

ИНЖЕНЕРНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СРОКА БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

И. А. Терехов

Терехов Иван Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения», Российский университет транспорта» (МИИТ); ведущий научный сотрудник, Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений – ЦНИИПромзданий, г. Москва, Российская Федерация; тел.: + 7 (495) 482-44-65; e-mail: terekhov-i@mail.ru

В статье представлен инженерный метод определения срока безопасной эксплуатации железобетонных конструкций. Выполнен анализ исследований деградации бетона, подтверждающий правомерность линейной аппроксимации снижения прочности и, как следствие, несущей способности конструкций для практических расчетов. Проведена статистическая обработка архива натурных обследований 738 общественных и производственных зданий, выполненных АО «ЦНИИПромзданий». В результате обработки данных получена зависимость процента снижения несущей способности от срока эксплуатации, которая с высокой достоверностью аппроксимируется линейной функцией на интервале 0–25 лет. Полученные результаты верифицированы сопоставлением с данными нормативных методик. Разработанный метод может быть использован при оценке технического состояния, прогнозировании остаточного ресурса и планировании ремонтных мероприятий.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, деградация бетона, срок безопасной эксплуатации, несущая способность, остаточный ресурс, техническое состояние, натурные обследования, линейная аппроксимация, прогнозирование, коррозия бетона.

ENGINEERING METHOD FOR DETERMINING THE SAFE OPERATION PERIOD OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

I. A. Terekhov

Terekhov Ivan Aleksandrovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of «Building Structures, Buildings and Structures» Department, Russian University of Transport (MIIT); Leading Researcher, Central Research and Design and Experimental Institute of Industrial Buildings and Structures – TsNIIPromzdaniy, Moscow, Russian Federation, phone: + 7 (495) 482-44-65; e-mail: terekhov-i@mail.ru

The article presents an engineering method for determining the safe service life of reinforced concrete structures. It analyzes studies on concrete degradation, confirming the validity of linear approximation of the decrease in strength and, consequently, the load-bearing capacity of structures for practical calculations. The study involves statistical processing of an archive of field surveys of 738 public and industrial buildings conducted by JSC TsNIIPromzdaniy. The data processing results in a dependence of the percentage of decrease in load-bearing capacity on the service life, which is accurately approximated by a linear function in the range of 0–25 years. The obtained results are verified by comparison with the data of regulatory methods. The developed method can be used in assessing the technical condition, forecasting the residual resource and planning of repair measures.

Keywords: reinforced concrete structures, concrete degradation, safe operating period, load-bearing capacity, residual resource, technical condition, field surveys, linear approximation, forecasting, concrete corrosion.

Введение

Обеспечение безопасной эксплуатации зданий и сооружений на протяжении всего жизненного цикла является одной из ключевых задач строительной науки. В процессе эксплуатации железобетонные конструкции подвергаются воздействию различных неблагоприятных факторов, приводящих к деградации бетона – постепенному ухудшению его физико-механических свойств и, как следствие, снижению несущей способности конструкций в целом [1, 2]. По результатам обследований необходимо достоверно прогнозировать это снижение во времени [3, 4], принимать решения о проведении ремонтных мероприятий, а также определять остаточный ресурс [5–7].

Настоящее исследование посвящено разработке инженерного метода определения срока безопасной эксплуатации железобетонных конструкций, основанного на линейной модели снижения несущей способности.

Материалы и методы

Анализ исследований, посвященных деградации бетона

Ряд работ указывает на нелинейный [8–10] характер снижения прочности бетона, обусловленный сложными физико-химическими процессами накопления повреждений. Однако анализ показывает, что для части деградационных процессов характерно линейное или близкое к линейному снижение прочности бетона (или глубины поражения) во времени [11].

Одним из наиболее показательных примеров линейной зависимости является глубина сульфатного разрушения бетона [12]. Дж. К. Уолтон, Л. Э. Плански и Р. В. Смит установили, что глубина разрушения $x(t)$ практически линейно зависит от времени [13]:

$$x(t) = K \cdot t,$$

где K – константа, определяемая содержанием трехкальциевого алюмината в бетоне и концентрацией сульфатной среды. Это позволяет прогнозировать срок службы конструкций в условиях сульфатной агрессии на основе линейной экстраполяции данных натурных наблюдений.

Экспериментальные исследования воздействия минеральных масел также демонстрируют устойчивую тенденцию к равномерному снижению прочности во времени. В работе Н. М. Васильева [14] приведены результаты 3,5-летних испытаний бетонных образцов, погруженных в минеральное масло. Установлено, что снижение прочности происходит с относительно постоянной скоростью, особенно на сроках от 1,5 до 3,5 лет, причем для бетонов с большим водоцементным отношением (при увеличении пористости образцов) скорость падения выше. Аналогичные результаты получены в исследованиях пропитки растительными маслами [15], где авторы отмечают систематическое снижение прочности пропорционально продолжительности воздействия.

Обобщенные результаты обследований реальных конструкций указывают и на возможность линейной аппроксимации процесса снижения прочности. В работе В. Б. Николаева и Е. А. Климова [16] приведен график изменения длительной прочности бетона по данным Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники имени Б. Е. Веденеева, на котором снижение происходит по близкой к линейной зависимости (рис. 1).

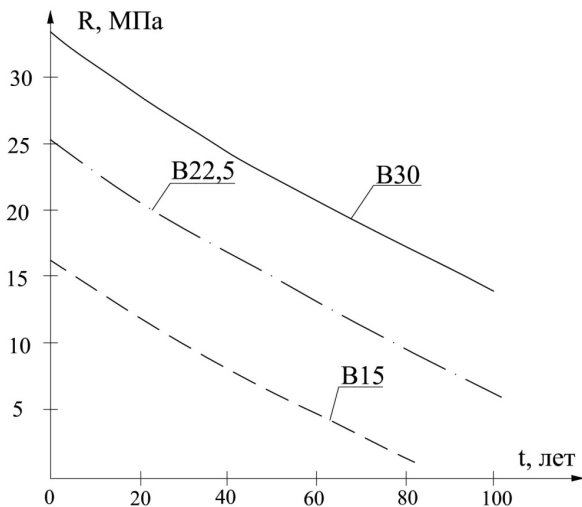


Рис.1. Изменение прочности бетона (по данным [16])
Fig. 1. Change in concrete strength (according to [16])

В методике [17] значение прочности через T лет в результате деградационных процессов предложено определить по линейной зависимости:

$$R_{b,Ti} = \gamma_{R,b} R_b,$$

где R_b – расчетное сопротивление бетона; $\gamma_{R,b}$ – коэффициент условий работы:

$$\gamma_{R,b} = 1 - K_s \cdot K_t \cdot \Delta_R \cdot \omega \cdot T_i,$$

где K_s – коэффициент, зависящий от агрессивности воды (среды); K_t – коэффициент, учитывающий увеличение протекания скорости деградационных процессов в призмах по сравнению с кубами; Δ_R –

учитывает при заданной влажности влияние на бетон циклов замораживания и оттаивания; ω – учитывает уровень напряженности на скорость протекания деградационного процесса.

Для применения методики [18], позволяющей построить фактическую кривую изменения прочности бетона, необходимо иметь данные на момент строительства и данные детального обследования. График изменения прочности бетона во времени находится путем суммирования кривой набора и линейной зависимости снижения прочности (рис. 2).

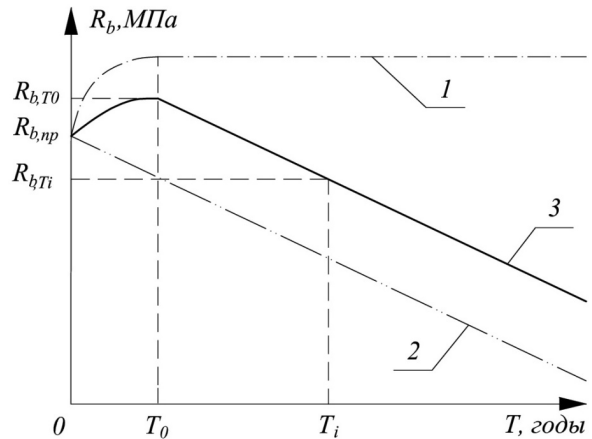


Рис. 2. Изменение прочности бетона во времени [18]:
1 – кривая набора прочности; 2 – кривая снижения прочности (деградации); 3 – суммарная кривая прочности бетона

Fig. 2. Change in concrete strength over time [18]:
1 – strength gain curve; 2 – strength reduction (degradation) curve; 3 – total concrete strength curve

Кривая набора прочности строится по двум характерным точкам: в момент строительства и на момент завершения ее нарастания. По документации необходимо определить прочность бетона в возрасте 28 сут., а при отсутствии сведений допускается принимать данные по проекту $R_{b,np}$.

В методике [18] приведены справочные материалы, по которым можно принять значение прочности бетона после нарастания в возрасте 10 лет. Например, для бетона класса В30 значение коэффициента увеличения прочности составляет 1,31, а для бетона класса В40 – 1,26.

Далее от точки T_0 (точки начала деградации) строят график снижения прочности по фактическим значениям прочности бетона в момент проведения детального обследования, который принят по линейной зависимости.

Проведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что для инженерных расчетов снижение прочности бетона допустимо принимать по линейному закону.

Определение зависимости снижения несущей способности зданий с железобетонными конструкциями по результатам анализа обследований

Для определения зависимости снижения несущей способности железобетонных конструкций в период эксплуатации были рассмотрены и проанализированы архивные материалы обследований, выполняемые сотрудниками Центрального

научно-исследовательского и проектно-экспериментального института промышленных зданий и сооружений. Здания и сооружения располагались в различных климатических зонах, различались интенсивностью нагрузок и воздействий, влияющих на образование и развитие дефектов [19].

База данных включала сведения о результатах обследований 738 общественных и производственных зданий и сооружений с железобетонными конструкциями. В работе [20] было выполнено исследование продолжительности периодов безопасной эксплуатации зданий с железобетонными конструкциями. Распределение объектов по типу несущих конструкций (Ж/Б – железобетонные, КАМ – каменные, МК – металлические) показано на рисунке 3.

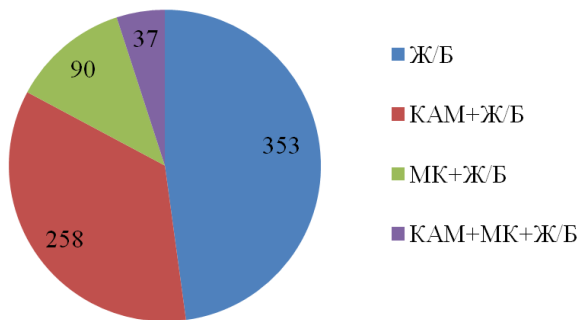


Рис. 3. Распределение объектов по типу несущих конструкций (иллюстрация автора)
Fig. 3. Distribution of objects by type of load-bearing structures (illustration by the author)

Было определено общее количество дефектов для отдельных категорий технического состояния (рис. 4). Наибольшее количество дефектов железобетонных конструкций обнаружено в зданиях с ограниченно работоспособным состоянием.

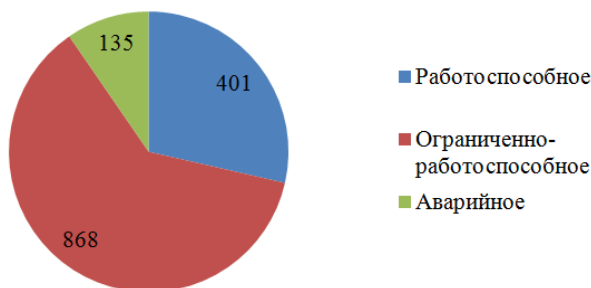


Рис. 4. Общее количество дефектов в зданиях по категориям технического состояния (иллюстрация автора)
Fig. 4. Total number of defects in buildings by technical condition category (illustration by the author)

На рисунке 5 представлено среднее количество дефектов для каждой категории технического состояния для зданий среди всех типов несущих конструкций. Нарастание количества дефектов сопровождается снижением категории технического состояния объекта.

По результатам обработки отчетов для зданий с железобетонными конструкциями было получено среднее количество дефектов $\sum n$ в зависимости от категории технического состояния и срока эксплуатации здания с шагом в пять лет (табл.).

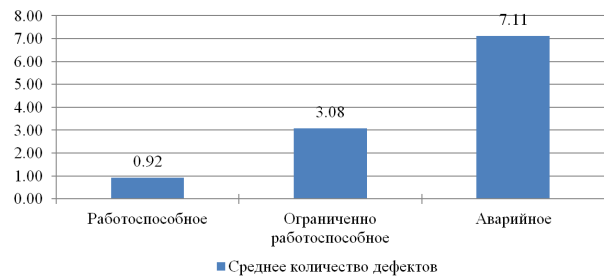


Рис. 5. Среднее количество дефектов в зданиях различных категорий технического состояния (иллюстрация автора)
Fig. 5. Average number of defects in buildings of various technical condition categories (illustration by the author)

Далее определялось $\sum n\psi$ – произведение среднего количества дефектов и процентов несущей способности, характеризующих работоспособное, ограниченно работоспособное и аварийное состояния, принятых 100, 90 и 75 % соответственно [21].

Итоговый процент сниженной несущей способности для конкретного срока эксплуатации принимался равным отношению $\sum n\psi / \sum n$.

График, демонстрирующий процент сниженной несущей способности, полученный по результатам анализа архивных данных обследований, приведен на рисунке 6.

Необходимо отметить, что на графике имеется два участка, соответствующие росту несущей способности. Это связано с проведением в зданиях текущего и капитального ремонта.

Наиболее сильное падение несущей способности отмечается на участке 0–25 лет, по сравнению с участком 30–50 лет. Объясняется значительным количеством дефектов, которые возникают в доэксплуатационной стадии работы конструкций – в период изготовления, транспортирования и монтажа, которые в дальнейшем могут усугублять состояние конструкций. Данные дефекты устраняются в рамках ремонтов, после которых они больше не должны оказывать влияние на состояние конструкций. На этапе 30–50 лет наибольший вклад в развитие дефектов вносят деградиационные процессы материалов несущих конструкций. Нарушение условий эксплуатации в любой промежуток времени влияет негативно. Однако в качестве итоговой функции принят наихудший вариант, соответствующий скорости изменения несущей способности в период от 0 до 25 лет.

Для значений, входящих в данный промежуток времени, аппроксимация в виде линейной функции будет выражаться по формуле:

$$\Phi = 98,77 - 0,49t, \%$$

При этом достоверность аппроксимации $R^2 = 0,9805$ (рис. 7), что близко к 1,0 и говорит о большой степени соответствия принятой аппроксимации.

На основании представленных данных можно сделать вывод, что изменение несущей способности при выполнении практических расчетов по определению общих сроков службы эксплуатируемых зданий связано с применением линейной зависимости. Полученные результаты подтверждаются проведенным анализом исследований, посвященных деградациии бетона.

Таблица

Определение процента снижения несущей способности

№ п/п	Срок эксплуатации здания	Среднее количество выявленных дефектов различных категорий технического состояния несущих конструкций при средней площади объекта в 650 м ²			Суммарное среднее количество выявленных дефектов на площади 650 м ² , $\sum n = n_1 + n_2 + n_3$	Произведение среднего количества дефектов и процента несущей способности			$\sum n\psi = n_1\psi_1 + n_2\psi_2 + n_3\psi_3$	Процент сниженной несущей способности $\sum n\psi / \sum n$
		Работоспособное, n_1	Ограничено работоспособное, n_2	Аварийное, n_3		Работоспособное, $n_1\psi_1$	Ограничено работоспособное, $n_2\psi_2$	Аварийное, $n_3\psi_3$		
						$\psi_1 = 100\%$	$\psi_2 = 90\%$	$\psi_3 = 75\%$		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2	0-5 лет	0,658	0,162	0,000	0,821	65,81	14,62	0,00	80,43	98,0
3	5-10 лет	0,607	0,786	0,000	1,393	60,71	70,71	0,00	131,43	94,4
4	10-15 лет	0,367	0,583	0,083	1,033	36,67	52,50	6,25	95,42	92,3
5	15-20 лет	0,294	1,588	0,098	1,980	29,41	142,94	7,35	179,71	90,7
6	20-25 лет	0,259	1,517	0,569	2,345	25,86	136,55	42,67	205,09	87,5
7	25-30 лет	0,771	1,943	0,686	3,400	77,14	174,86	51,43	303,43	89,2
8	30-35 лет	1,439	2,333	0,212	3,985	143,94	210,00	15,91	369,85	92,8
9	35-40 лет	0,416	1,382	0,079	1,876	41,57	124,38	5,90	171,85	91,6
10	40-45 лет	0,436	1,308	0,244	1,987	43,59	117,69	18,27	179,55	90,4
11	45-50 лет	0,308	0,667	0,205	1,179	30,77	60,00	15,38	106,15	90,0
12	50-55 лет	0,276	1,897	0,000	2,172	27,59	170,69	0,00	198,28	91,3
13	55-60 лет	0,350	1,800	0,750	2,900	35,00	162,00	56,25	253,25	87,3

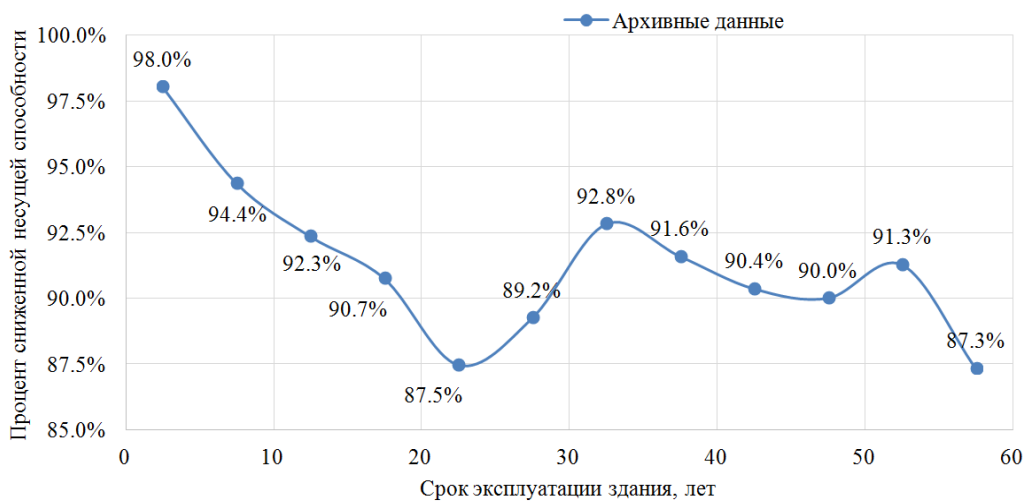


Рис. 6. Изменение процента сниженной несущей способности в период эксплуатации здания (иллюстрация автора)
 Fig. 6. Change in the percentage of reduced load-bearing capacity during the building's operation (illustration by the author)

Дополнительную верификацию полученной зависимости проведем с помощью данных, представленных в методиках [18, 22]. Для этого примем базовый срок эксплуатации в 10 лет с момента обследования по аналогии с максимально допустимым сроком между обследованиями по ГОСТ 31937-2024 «Здания

и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния».

На рисунке 8 график снижения несущей способности в период эксплуатации был совмещен с графиком, построенным по формулам работы [22] (данные [21]).

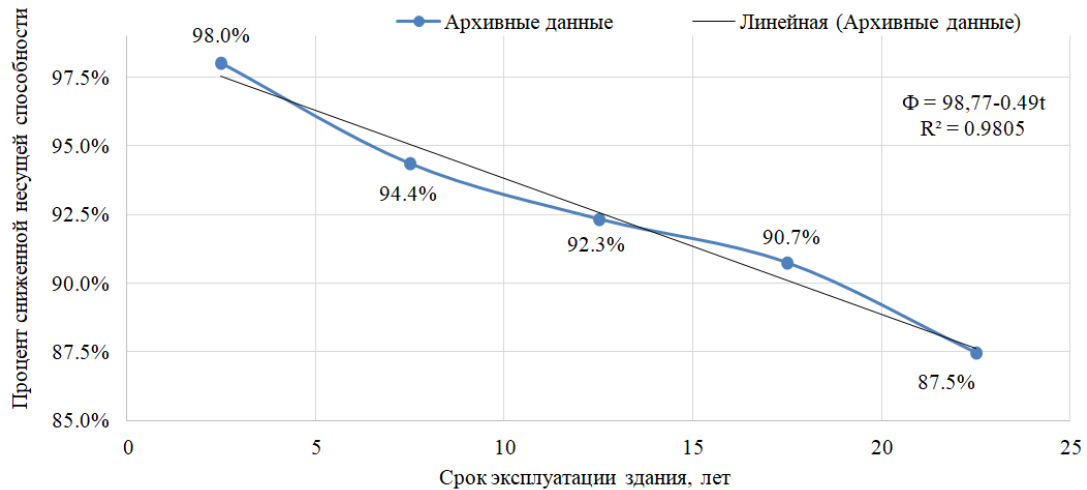


Рис. 7. Аппроксимация изменения процента сниженной несущей способности (иллюстрация автора)
Fig. 7. Approximation of the change in reduced load-bearing capacity percentage (illustration by the author)

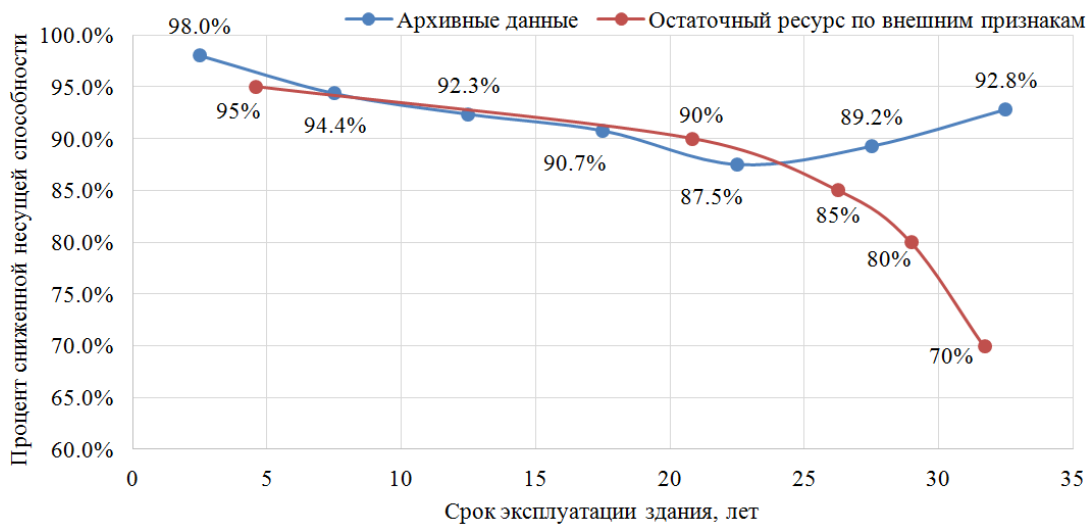


Рис. 8. Графики зависимости процента сниженной несущей способности от срока эксплуатации объекта строительства (иллюстрация автора)
Fig. 8. Graphs of the percentage of reduced load-bearing capacity versus the service life of the construction object (illustration by the author)

Идеализированный график, построенный по формулам работы [22], не учитывает проведение капитальных ремонтов и имеет характер резкого снижения несущей способности, связанного с ускоренной деградацией материала при накоплении большого количества дефектов в зонах коэффициента состояния 0,85...0,7.

Однако, анализируя зону эксплуатации на протяжении 20 лет в границах процента снижения несущей способности от 95 до 85 %, значительных отклонений при применении данной функции не наблюдается, что свидетельствует о корректности полученной зависимости снижения несущей способности, а также соблюдения необходимого уровня безопасности.

Разработка инженерного метода определения срока безопасной эксплуатации

В рамках методики [21], как было написано выше, приняты проценты сниженной несущей способности

$\Phi_{огр. раб.} = 90 \%$ и $\Phi_{авар} = 75 \%$ для ограниченно работоспособного и аварийного состояния соответственно.

В качестве критерия работоспособности конструкции будет выступать условие:

$$\Phi_{факт} > \Phi_{авар}$$

Определим значения времени $t_{авар}$, соответствующие $\Phi_{авар} = 75 \%$ для полученной ранее зависимости:

$$t_{авар} = \frac{98,77 - \Phi_{авар}}{0,49} = \frac{98,77 - 75}{0,49} = 48,5 \text{ лет.}$$

Далее определяем время $t_{факт}$ (рис. 9), отвечающее $\Phi_{факт}$ фактическому значению процента сниженной несущей способности:

$$t_{факт} = \frac{98,77 - \Phi_{факт}}{0,49}$$

Разница между полученными значениями будет соответствовать остаточному сроку службы здания до капитального ремонта:

$$T_{кап.рем} = t_{авар} - t_{факт}$$

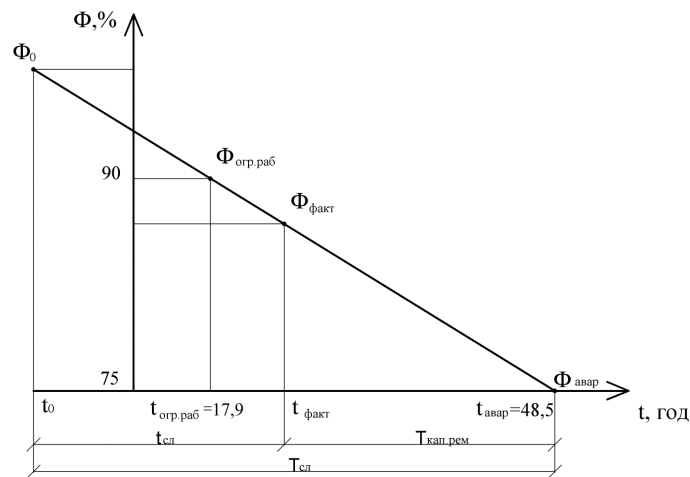


Рис. 9. График линейного закона снижения несущей способности (иллюстрация автора)
Fig. 9. Graph of the linear law of load-bearing capacity reduction (illustration by the author)

Общий срок службы составит:

$$T_{сл} = t_{сл} + T_{кап.рем}$$

Рассмотрим применение данного подхода по определению общего срока службы на примере железобетонной колонны с фактическим сроком службы $t_{сл} = 50$ лет и процентом сниженной несущей способности $\Phi_{факт} = 85\%$, что соответствует ограниченно работоспособному состоянию. Определим значения $t_{факт}$ и $T_{кап.рем}$:

$$t_{факт} = \frac{98,77 - 85}{0,49} = 28,1 \text{ год,}$$

$$T_{кап.рем} = t_{авар} - t_{факт} = 48,5 - 28,1 = 20,4 \text{ год.}$$

Общий срок службы колонны:

$$T_{сл} = 50 + 20,4 = 70,4 \text{ год.}$$

Можно также определить исходное значение процента несущей способности по отношению к нагрузке:

$$\begin{aligned} \Phi_0 &= 98,77 - 0,49(t_{факт} - t_{сл}) = \\ &= 98,77 - 0,49(28,1 - 50) = 109,5\%, \end{aligned}$$

что свидетельствует о дополнительных заложенных при проектировании запасов порядка 10 % относительно проектных значений нагрузок.

Выводы

1. В результате статистической обработки данных натурных обследований 738 зданий с железобетонными конструкциями установлено, что снижение несущей способности во времени с высокой степенью достоверности аппроксимируется линейной зависимостью. Это подтверждает данные проанализированных исследований о линейном или близком к линейному характере протекания деградационных процессов в бетоне при длительной эксплуатации.

2. Выполнена верификация предложенной линейной модели путем сопоставления с данными существующих методик. Анализ показал удовлетворительную сходимость результатов в диапазоне снижения несущей способности от 95 до 85 %, что соответствует интервалам между плановыми обследованиями и подтверждает корректность принятой зависимости для инженерных расчетов.

3. Разработан инженерный метод определения срока безопасной эксплуатации железобетонных конструкций. Предложенный метод может быть рекомендован для практического применения при оценке технического состояния, прогнозировании остаточного ресурса и планировании ремонтных мероприятий эксплуатируемых зданий и сооружений.

Список литературы

1. Perelmuter A. Ways of developing assessments of the technical condition of buildings and structures / A. Perelmuter // Strength of Materials and Theory of Structures. – 2024. – № 112. – P. 28–35. – DOI 10.32347/2410-2547.2024.112.28-35. – EDN XRKFPD.
2. Vanus D. S. Calculation and forecasting of operational durability of reinforced concrete structures / D. S. Vanus, A. A. Zharikhin // E3S Web of Conferences. – 2024. – Vol. 533. – P. 02025. – DOI 10.1051/e3sconf/202453302025. – EDN UXMIFJ.
3. Петрова И. Ю. Обзор процесса проведения обследования зданий и сооружений. Проблемы и пути решения / И. Ю. Петрова, О. О. Мостовой // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2021. – № 1 (35). – С. 69–75. – EDN KGUCUU.
4. Савин С. Н. Контроль технического состояния зданий и сооружений по их динамическим характеристикам / С. Н. Савин, Ч. Д. Фан // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2024. – № 1 (47). – С. 20–27. – DOI 10.52684/2312-3702-2024-47-1-20-27. – EDN EZGXVH.
5. Мирсаяпов И. Т. Оценка остаточной несущей способности эксплуатируемых железобетонных конструкций / И. Т. Мирсаяпов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2022. – № 2 (60). – С. 6–14. – DOI 10.52409/20731523_2022_2_6. – EDN AHUKL.
6. Пшеничкина В. А. Оценка остаточного ресурса железобетонных балок объекта промышленного назначения с учетом коррозионного износа / В. А. Пшеничкина, Б. С. Гриценко, А. В. Глухов и др. // Вестник Московского государственного строительного университета. – 2023. – Т. 18, № 4. – С. 533–544. – DOI 10.22227/1997-0935.2023.4.533-544. – EDN DBLSYW.
7. Скоробогатов С. М. К расчету остаточного ресурса железобетонных конструкций существующих зданий и сооружений / С. М. Скоробогатов, А. В. Куршпель // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2016. – № 3 (31). – С. 148–155. – DOI 10.20291/2079-0392-2016-3-148-155. – EDN WYHOEN.

8. Гордеева Т. Е. Учет изменений во времени характеристик бетона при планировании реконструкции застройки / Т. Е. Гордеева // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2007. – Т. 1, № 1 (21). – С. 116–119. – EDN KZTLGN.
9. Руководство по методике оценки ресурса работоспособности и безопасности бетонных и железобетонных конструкций гидротехнических сооружений. – Санкт-Петербург : Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники имени Б. Е. Веденеева, 1997. – 55 с.
10. Садоян Г. А. Прогнозирование срока службы изгибаемых железобетонных конструкций на основе оценки надежности их технического состояния / Г. А. Садоян, А. Г. Тамразян // Инженерный вестник Дона. – 2024. – № 6 (114). – С. 429–442. – EDN CMZIBK.
11. Золина Т. В. Порядок проведения обследования здания с целью последующей оценки его остаточного ресурса / Т. В. Золина // Вестник Московского государственного строительного университета. – 2014. – № 11. – С. 98–108. – EDN SZCFRC.
12. Тамразян А. Г. Методология анализа и оценки надежности состояния и прогнозирование срока службы железобетонных конструкций / А. Г. Тамразян // Железобетонные конструкции. – 2023. – Т. 1, № 1. – С. 5–18. – EDN MGOLLW.
13. Walton J. C. Models for Estimation of Service Life of Concrete Barriers in Low-Level Radioactive Waste Disposal / J. C. Walton, L. E. Plansky, R. W. Smith. – NUREG/CR-5542, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, 1990.
14. Васильев Н. М. Влияние минеральных масел на физико-механические свойства бетона и его защита : дисс. ... канд. техн. наук / Н. М. Васильев. – Москва, 1966. – 232 с.
15. Свинцов А. П. Влияние растительных масел на прочность бетона и цементно-песчаного раствора в зависимости от продолжительности промасливания / А. П. Свинцов, Р. С. Федюк, Н. А. Абд // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2021. – № 10 (754). – С. 88–108. – DOI 10.32683/0536-1052-2021-754-10-88-108. – EDN CUKBAY.
16. Николаев В. Б. Определение критериев безопасности строительных конструкций АЭС / В. Б. Николаев, Е. А. Климов // ATOMSRO.RU. – 2016. – 18 с. – Режим доступа: <https://atomsro.ru/ob-assotsiatsii/konferentsiia-atomstroistandart-2016/kruglyi-stol-obespechenie-bezopasnosti-obektov-ispolzovaniia-atomnoi-energii-kliuchevoi-faktor-konkurentosposobnosti-proektov/> (дата обращения: 25.02.2026), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
17. Методика расчетного прогнозирования срока службы железобетонных пролетных строений автодорожных мостов. – Москва : Информавтодор, 2002. – 140 с.
18. Методика оценки остаточного ресурса несущих конструкций зданий и сооружений. – Москва, 2018. – 50 с. – Режим доступа: <https://api.faufcc.ru/api/assets/08c7b576-e760-4f43-9879-5883c057f3d6> (дата обращения: 25.02.2026), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
19. Федоров В. С. Критерии для оценки категории технического состояния железобетонных колонн, ригелей, балок и ферм / В. С. Федоров, Н. Н. Трекин, Э. Н. Кодыш, И. А. Терехов // Строительство и реконструкция. – 2023. – № 3 (107). – С. 58–69. – DOI 10.33979/2073-7416-2023-107-3-58-69. – EDN ZTABZK.
20. Терехов И. А. Продолжительность периодов безопасной эксплуатации зданий и сооружений с железобетонными конструкциями / И. А. Терехов, Н. Н. Трекин, Э. Н. Кодыш, С. Д. Шмаков // Промышленное и гражданское строительство. – 2024. – № 4. – С. 20–27. – DOI 10.33622/0869-7019.2024.04.20-27. – EDN UCDRWL.
21. Трекин Н. Н. Методика определения эксплуатационной безопасности зданий и их конструкций / Н. Н. Трекин, Э. Н. Кодыш, И. А. Терехов и др. // Academia. Архитектура и строительство. – 2022. – № 4. – С. 152–159. – DOI 10.22337/2077-9038-2022-4-152-159. – EDN XLNAPW.
22. Рекомендации по оценке надежности строительных конструкций зданий и сооружений по внешним признакам. – Москва : ФГУП ЦПП, 2001. – 100 с.

References

1. Perelmuter A. Ways of developing assessments of the technical condition of buildings and structures. *Strength of Materials and Theory of Structures*. 2024, no. 112, pp. 28–35. DOI 10.32347/2410-2547.2024.112.28-35.
2. Vanus D. S., Zharikhin A. A. Calculation and forecasting of operational durability of reinforced concrete structures. *E3S Web of Conferences*. 2024, vol. 533, pp. 02025. DOI 10.1051/e3sconf/202453302025.
3. Petrova I. Yu., Mostovoy O. O. Obzor protsessa provedeniya obsledovaniya zdaniy i sooruzhenii. Problemi i puti resheniya [Review of the buildings survey process. problems and ways of solution]. *Inzhenerno-stroitel'nyy vestnik Prikaspiya* [Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region]. 2021, no. 1 (35), pp. 69–75. (In Russian). EDN KGUCUU.
4. Savin S. N., Fan C. D. Kontrol tekhnicheskogo sostoyaniya zdaniy i sooruzhenii po ikh dinamicheskim kharakteristikam [Control of the technical condition of buildings and structures by their dynamic characteristics]. *Inzhenerno-stroitel'nyy vestnik Prikaspiya* [Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region]. 2024, no. 1 (47), pp. 20–27. DOI 10.52684/2312-3702-2024-47-1-20-27. (In Russian). EDN EZGXVH.
5. Mirsayapov I. T. Otsenka ostatochnoi nesushchei sposobnosti ekspluatiruemikh zhelezobetonnykh konstruktssii [Evaluation of the residual load-bearing capacity of operated reinforced concrete structures]. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta* [News of the Kazan State University of Architecture and Engineering]. 2022, no. 2 (60), pp. 6–14. DOI 10.52409/20731523_2022_2_6. (In Russian). EDN AHRUKL.
6. Pshenichkina V. A., Gritsenko B. S., Glukhov A. V., et al. Otsenka ostatochnogo resursa zhelezobetonnykh balok objekta promishlennogo nazna-cheniya s uchetom korrozionnogo iznosa [Estimation of the residual service life of reinforced concrete beams of an industrial facility taking into account corrosion wear]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta* [Bulletin of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2023, vol. 18, no. 4, pp. 533–544. DOI 10.22227/1997-0935.2023.4.533-544. (In Russian). EDN DBLSYW.
7. Skorobogatov S. M., Kurshpel A. V. K raschetu ostatochnogo resursa zhelezobetonnykh konstruktssii sushchestvuyushchikh zdaniy i sooruzhenii [On calculation of remaining life time of reinforced concrete structures of existing buildings and facilities]. *Vestnik Uralskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Bulletin of the Ural State University of Railway Transport]. 2016, no. 3 (31), pp. 148–155. DOI 10.20291/2079-0392-2016-3-148-155. (In Russian). EDN WYHOEN.
8. Gordeeva T. Ye. Uchet izmeneniy vo vremeni kharakteristik betona pri planirovanii rekonstruktssii zastroiiki [Concrete changes registration in time at a building reconstruction planning]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Saratov State Technical University]. 2007, vol. 1, no. 1 (21), pp. 116–119. (In Russian). EDN KZTLGN.

9. *Rukovodstvo po metodike otsenki resursa rabotosposobnosti i bezopasnosti betonnikh i zhelezobetonnikh konstruksii gidrotekhnicheskikh sooruzhenii* [Guidelines on the methodology for assessing the service life and safety of concrete and reinforced concrete structures of hydraulic engineering installations]. Saint Petersburg: Vserossiiskii nauchno-issledovatel'skii institut gidrotekhniki imeni B. Ye. Vedeneeva; 1997, 55 p. (In Russian).
10. Sadoyan G. A., Tamrazyan A. G. Prognozirovanie sroka sluzhby izgibaemikh zhelezobetonnikh konstruksii na osnove otsenki nadezhnosti ikh tekhnicheskogo sostoyaniya [Predicting the service life of bendable reinforced concrete structures based on assessing the reliability of their technical condition]. *Inzhenernii vestnik Dona* [Engineering Journal of Don]. 2024, no. 6 (114), pp. 429–442. (In Russian). EDN CMZIBK.
11. Zolina T. V. Poryadok provedeniya obsledovaniya zdaniya s tselyu posleduyushchei otsenki yego ostatochnogo resursa [Inspection procedure of buildings for the purpose of subsequent assessment of their residual life]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta* [Bulletin of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2014, no. 11, pp. 98–108. (In Russian). EDN SZCFRCR.
12. Tamrazyan A. G. Metodologiya analiza i otsenki nadezhnosti sostoyaniya i prognozirovanie sroka sluzhby zhelezobetonnikh konstruksii [Methodology for the analysis and assessment of the reliability of the state and prediction the service life of reinforced concrete structures]. *Zhelezobetonnie konstruksii* [Reinforced Concrete Structures]. 2023, vol. 1, no. 1, pp. 5–18. (In Russian). EDN MGOLLW.
13. Walton J. C., Plansky L. E., Smith R. W. *Models for Estimation of Service Life of Concrete Barriers in Low-Level Radioactive Waste Disposal*. NUREG/CR-5542, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC; 1990.
14. Vasilev N. M. *Vliyanie mineralnikh masel na fiziko-mekhanicheskie svoystva betona i yego zashchita* [Influence of mineral oils on the physical and mechanical properties of concrete and its protection]. Moscow; 1966. 232 p. (In Russian).
15. Svintsov A. P., Fedyuk R. S., Abd N. A. A. Vliyanie rastitelnykh masel na prochnost betona i tsementno-peschanogo rastvora v zavisimosti ot prodolzhitel'nosti promaslivaniya [The effect of vegetable oils on the strength of concrete and cement-sand mortar, depending on the duration of oiling]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2021, no. 10 (754), pp. 88–108. DOI 10.32683/0536-1052-2021-754-10-88-108. (In Russian). EDN CUKBAY.
16. Nikolaev V. B., Klimov E. A. Opredelenie kriteriev bezopasnosti stroitel'nykh konstruksii AES [Determination of safety criteria for building structures of nuclear power plants]. *ATOMSRO.RU*. 2016. 18 p. Available at: <https://atomsro.ru/ob-assotsiatsii/konferentsiia-atomstroistandart-2016/kruglyi-stol-obespechenie-bezopasnosti-obektov-ispolzovaniia-atomnoi-energii-kliuchevoi-faktor-konkurentosposobnosti-proektov/> (accessed: 25.02.2026). (In Russian).
17. *Metodika raschetnogo prognozirovaniya sroka sluzhbi zhelezobetonnikh proletnykh stroenii avtodorozhnykh mostov* [Methodology for computational forecasting of the service life of reinforced concrete spans of road bridges]. Moscow: Informavtodor; 2002. 140 p. (In Russian).
18. *Metodika otsenki ostatochnogo resursa nesushchikh konstruksii zdanii i sooruzhenii* [Methodology for assessing the residual resource of load-bearing structures of buildings and structures]. Moscow; 2018. 50 p. Available at: <https://api.faufcc.ru/api/assets/08c7b576-e760-4f43-9879-5883c057f3d6> (accessed: 25.02.2026). (In Russian).
19. Fedorov V. S., Trekin N. N., Kodish E. N., Terekhov I. A. Kriterii dlya otsenki kategorii tekhnicheskogo sostoyaniya zhelezobetonnykh kolonn, rigelei, balok i ferm [Criteria for assessing the category of technical condition of reinforced concrete columns, crossbars, beams and trusses]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya* [Building and Reconstruction]. 2023, no. 3 (107), pp. 58–69. DOI 10.33979/2073-7416-2023-107-3-58-69. (In Russian). EDN ZTABZK.
20. Terekhov I. A., Trekin N. N., Kodish E. N., Shmakov S. D. Prodolzhitel'nost periodov bezopasnoi ekspluatatsii zdanii i sooruzhenii s zhelezobetonnyimi konstruksiyami [Duration of periods of safe operation of buildings and structures with reinforced concrete structures]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering]. 2024, no. 4, pp. 20–27. DOI 10.33622/0869-7019.2024.04.20-27. (In Russian). EDN UCDRWL.
21. Trekin N. N., Kodish E. N., Terekhov I. A., et al. Metodika opredeleniya ekspluatatsionnoi bezopasnosti zdanii i ikh konstruksii [Methodology for determining the operational safety of buildings and their structures]. *Academiya. Arkhitektura i stroitel'stvo* [Academia. Architecture and Construction]. 2022. no. 4, pp. 152–159. DOI 10.22337/2077-9038-2022-4-152-159. (In Russian). EDN XLNAPW.
22. *Rekomendatsii po otsenke nadezhnosti stroitel'nykh konstruksiiu zdaniyu i sooruzheniyu po vneshnim priznakam* [Recommendations for assessing the reliability of building structures of buildings and structures based on external signs]. Moscow: FGUP TsPP; 2001. 100 p. (In Russian).

© И. А. Терехов

Ссылка для цитирования:

Терехов И. А. Инженерный метод определения срока безопасной эксплуатации железобетонных конструкций // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2026. № 1 (55). С. 5–12.

УДК 624.075

DOI 10.52684/2312-3702-2026-55-1-12-20

СИЛОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАМНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ХРУПКОМ И ПЛАСТИЧЕСКОМ РАЗРУШЕНИИ**П. А. Кореньков, С. Е. Хохлунов**

Кореньков Павел Анатолиевич, кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация, тел.: + 7 (495) 287-49-14 доб. 1765; e-mail: kpa_gbk@mail.ru;

Хохлунов Сергей Евгеньевич, студент, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация, тел.: + 7 (910) 854-87-35; e-mail: khokhlunov02mf@mail.ru