



УДК 69.07

DOI: 10.22227/2949-1622.2024.1.15-26

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/ RESEARCH ARTICLE

Прогнозирование остаточного срока эксплуатации железобетонных конструкций

И.А. Терехов^{1*}, Н.Н. Трекин², Э.Н. Кодыш³

¹ Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Российская Федерация

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Российская Федерация

³ АО «Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений — ЦНИИПромзданий», Москва, Российская Федерация

*terekhov-i@mail.ru

Ключевые слова: железобетонные конструкции, остаточный срок эксплуатации, обследование, категория технического состояния, дефект

История статьи

Поступила в редакцию: 18.10.2023

Доработана: 06.12.2023

Принята к публикации: 16.12.2023

Для цитирования

Терехов И.А., Трекин Н.Н., Кодыш Э.Н. Прогнозирование остаточного срока эксплуатации железобетонных конструкций // Железобетонные конструкции. 2024. Т. 5. № 1. С. 15–26.

Аннотация. Основными показателями долговечности, которые характеризуют время работы конструкции до наступления аварийного состояния, являются общий срок службы и остаточный срок эксплуатации, определение которых позволяет более обоснованно подойти к вопросу планирования текущего или капитального ремонта в здании.

Рассмотрены наиболее распространенные инженерные методики, которые позволяют прогнозировать для железобетонных конструкций остаточный срок эксплуатации: по нормативным срокам и объектам-аналогам, по внешним признакам, на основе изменения коэффициентов запаса и по критерию прочности. Для ряда методик приведены их модификации. По результатам анализа методик были установлены их основные преимущества и недостатки.

В качестве предложения по совершенствованию существующих подходов предложена методика, в которой за остаточный срок эксплуатации принят интервал между визуальными обследованиями.

Prediction of the Remaining Service Life of Reinforced Concrete Structures

Ivan A. Terekhov^{1*}, Nikolay N. Trekin², Emil N. Kodysh³

¹ Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russian Federation

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), Moscow, Russian Federation

³ Central Scientific Research and Project Experimental Institute of Industrial Buildings and Constructions, Moscow, Russian Federation

*terekhov-i@mail.ru

Иван Александрович Терехов, кандидат технических наук, доцент, Российский университет транспорта (МИИТ), 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9; eLIBRARY SPIN-код: 5607-3615, e-mail: terekhov-i@mail.ru.

Николай Николаевич Трекин, доктор технических наук, профессор кафедры железобетонных и каменных конструкций, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; eLIBRARY SPIN-код: 4721-2525, e-mail: otk@yandex.ru.

Эмиль Наумович Кодыш, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, АО «Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений — ЦНИИПромзданий», 127238, г. Москва, Дмитровское шоссе, д. 46, корп. 2; eLIBRARY SPIN-код: 1559-5834, e-mail: otk@yandex.ru.

© Терехов И.А., Трекин Н.Н., Кодыш Э.Н., 2024



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Keywords: reinforced concrete structures, remaining service life, examination, category of technical condition, defect

Article history

Received: 18.10.2023

Revised: 06.12.2023

Accepted: 16.12.2023

For citation

Terekhov I.A., Trekin N.N., Kodysh E.N. Prediction of the Remaining Service Life of Reinforced Concrete Structures. *Reinforced concrete structures*. 2024; 1(5):15-26.

Abstract. The main indicators of durability, which characterize the time of operation of the structure before the onset of an emergency condition, are the total service life and the remaining service life, the determination of which allows a more reasonable approach to the issue of planning current or major repairs in the building. The most common engineering techniques that allow predicting the remaining service life for reinforced concrete structures are considered: according to standard terms and analogous objects, according to external signs, based on changes in reserve coefficients and strength criteria. Their modifications are given for a number of techniques. Based on the results of the analysis of the methods, their main advantages and disadvantages were established. As a proposal to improve the existing approaches, a methodology is proposed in which the interval between visual examinations is taken for the remaining period of operation.

ВВЕДЕНИЕ

Большое количество эксплуатируемых зданий с железобетонными конструкциями приближается к нормативному (проектному) сроку службы или превышает его.

Механическая безопасность и долговечность здания при проектировании обеспечивается путем расчета конструкций по методу предельных состояний, а также назначением мер защиты в зависимости от условий эксплуатации. Оценка общего срока службы в настоящее время на стадии проектирования осуществляется в большинстве случаев укрупнено и является рекомендательной. Это объясняется тем, что при эксплуатации должны проводиться текущие и капитальные ремонты, качество проведения которых может существенно повлиять на продолжительность общего срока службы здания.

Накопление и развитие повреждений может привести к невозможности выполнения конструкцией своих функций на любой стадии жизненного цикла [1–5].

Основными показателями долговечности, которые характеризуют время работы конструкции до наступления аварийного состояния (см. рис. 1), являются общий срок службы $T = (t_u - t_0)$ и остаточный срок эксплуатации $T_i = (t_u - t_i)$ [6–10].

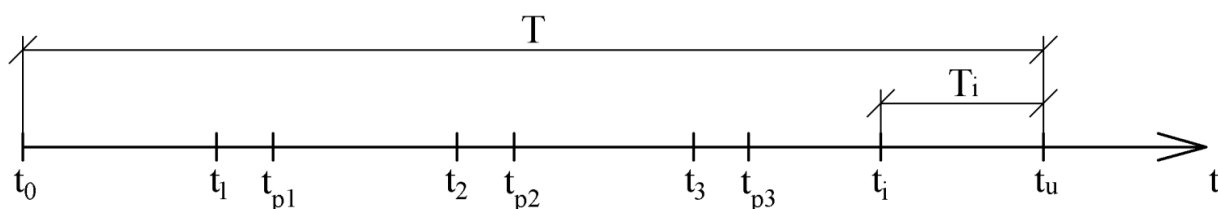


Рис. 1. Срок эксплуатации здания до наступления аварийного состояния:

t_0 — начальный период времени (дата изготовления или строительства);

t_1, t_2, t_3, t_i — время проведения обследований;

t_{p1}, t_{p2}, t_{p3} — время проведения текущего или капитального ремонта;

t_u — время наступления аварийного состояния; T_i — остаточный срок эксплуатации

Figure 1. The life of the building before the onset of an emergency

t_0 — the initial period of time (date of manufacture or construction);

t_1, t_2, t_3, t_i — time of surveys; t_{p1}, t_{p2}, t_{p3} — the time of the current or major repairs;

t_u — the time of occurrence of the emergency state; T_i — remaining service life

Ivan A. Terekhov, Associate Professor of the Russian University of Transport (MIIT), 9, bldg. 9, st. Obraztsova, Moscow, 127994; eLIBRARY SPIN-code: 5607-3615, e-mail: terekhov-i@mail.ru.

Nikolay N. Trekin, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department “Reinforced Concrete and Stone Structures”, National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), 129337, Moscow, Yaroslavskoe shosse, 26; eLIBRARY SPIN-code: 4721-2525, e-mail: otks@yandex.ru.

Emil N. Kodysh, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher, JSC “Central Research and Design Experimental Institute of Industrial Buildings and Structures — Tsniipromzdaniy”, Moscow 127238, Dmitrovskoe shosse, 46, building 2; eLIBRARY SPIN-code: 1559-5834, e-mail: otks@yandex.ru.

Вероятностный показатель безопасной работы конструкции $P(t)$ за период эксплуатации t зачастую является трудно воспринимаемым в практическом отношении специалистами, осуществляющими эксплуатацию зданий. Затрудняет внедрение вероятностных методов расчета срока эксплуатации также недостаточность статистического материала по срокам эксплуатации зданий в зависимости от условий изготовления, климатических факторов и режима эксплуатации. Поэтому в данной статье рассматриваются инженерные методики, которые позволяют прогнозировать остаточный срок эксплуатации конструкций, а также предложены методы их совершенствования.

При этом актуальность данных вопросов подтверждается тем, что все большее число владельцев зданий, арендаторов и инвесторов заинтересованы в определении фактического остаточного срока эксплуатации, что позволит предотвратить возникновение аварийного состояния, а также более обоснованно подойти к вопросу планирования текущего или капитального ремонта в здании [11–15].

МЕТОД

Определение остаточного срока эксплуатации по нормативным срокам и объектам-аналогам

Данная методика позволяет определить остаточный срок эксплуатации по установленным рекомендуемым срокам службы зданий:

$$T_i = [t_u] - t_i, \quad (1)$$

где t_i — фактический срок эксплуатации здания с момента его ввода в эксплуатацию или с момента проведения капитального ремонта;

$[t_u]$ — нормативный срок службы здания или срок, установленный между капитальными ремонтами. В соответствии с ГОСТ 27751–2014 «Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения», например, для зданий и сооружений массового строительства срок службы принимается не менее 50 лет, а для уникальных зданий не менее 100 лет. По данным [16] ориентировочный срок службы для жилых и общественных зданий принимают 100 лет.

Основным недостатком данного подхода является то, что он дает большую погрешность при определении остаточного срока эксплуатации. Частично данную проблему можно решить, приняв в качестве «эталоны» фактический срок службы объектов-аналогов:

$$T_i = t_{u,j} - t_i, \quad (2)$$

где $t_{u,j}$ — средний фактический срок службы объектов-аналогов.

В работе [17] также предложена прикладная методика прогнозирования остаточного срока службы для изгибаемых железобетонных конструкций, подверженных коррозии, с учетом опыта эксплуатации объектов-аналогов. Предлагается сформировать базу данных, которая будет содержать информацию о техническом состоянии, в том числе данных о проценте коррозионных повреждениях δ , в зависимости от срока эксплуатации здания t . Далее с учетом этого массива данных строится аппроксимирующая зависимость $\delta = f(t)$, которая для рассматриваемого объекта должна проходить через одну или несколько точек $(t_i; \delta_i)$, для которых значение δ_i определяется по результатам детального инструментального обследования (см. рис. 2).

Общий срок службы конструкции t_u определяется по графику до момента наступления предельного значения коррозионных повреждений δ_u , что будет соответствовать полной потере несущей способности железобетонного изгибаемого элемента. Остаточный срок эксплуатации равен $T_i = (t_u - t_i)$.

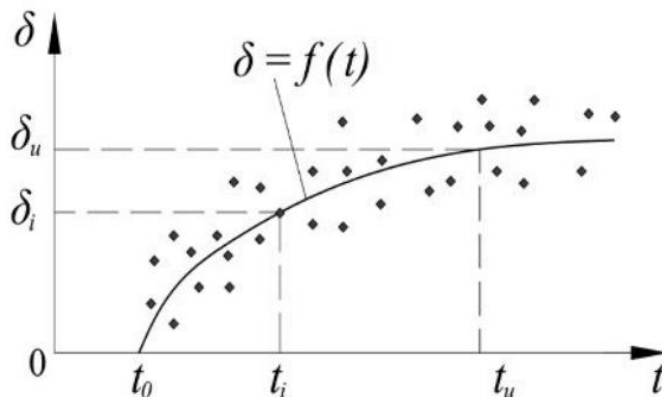


Рис. 2. Аппроксимирующая зависимость коррозионных повреждений с учетом данных по объектам-аналогам

Figure 2. Approximating dependence of corrosion damage, taking into account data on analogue objects

Для получения точного результата необходимо обладать накопленным опытом эксплуатации объектов с различным функциональным назначением в зависимости от климатических условий и режима эксплуатации.

Данные подходы чаще всего используют в качестве дополнения к другим методикам, так как они не могут отвечать требованиям механической безопасности ввиду большого разброса получаемых результатов. При этом в ряде случаев, например при планировании финансирования, необходимого для выполнения текущего или капитального ремонта, при отсутствии опасности обрушения конструкций может быть применен данный подход с учетом опыта эксплуатации объектов-аналогов со схожими дефектами.

Определение остаточного срока эксплуатации по внешним признакам

В 2001 г. в ЦНИИПромзданий были разработаны рекомендации [18], позволяющие определить остаточный ресурс конструкций по их поврежденности, которая зависит от технического состояния. Исходными данными в данных рекомендациях являются результаты визуального обследования [19, 20]. В рекомендациях также приведены таблицы, по которым можно определить техническое состояние по одному наиболее опасному дефекту. Аналогичный подход к назначению категории технического состояния используется и в других документах:

- СТО 70238424.27.010.011–2008. Здания и сооружения объектов энергетики. Методика оценки технического состояния (Приложение Г);
- Методика оценки остаточного ресурса несущих конструкций зданий и сооружений (Приложение Б) [21];
- СП 454.1325800.2019. Здания жилые многоквартирные. Правила оценки аварийного и ограниченно-работоспособного технического состояния (раздел 5).

Поврежденность здания определяется исходя из экспертной оценки с учетом социально-экономических последствий разрушения отдельного вида конструкций:

$$\varepsilon = \frac{\alpha_1 \varepsilon_1 + \alpha_2 \varepsilon_2 + \dots + \alpha_i \varepsilon_i}{\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_i}, \quad (3)$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_i$ — поврежденность отдельных видов конструкций;

$\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i$ — коэффициенты значимости отдельных видов конструкций, назначаемые исходя из восстановительной стоимости данного вида конструкции к общей стоимости восстановительных работ, например, по данным [22]. Также в рекомендациях [18] приведены ориентировочные коэффициенты, которые допускается применять при отсутствии данных по восстановительной стоимости: для плит перекрытия и покрытия $\alpha = 2$, для балок $\alpha = 4$, для ферм $\alpha = 7$, для колонн $\alpha = 8$, для несущих стен и фундаментов $\alpha = 3$, для прочих строительных конструкций $\alpha = 2$.

$$\varepsilon_i = \sum_{k=1}^{k=n} \varepsilon_k \frac{P_k}{P_i}, \quad (4)$$

где ε_k — поврежденность конструкции, определенная в зависимости от категории технического состояния для: работоспособного — $\varepsilon_k = 0,05$; ограниченно-работоспособного $\varepsilon_k = 0,15 \dots 0,2$; аварийного — $0,35$;

P_k — размеры (площадь или длина) поврежденного участка конструкции, m^2 или m ;

P_i — размеры всей конструкции, m^2 или m ;

n — число поврежденных участков.

Остаточный срок эксплуатации зависит от постоянной износа λ :

$$T_i = t_{\text{общ}} - t_i = \frac{k}{\lambda} - t_i, \quad (5)$$

где k — коэффициент, принимаемый равным:

0,16 — при определении остаточного ресурса до капитального ремонта;

0,22 — при определении остаточного ресурса до аварийного состояния;

$$\lambda = \frac{-\ln y}{t_i}, \quad (6)$$

где $y = 1 - \varepsilon$ — относительная надежность здания или отдельных конструкций;

t_i — срок эксплуатации в годах на момент обследования.

Данную методику успешно применяют многие организации для определения остаточного срока эксплуатации. В статье [23] также предложена модификация данного метода путем введения поправочных коэффициентов к остаточному сроку эксплуатации и/или постоянной износа λ .

В работе [24] предложено также использовать вместо поврежденности показатель физического износа, выраженного в процентах. Физический износ может быть определен для отдельных конструкций Φ_k по результатам сравнения фактических признаков износа с табличными данными, приведенными в ВСН 53-86 (р) «Правила оценки физического износа жилых зданий». При этом подход к определению физического износа здания в целом Φ_i и отдельной конструкции Φ_k является схожим с определением поврежденности по формулам (3), (4). Формула по определению остаточного срока эксплуатации через среднее время безотказной работы конструкции в данном случае будет представлена в виде:

$$T_i = \bar{t} - t_i, \quad (7)$$

где \bar{t} — среднее время безотказной работы:

$$\bar{t} = \frac{t_i}{- \ln \left(1 - \frac{\Phi_i}{100} \right)}. \quad (8)$$

Однако необходимо отметить и недостатки данного подхода:

1. Поврежденность здания определяется усреднено по всем конструкциям, что может привести к ситуации, при которой часть конструкций будет находиться в аварийном состоянии, а все здание в целом будет ограниченно-работоспособным.

2. Рассмотренные документы оценивают техническое состояние по одному дефекту. При этом конструкция может иметь несколько близко расположенных дефектов, которые совместно будут более негативно влиять на несущую способность конструкции.

3. Постоянная износа уменьшается при снижении надежности конструкции и с течением времени. Это приводит к тому, что остаточный срок эксплуатации возрастает при увеличении возраста здания.

4. Коэффициенты значимости в сборниках [22] равны удельным весам элементов от общей стоимости элементов здания. Сборники требуют актуализации в связи с тем, что в них отсутствуют современные конструктивные решения, например для монолитных каркасных жилых зданий с самонесущими стенами и вентилируемым фасадом.

5. В ГОСТ 31937–2011 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния» отсутствуют данные по соответствию физического износа и категории технического состояния.

Определение остаточного срока эксплуатации на основе изменения коэффициентов запаса

В работе [25] был предложен метод определения остаточного срока эксплуатации, базирующийся на отслеживании изменения коэффициентов запаса по первой и второй группам предельных состояний, а также конструктивных требований.

Рассматривая первую группу предельных состояний, определяется коэффициент запаса $k_{i,n}$, равный отношению расчетных прочностных характеристик материалов R_i к значению функции $F_i(x_m)$, которая описывает загруженность конструкции по видам расчета (прочность, устойчивость и т.д.):

$$k_{i,n} = \frac{R_{i,n}}{[F_i(x_m)]_n} \geq 1,0. \quad (9)$$

Аналогичный подход используется во второй группе предельных состояний и конструктивных требований:

$$k_{j,n} = \frac{S_{j,n}}{[S_j(y_m)]_n} \geq 1,0, \quad k_{k,n} = \frac{c_{k,n}^p}{C_{k,n}^p} \geq 1,0, \quad (10)$$

где $S_j(y_m)$ — функция, описывающая деформированное состояние конструкции по j виду расчета (прогиб, перемещение, ширина раскрытия трещин и т.д.);

s_j — предельные значения j деформации;

C_k — конструктивный параметр, установленный в проекте (размеры поперечного сечения, допуски и т.д.);

c_k — предельное значение конструктивного параметра;

p — показатель степени, принимаемый $p = 1,0$ в случае нормативных требований $c_k \geq C_k$ и $p = -1,0$ в случае нормативных требований $c_k \leq C_k$.

На начальном этапе конструкция должна находиться в нормативном состоянии, т.е. все коэффициенты запаса должны быть не менее 1,0. В методике принято, что значение коэффициента запаса по первой группе предельных состояний $k_{i,n}$ не может быть меньше 1,0, эксплуатация в данном случае не допускается. Изменение коэффициента запаса во времени принято в виде квадратичной функции (см. рис. 3) [25].

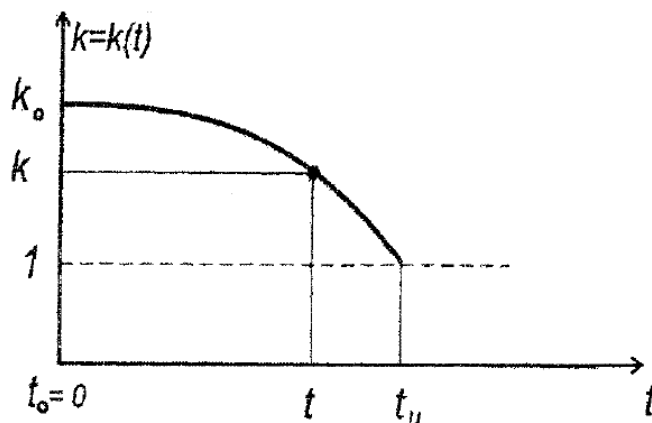


Рис. 3. Зависимость коэффициента запаса от времени по первой группе предельных состояний
Figure 3. Dependence of the safety factor on time for the first group of limit states

Время, при котором коэффициент запаса по первой группе предельных состояний достигнет наименьшее допустимое значение, будет выражаться по формуле:

$$t_u = t_i \sqrt{(k_0 - 1) / (k_0 - k)}. \quad (11)$$

Допускается применение более сложных аппроксимирующих зависимостей при наличии других характерных параметрических точек.

Остаточный срок эксплуатации будет определяться по наименьшему сроку t_u , определенному по первой и второй группам предельных состояний, а также конструктивных требований:

$$T_i = t_u - t_i. \quad (12)$$

В методике также предлагается введение к сроку T_i дополнительного понижающего коэффициента, учитывающего влияние нерассмотренных факторов в методике.

Основным недостатком методики является то, что для определения указанных коэффициентов запаса необходимо обладать значительным объемом достоверной информации, полученным по результатам детального инструментального обследования, а также выполненным поверочным расчетам. Однако данный подход может быть применен для наиболее ответственных (ключевых) конструкций, обеспечивающих механическую безопасность всего здания.

Методика оценки остаточного срока эксплуатации по критерию прочности

Данный подход составлен с учетом методик [21, 26] и может быть применен для оценки остаточного срока эксплуатации несущих железобетонных конструкций. Исходными параметрами в методике могут являться площадь поперечного сечения A_b , площадь арматуры A_s , прочность бетона R_b , значения которых должны быть получены на момент строительства и обследования конструкций. Прогнозирование износа для данных параметров происходит путем экстраполяции (см. рис. 4). Точками 1, 3, 6 на данном графике обозначены фактические значения

уменьшенной площади поперечного сечения бетона, прочности бетона, площади арматуры соответственно. Точка 2 соответствует прочности бетона в момент времени T_0 . Срок карбонизации защитного слоя бетона характеризуется точкой 5.

Основным критерием в данной методике выступает условие прочности:

$$\frac{F_{ult}}{F} \geq 0,7, \quad (13)$$

где F — усилие от внешних нагрузок и воздействий в рассматриваемом сечении;
 F_{ult} — предельное усилие, которое может быть воспринято в данном сечении.

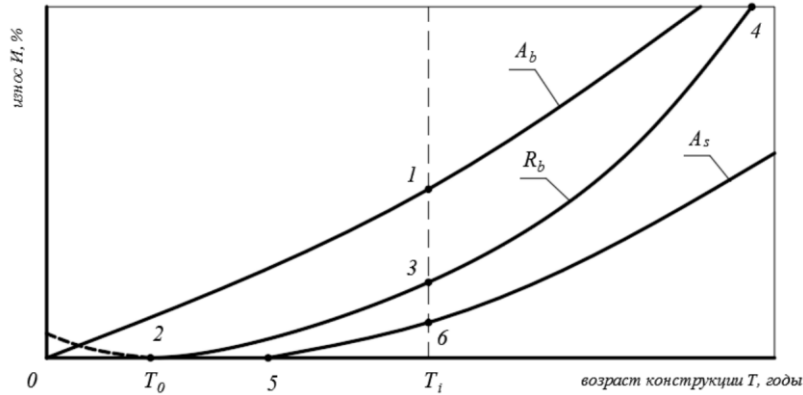


Рис. 4. Изменение во времени параметров
 Figure 4. Time change of parameters

Для определения остаточного срока эксплуатации предлагается построить ряд кривых, характеризующих условие прочности для различных расчетных ситуаций. На рис. 5 приведены кривые различных критериев прочности, включая снижение несущей способности по нормальным сечениям (1), наклонным сечениям на действие поперечной силы (4) и на совместное действие поперечной силы и изгибающего момента (3). График (2) показывает возможность продления эксплуатации после снижения временной нагрузки при достижении графиком (1) предельного значения.

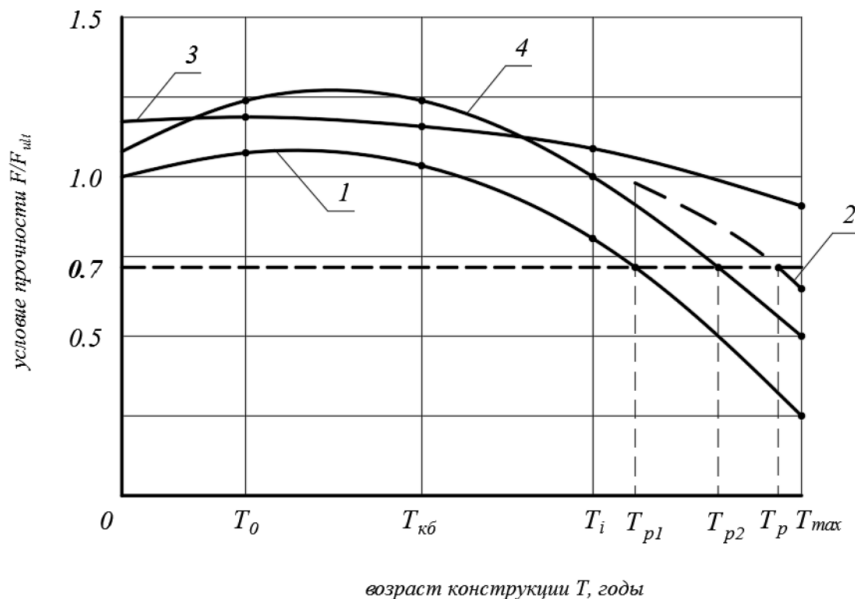


Рис. 5. Кривые изменения различных условий прочности
 Figure 5. Curves of changes in various strength conditions

Полученное значение T_p по графику будет соответствовать сроку эксплуатации до проведения капитального ремонта. Остаточный срок эксплуатации будет равен:

$$T = T_p - T_i. \quad (14)$$

Недостатки данной методики аналогичны методике, разработанной на основе изменения коэффициентов запаса.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При рассмотрении основных инженерных подходов к прогнозированию остаточного срока эксплуатации установлено, что, несмотря на все недостатки, наиболее распространенным и применяемым в настоящее время является подход к оценке срока по внешним признакам, который нуждается в корректировке.

На базе данных рекомендаций в статье [27] была предложена методика, при которой в качестве остаточного срока эксплуатации принят интервал между визуальными обследованиями. Максимальное значение данного срока принято согласно ГОСТ 31937–2011, равное 10 лет для работоспособного и нормативного технического состояния конструкции. При наличии дефектов и повреждений данный срок снижается до нуля при аварийном состоянии [28, 29]. Данная методика также предлагает учет совместного влияния дефектов на категорию технического состояния [30]. Допустимый срок эксплуатации устанавливается по конструкции, которая находится в наихудшем техническом состоянии с точностью до месяца. Данный срок может быть пересмотрен, например, после проведения ремонтных работ или очередного визуального обследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблема долговечности особенно остро проявляется при реконструкции и капитальном ремонте зданий и сооружений и оценке эксплуатационных качеств конструкций в момент контроля их технического состояния.

Расчет остаточного срока эксплуатации с соблюдением требований механической безопасности в общем виде должен основываться на положениях, при которых за период эксплуатации с момента проведения обследования не наступит аварийное состояние конструкции.

Применяемая методика должна содержать рекомендации по учету совместного влияния дефектов на категорию технического состояния и учитывать условия эксплуатации.

Предлагается к использованию методика, основанная на результатах визуального обследования, в которой в качестве срока безопасной эксплуатации принят интервал между обследованиями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондаренко В.М., Колчунов В.И. Концепция и направления развития теории конструктивной безопасности зданий и сооружений при силовых и средовых воздействиях // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 2. С. 28–31.
2. Казачек В.Г. Проблемы нормирования сроков службы зданий и сооружений // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F: Строительство. Прикладные науки. 2010. № 6. С. 56–71.
3. Карпенко Н.И., Карпенко С.Н., Ярмаковский В.Н., Ерофеев В.Т. О современных методах обеспечения долговечности железобетонных конструкций // Academia. Архитектура и строительство. 2015. № 1. С. 93–102.
4. Zheng Y., Zhang Y., Zhuo J., Zhang Y., Wan C. A review of the mechanical properties and durability of basalt fiber-reinforced concrete // Construction and Building Materials. 2022. Vol. 359. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129360

5. Alexander M., Beushausen H. Durability, service life prediction, and modelling for reinforced concrete structures — review and critique // Cement and Concrete Research. 2019. Vol. 122. Pp. 17–29. DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.04.018
6. Селяев В.П., Бондаренко В.М., Селяев П.В. Прогнозирование ресурса железобетонных изгибаемых элементов, работающих в агрессивной среде, по первой стадии предельных состояний // Региональная архитектура и строительство. 2017. № 2 (31). С. 14–24.
7. Тамразян А.Г. Методология анализа и оценки надежности состояния и прогнозирование срока службы железобетонных конструкций // Железобетонные конструкции. 2023. Т. 1. № 1. С. 5–18.
8. Травуш В.И., Мамин А.Н., Кодыш Э.Н., Бобров В.В., Долгова Т.В. Техническое состояние несущих конструкций Останкинской телевизионной башни после 50 лет эксплуатации // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 3. С. 31–36.
9. Torres Martín J.E., Rebolledo Ramos N., Chinchón-Payá S., Otero García F., de Haan L. Durability of a reinforced concrete structure exposed to marine environment at the Málaga dock // Case Studies in Construction Materials. 2022. Vol. 17. P. e01582. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e01582
10. Demis S., Papadakis V.G. Durability design process of reinforced concrete structures — Service life estimation, problems and perspectives // Journal of Building Engineering. 2019. Vol. 26. DOI: 10.1016/j.job.2019.100876
11. Мoiseenko P.П. Новый вариант расчета долговечности конструкций // Строительная механика и расчет сооружений. 2015. № 3 (260). С. 12–17.
12. Пиеничкина В.А., Сухина К.Н., Бабалич В.С., Сухин К.А. Оценка остаточного ресурса несущих железобетонных конструкций эксплуатируемых промышленных зданий. М. : Изд-во АСВ, 2017. 176 с.
13. Taffese W.Z., Nigusie E., Isoaho J. Internet of Things based Durability Monitoring and Assessment of Reinforced Concrete Structures // Procedia Computer Science. 2019. Vol. 155. Pp. 672–679. DOI: 10.1016/j.procs.2019.08.096
14. Taffese W.Z., Sistonen E. Machine learning for durability and service-life assessment of reinforced concrete structures: Recent advances and future directions // Automation in Construction. 2017. Vol. 77. Pp. 1–14. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.01.016
15. Wang Z., Jin W., Dong Y., Frangopol D.M. Hierarchical life-cycle design of reinforced concrete structures incorporating durability, economic efficiency and green objectives // Engineering Structures. 2018. Vol. 157. Pp. 119–131. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.11.022
16. Перельмутер А.В. Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций. М. : Изд-во АСВ, 2007. 256 с.
17. Смоляго Г.А., Фролов Н.В. Прикладной способ прогнозирования коррозионных повреждений и остаточного ресурса изгибаемых железобетонных элементов с учетом опыта эксплуатации объектов-аналогов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2019. № 2. С. 49–54.
18. Рекомендации по оценке надежности строительных конструкций зданий и сооружений по внешним признакам. М. : ФГУП ЦПП, 2001. 100 с.
19. Добромыслов А.Н. Оценка надежности зданий и сооружений по внешним признакам. М. : АСВ, 2008. 72 с.
20. Келасьев, Н.Г. Кодыш Э.Н., Трекин Н.Н., Терехов И.А., Шмаков Д.С., Чаганов А.Б. Определение срока службы конструкций, зданий и сооружений // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 2. С. 12–17.
21. Методика оценки остаточного ресурса несущих конструкций зданий и сооружений. ФАУ «ФЦС», 2018. 50 с. URL: https://www.faufcc.ru/upload/methodical_materials/mp34_2018.pdf
22. Сборники укрупненных показателей восстановительной стоимости зданий и сооружений для переоценки основных фондов. УПВС Онлайн. 2022. URL: <https://upvs-online.ru/>
23. Гаврильев И.М., Корольков Д.И., Гравит М.В. Модифицированная методика расчета остаточного ресурса с использованием экспоненциального распределения // Вестник Евразийской науки. 2019. № 2. URL: <https://esj.today/PDF/49SAVN219.pdf>
24. Смоляго Г.А., Фролов Н.В. Современные подходы к расчету остаточного ресурса изгибаемых железобетонных элементов с коррозионными повреждениями // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. Т. 21. № 6. С. 88–100.
25. Шматков С.Б. Расчет остаточного ресурса строительных конструкций зданий и сооружений // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2007. № 22 (94). С. 56–57.
26. Методика расчетного прогнозирования срока службы железобетонных пролетных строений автодорожных мостов. М. : ГП «Информавтодор», 2002. 140 с.
27. Трекин Н.Н., Кодыш Э.Н., Терехов И.А., Шмаков С.Д., Щедрин О.С. Методика определения эксплуатационной безопасности зданий и их конструкций // Academia. Архитектура и строительство. 2022. № 4. С. 152–159.

28. Федоров В.С., Трекин Н.Н., Кодыш Э.Н., Терехов И.А. Критерии для оценки категории технического состояния железобетонных колонн, ригелей, балок и ферм // *Строительство и реконструкция*. 2023. № 3 (107). С. 58–69.
29. Терехов И.А. Критерии оценки технического состояния железобетонных плит при коррозии арматуры // *Строительство и реконструкция*. 2022. № 6 (104). С. 128–139.
30. Ефремов А.М., Бойко Д.В., Сергеевцев Е.Ю., Трекин Н.Н., Кодыш Э.Н., Терехов И.А., Шмаков С.Д. Учет совместного влияния дефектов на несущую способность конструкций // *Промышленное и гражданское строительство*. 2022. № 8. С. 11–18.

REFERENCES

- Bondarenko V.M., Kolchunov V.I. The concept and directions of development of the theory of structural safety of buildings and structures under the influence of force and environmental factors. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2013; 2: 28-31.
- Kazachek V.G. Normalization problems of life cycles of buildings and constructions. *Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F: Stroitel'stvo. Prikladnye nauki*. 2010; 6:56-71.
- Karpenko N.I., Karpenko S.N., Yarmakovskiy V.N., Erofeev V.T. The modern methods for ensuring of the reinforced concrete structures durability. *Academia. Arhitektura i stroitel'stvo*. 2015; 1:93-102.
- Zheng Y., Zhang Y., Zhuo J., Zhang Y., Wan C. A review of the mechanical properties and durability of basalt fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*. 2022; 359. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129360
- Alexander M., Beushausen H. Durability, service life prediction, and modelling for reinforced concrete structures — review and critique. *Cement and Concrete Research*. 2019; 122:17-29. DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.04.018
- Selyaev V.P., Bondarenko V.M., Selyaev P.V. Forecasting the service life (resource) of reinforced concrete bending elements working in aggressive environment at the first stage of limit states. *Regional'naya arhitektura i stroitel'stvo*. 2017; 2(31): 14-24.
- Tamrazyan A.G. Methodology for the analysis and assessment of the reliability of the state and prediction the service life of reinforced concrete structures. *Zhelezobetonnye konstrukcii*. 2023; 1(1):5-18.
- Travush V.I., Mamin A.N., Kodysh E.N., Bobrov V.V., Dolgova T.V. Technical condition of the bearing structures of the ostankino tv tower after 50 years of operation. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2021; 3:31-36.
- Torres Martín J.E., Rebolledo Ramos N., Chinchón-Payá S., Otero García F., de Haan L. Durability of a reinforced concrete structure exposed to marine environment at the Málaga dock. *Case Studies in Construction Materials*. 2022; 17:e01582. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e01582
- Demis S., Papadakis V.G. Durability design process of reinforced concrete structures — Service life estimation, problems and perspectives. *Journal of Building Engineering*. 2019; 26. DOI: 10.1016/j.job.2019.100876
- Moiseenko R.P. A new way for calculating structural durability. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii*. 2015; 3(260):12-17.
- Pshenichkina V.A., Sukhina K.N., Babalich V.S., Sukhin K.A. *Assessment of the residual life of load-bearing reinforced concrete structures of operated industrial buildings*. Moscow, Izd-vo ASV, 2017; 176.
- Taffese W.Z., Nigussie E., Isoaho J. Internet of Things based Durability Monitoring and Assessment of Reinforced Concrete Structures. *Procedia Computer Science*. 2019; 155:672-679. DOI: 10.1016/j.procs.2019.08.096
- Taffese W.Z., Sistonen E. Machine learning for durability and service-life assessment of reinforced concrete structures: Recent advances and future directions. *Automation in Construction*. 2017; 77:1-14. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.01.016
- Wang Z., Jin W., Dong Y., Frangopol D.M. Hierarchical life-cycle design of reinforced concrete structures incorporating durability, economic efficiency and green objectives. *Engineering Structures*. 2018; 157:119-131. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.11.022
- Perelmuter A.V. Selected problems of reliability and safety of building structures. Moscow, Izd-vo ASV, 2007; 256.
- Smolyago G.A., Frolov N.V. Applied method for predicting corrosion damages and remaining resource of bendable reinforced concrete elements taking into account operating experience of similar projects. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta im. V.G. Shuhova*. 2019; 2:49-54.
- Recommendations for assessing the reliability of building structures of buildings and structures by external signs. Moscow, FGUP TsPP, 2001; 100.
- Dobromyslov A.N. *Assessment of the reliability of buildings and structures by external signs*. Moscow, ASV, 2008; 72.
- Kelasiev N.G., Kodysh E.N., Trekin N.N., Terekhov I.A., Shmakov D.S., Chaganov A.B. Determining the service life of structures, buildings and facilities. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2020; 2:12-17.
- Methodology for assessing the residual resource of the supporting structures of buildings and structures. FAU “FTsS”, 2018; 50. URL: https://www.faufcc.ru/upload/methodical_materials/mp34_2018.pdf

22. Collections of aggregated indicators of the replacement cost of buildings and structures for the revaluation of fixed assets. UPVS Online. 2022. URL: <https://upvs-online.ru/>
23. Gavriliev I.M., Korolkov D.I., Gravit M.V. Modified method for calculating residual resource using exponential distribution. *Vestnik Evrazijskoj nauki*. 2019; 2. URL: <https://esj.today/PDF/49SAVN219.pdf>
24. Smolyago G.A., Frolov N.V. Modern approaches to residual life calculation of flexural steel concrete elements with corrosion damage. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2019; 21(6):88-100.
25. Shmatkov S.B. Calculation of the residual resource of building structures of buildings and structures. *Vestnik Juzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Stroitel'stvo i arhitektura*. 2007; 22(94):56-57.
26. Methods of calculation forecasting of the service life of reinforced concrete superstructures of road bridges. Moscow, GP "Informavtodor", 2002; 140.
27. Trekin N.N., Kodysh E.N., Terekhov I.A., Shmakov S.D., Shchedrin O.S. Methodology for determining the operational safety of buildings and their structures. *Academia. Arhitektura i stroitel'stvo*. 2022; 4:152-159.
28. Fedorov V.S., Trekin N.N., Kodysh E.N., Terekhov I.A. Criteria for assessing the category of technical condition of reinforced concrete columns, crossbars, beams and trusses. *Stroitel'stvo i rekonstrukcija*. 2023; 3(107):58-69.
29. Terekhov I.A. Criteria for assessing the technical condition of reinforced concrete slabs during reinforcement corrosion. *Stroitel'stvo i rekonstrukcija*. 2022; 6(104):128-139.
30. Efremov A.M., Boyko D.V., Sergeevtsev E.Yu., Trekin N.N., Kodysh E.N., Terekhov I.A., Shmakov S.D. Taking into account the joint effect of defects on the bearing capacity of structures. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2022; 8:11-18.