промислових будівель та інженерних споруд.

**Хомич Віра Іванівна** – магістрант кафедри менеджменту будівельних організацій ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: економіка і управління національним господарством.

**Levchenko Victor** – Ph. D. (Eng.), Professor; assistant to the rector at Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: design of economical building structures and development of optimal structural and space-planning solutions for industrial buildings and engineering structures.

**Krotiuk Vladimir** – assistant, Reinforced Concrete Constructions Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: the effect of elevated temperatures and moisture on the strength and deformation of high-performance concrete.

**Vodolazskii Sergei** – master's student, student of the Reinforced Concrete Structures Department at Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: design of economical building structures and development of optimal structural and space-planning solutions for industrial buildings and engineering structures.

**Ovcharenko Daria** – master's student, student of the Reinforced Concrete Structures Department at Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: design of economical building structures and development of optimal structural and space-planning solutions for industrial buildings and engineering structures.

**Khomich Vera** – master's student, student of the Reinforced Concrete Structures Department at Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: economics and management of the national economy.