

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 691.328.1
DOI 10.52684/2312-3702-2026-56-2-5-12

МОДЕЛЬ СНИЖЕНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ В РАМКАХ МЕТОДОЛОГИИ ОЦЕНКИ КОНСТРУКТИВНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И ЗДАНИЙ

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 представлена обобщенная математическая модель снижения несущей способности железобетонных конструкций на протяжении срока службы, учитывающая отдельно потери на доэксплуатационной стадии (изготовление, транспортирование, монтаж) и в процессе эксплуатации под воздействием деградиционных факторов и имеющихся дефектов. Модель позволяет описывать изменение несущей способности как при линейном, так и при нелинейном характере деградации, а также учитывать ремонтные воздействия путем кусочно-заданного изменения параметров. Введены количественные границы для ограниченно работоспособного и аварийного состояний. Разработан метод перехода от оценки отдельных конструкций к оценке здания в целом с использованием величин значимости, определенных методом Дельфи для различных конструктивных систем. Получены аналитические выражения для прогнозирования срока безопасной эксплуатации здания до капитального ремонта. Предложенная модель служит основой методологии оценки конструктивной безопасности железобетонных элементов и зданий массового применения.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, конструктивная безопасность, деградация бетона, срок безопасной эксплуатации, несущая способность, остаточный ресурс, капитальный ремонт, техническое состояние, натурные обследования, линейная аппроксимация.

A MODEL FOR REDUCING LOAD-BEARING CAPACITY WITHIN THE FRAMEWORK OF THE METHODOLOGY FOR ASSESSING THE STRUCTURAL SAFETY OF REINFORCED CONCRETE ELEMENTS AND BUILDINGS

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 a generalized mathematical model of the reduction of the load-bearing capacity of reinforced concrete structures over the service life, which takes into account the separate losses at the pre-operational stage (manufacturing, transportation, and installation) and during operation under the influence of degradation factors and existing defects. The model allows for the description of changes in the load-bearing capacity in both linear and nonlinear degradation scenarios, as well as for the consideration of repair interventions through piecewise-defined parameter changes. Quantitative boundaries have been introduced for the limited operational and emergency states. A method has been developed for transitioning from the assessment of individual structures to the assessment of the building as a whole, using significance values determined by the Delphi method for various structural systems. Analytical expressions have been obtained for predicting the safe operation period of a building before major repairs. The proposed model serves as the basis for the methodology for assessing structural safety.

Keywords: reinforced concrete structures, structural safety, concrete degradation, safe service life, bearing capacity, residual resource, major repairs, technical condition, field surveys, linear approximation.

Введение

Конструктивная безопасность зданий и сооружений определяется способностью конструкций и зданий противостоять разрушению и потере устойчивости, с целью исключения возможности их перехода в аварийное техническое состояние, которое может быть обусловлено дефектами, полученными в доэксплуатационной стадии и при эксплуатации, деградацией материала, влиянием окружающей среды и т. д. [3, 9, 11].

В качестве исходных данных для оценки конструктивной безопасности несущих конструкций,

зданий и сооружений используются результаты обследования [2, 19], по результатам которого в том числе должны быть установлены:

- типы и параметры всех выявленных дефектов, в том числе первичных;
- взаимное расположение дефектов на отдельных строительных конструкциях.

Последовательность оценки конструктивной безопасности в общем виде представлена на рисунке 1.

Отдельные положения методологии были раскрыты в статьях [13–15].

Целью данной статьи является описание обобщенной модели снижения несущей способности, которая легла в основу разработки методологии.

Формулировка обобщенной модели снижения несущей способности

В рамках предлагаемой модели под проектной несущей способностью конструкции Φ_{np} подразумевается значение, определяемое расчетами по методу предельных состояний, согласно действующим строительным нормам [6–7]. Данная величина характеризует работоспособное техническое состояние, предусмотренное проектом, и может выражаться как в абсолютных показателях, так и в относительных единицах (1,0 или 100 %) в зависимости от выбранной шкалы измерений.

Важным для понимания предлагаемой модели является положение, которое заключается в том, что проектная несущая способность Φ_{np} , принимаемая за 100 %, уже учитывает требования по обеспечению надежности, заложенные в методе предельных состояний. Поэтому значение Φ_{np} – это минимально гарантированная несущая способность, которую конструкция должна обеспечить с учетом всех возможных неблагоприятных отклонений. Именно поэтому снижение несущей способности относительно Φ_{np} в процессе эксплуатации допустимо лишь в определенных пределах – до тех пор, пока сохраняется запас, изначально заложенный системой коэффициентов надежности.

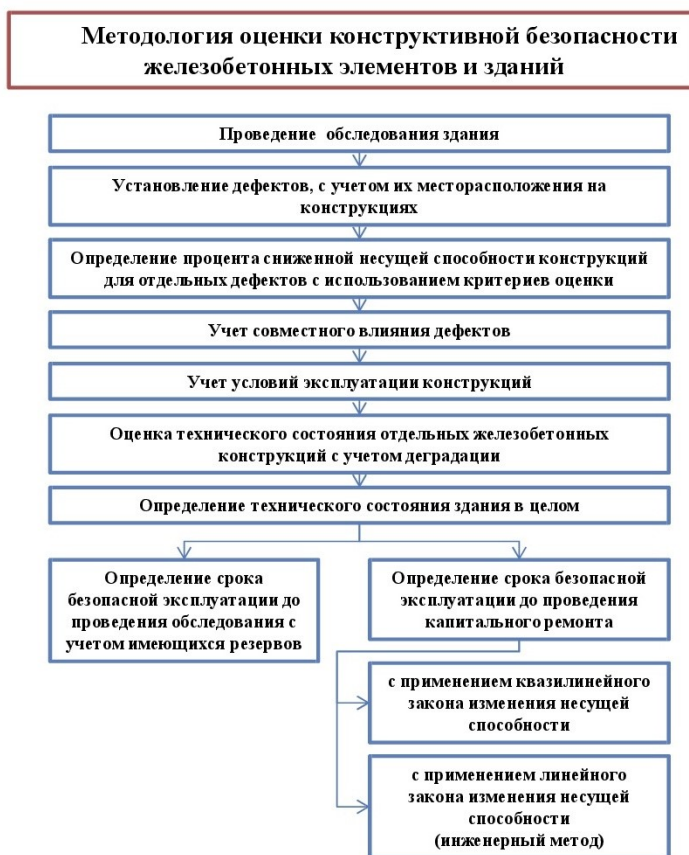


Рис. 1. Методология оценки конструктивной безопасности железобетонных элементов и зданий (иллюстрация автора)
 Fig. 1. Methodology for assessing the structural safety of reinforced concrete elements and buildings (illustration by the author)

Границы категорий технического состояния $\Phi_{огр}$ и $\Phi_{авар}$ как раз и определяют, какая доля этого проектного запаса может быть израсходована на компенсацию дефектов и повреждений без потери конструкцией способности выполнять свои функции, то есть без опасности обрушения. Таким образом, все дальнейшие построения, рассматриваются именно в рамках снижения несущей способности относительно проектного значения. Проектное значение Φ_{np} принимается за точку отсчета, и все потери несущей способности ($\Delta\Phi_{pre}(t)$, $\Delta\Phi_{oper}(t)$) также измеряются в долях или процентах от этой величины. Такой подход позволяет унифицировать оценку технического состояния для конструкций различных типов.

Общий вид функции несущей способности во времени представим как:

$$\Phi(t) = \Phi_{np} - \Delta\Phi_{доэк}(t) - \Delta\Phi_{эксн}(t), \quad (1)$$

где Φ_{np} – проектная величина несущей способности, которая полностью отвечает требованиям нормативных документов; $\Delta\Phi_{доэк}(t)$ – функция, описывающая снижение несущей способности, накопленное в доэксплуатационный период (изготовление, транспортирование, монтаж); $\Delta\Phi_{эксн}(t)$ – функция, описывающая снижение несущей способности в процессе эксплуатации под воздействием деградиционных факторов и имеющихся дефектов.

Декомпозиция обобщенной модели

Доэксплуатационная стадия охватывает интервал времени от начала изготовления конструкции ($t = t_{изг}$) до момента ввода ее в эксплуатацию ($t = t_{эксн}$).

Введем понятие суммарного процента сниженной несущей способности Δ_{pre} , учитывающего влияние всех дефектов, возникших на доэксплуатационной стадии:

$$\Delta_{доэк} = \Delta(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n), \quad (2)$$

где δ_i – степень снижения несущей способности, вызванная i -м дефектом.

Накопленное снижение несущей способности к началу эксплуатации ($t = t_{эксп}$) определим следующим образом:

$$\Delta\Phi_{доэк}(t_{эксп}) = \Phi_{пр} \cdot \Delta_{доэк}, \quad (3)$$

Однако для прогнозирования на этапе эксплуатации существенное значение имеет лишь итоговое значение $\Delta_{доэк}$, которое рассматривается как известный параметр. В связи с этим можно принять $\Delta_{доэк} = const$.

При эксплуатации ($t \geq t_{эксп}$) снижение несущей способности описывается функцией $\Delta\Phi_{эксп}(t)$, представленной в следующем виде:

$$\Delta\Phi_{эксп}(t) = (\Phi_{пр} - \Delta\Phi_{доэк}(t_{эксп})) \cdot K_{эксп}(t), \text{ для } t \geq t_{эксп}, \quad (4)$$

где $K_{эксп}(t)$ – функция деградации конструкции на этапе эксплуатации, удовлетворяющая условию $K_{эксп}(t_{эксп}) = 0$ и монотонно возрастающая при $t > t_{эксп}$.

Подставляя (3) и (4) в (1), получаем форму модели для $t \geq t_{эксп}$:

$$\Phi(t) = \Phi_{пр} \cdot [1 - \Delta_{доэк} - (1 - \Delta_{доэк}) \cdot K_{эксп}(t)]. \quad (5)$$

В линейном виде функция деградации $K_{эксп}(t)$ может быть представлена как:

$$K_{эксп}(t) = \alpha \cdot (t - t_{эксп}), \quad (6)$$

где α – показатель деградации.

Тогда выражение (5) запишем в виде:

$$\Phi(t) = \Phi_{пр} \cdot [1 - \Delta_{доэк} - (1 - \Delta_{доэк}) \cdot \alpha \cdot (t - t_{эксп})]. \quad (7)$$

Для большинства практических задач можно принять $t_{эксп} = 0$, совмещая начало эксплуатации с началом отсчета. В этом случае получаем:

$$\Phi(t) = \Phi_{пр} \cdot [1 - \Delta_{доэк} - (1 - \Delta_{доэк}) \cdot \alpha \cdot t]. \quad (8)$$

Важной характеристикой процесса снижения несущей способности во времени является скорость деградации – величина снижения несущей способности конструкции в единицу времени (например, в процентах от проектной несущей способности в год) [1], которая представляет собой первую производную функции несущей способности по времени:

$$v_{\Phi}(t) = -d\Phi(t)/dt. \quad (9)$$

Знак «минус» введен для того, чтобы скорость деградации была положительной величиной, поскольку несущая способность понижается со временем.

В рамках предложенной обобщенной модели (5) выражение для скорости деградации принимает вид:

$$v_{\Phi}(t) = \Phi_{пр} (1 - \Delta_{доэк}) \cdot dK_{эксп}(t)/dt. \quad (10)$$

Для случая линейной модели при скорости деградации является постоянной величиной:

$$v_{\Phi}(t) = \Phi_{пр} (1 - \Delta_{доэк}) \cdot \alpha = const. \quad (11)$$

Учет ремонтных мероприятий во время эксплуатации

В здании на протяжении эксплуатации проводятся различные ремонтные мероприятия – от текущих ремонтов, направленных на устранение локальных дефектов, до капитальных ремонтов с восстановлением несущей способности, заменой или усилением несущих конструкций.

Рассмотрим момент времени $t = t_{рем}$, в который проводится ремонт. До этого момента ($t < t_{рем}$) изменение несущей способности описывалось уравнением (8) с параметрами $\Delta_{доэк}^{(0)}$ и $\alpha^{(0)}$. В момент ремонта происходит скачкообразное изменение несущей способности:

$$\Phi(t_{рем}^+) = \Phi(t_{рем}^-) + \Delta\Phi_{рем}, \quad (12)$$

где $\Phi(t_{рем}^-)$ – несущая способность непосредственно перед ремонтом; $\Phi(t_{рем}^+)$ – несущая способность после завершения ремонта; $\Delta\Phi_{рем}$ – прирост несущей способности за счет ремонтных мероприятий.

Величина $\Delta\Phi_{рем}$ зависит от объема и вида ремонтных работ и может варьироваться в различных пределах.

После ремонта скорость последующей деградации конструкций $\alpha^{(1)}$ может отличаться от первоначальной $\alpha^{(0)}$. Это обусловлено как устранением первичных дефектов и дефектов, появившихся в период эксплуатации, так и качеством самих ремонтных работ и возможным изменением условий эксплуатации.

Модель для периода после ремонта ($t > t_{рем}$) принимает вид:

$$\Phi(t) = \Phi_{пр} \cdot [1 - \Delta_{доэк}^{(1)} - (1 - \Delta_{доэк}^{(1)}) \cdot \alpha^{(1)} \cdot (t - t_{рем})], \quad (13)$$

где $\Delta_{доэк}^{(1)}$ и $\alpha^{(1)}$ – уточненные параметры модели после ремонта.

Значение $\Delta_{доэк}^{(1)}$ находится из условия (13) в момент времени $t = t_{рем}$:

$$\Delta_{доэк}^{(1)} = 1,0 - (\Phi(t_{рем}^+) / \Phi_{пр}). \quad (14)$$

Связь между изменением скорости деградации до и после ремонта можно выразить следующим образом:

$$\alpha^{(1)} = \alpha^{(0)} \cdot k_{\alpha}, \quad (15)$$

где k_{α} – коэффициент изменения скорости деградации.

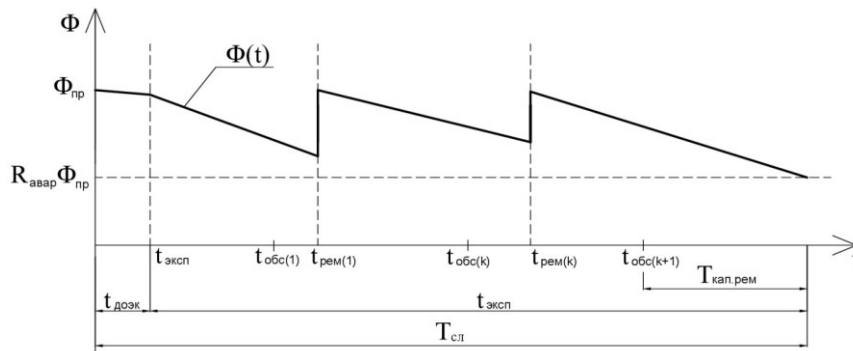


Рис. 2. Снижение несущей способности в период эксплуатации (иллюстрация автора)
Fig. 2. Reduced load-bearing capacity during operation (illustration by the author)

За период эксплуатации может быть проведено несколько ремонтов в моменты времени $t_{рем(1)}, t_{рем(2)}, \dots, t_{рем(m)}$. Модель определения несущей способности становится кусочно-заданной функцией (рис. 2):

$$\Phi(t) = \Phi_{пр} \cdot [1 - \Delta_{доэк}^{(k)} - (1 - \Delta_{доэк}^{(k)}) \cdot \alpha^{(k)} \cdot (t - t_{рем(k)})], \quad (16)$$

для $t \in [t_{рем(k)}, t_{рем(k+1)}]$,

где $t_{рем(0)} = 0$ – начало эксплуатации, $\Delta_{доэк}^{(0)}$ и $\alpha^{(0)}$ – исходные параметры.

Для каждого последующего интервала параметры определяются с учетом объема и вида предыдущего ремонта.

Предпосылки к определению срока безопасной эксплуатации

Предложенная обобщенная модель снижения несущей способности $\Phi(t)$ позволяет описывать процесс накопления повреждений во времени. Для применения ее на практике, необходимо установить момент, когда эксплуатация конструкции становится недопустимой. Для этого используем границы технического состояния – количественные критерии, которые разделяют работоспособное, ограниченно работоспособное $R_{огр}$ и аварийное $R_{авар}$ состояния.

Категория технического состояния конструкции определяется сопоставлением текущего значения несущей способности $\Phi(t)$ с граничными значениями следующим образом:

- работоспособное состояние – $\Phi(t) > R_{огр} \cdot \Phi_{пр}$;
- ограниченно работоспособное состояние – $R_{огр} \cdot \Phi_{пр} \geq \Phi(t) > R_{авар} \cdot \Phi_{пр}$;
- аварийное состояние – $\Phi(t) \leq R_{авар} \cdot \Phi_{пр}$.

Срок безопасной эксплуатации до капитального ремонта $T_{кап.рем}$ – это интервал времени, через который будет достигнута граница аварийного состояния. Для конструкции, находящейся в момент обследования $t_{обс}$ в состоянии с несущей способностью $\Phi_{обс}$ срок $T_{кап.рем}$ можно найти из выражения:

$$\Phi(t_{обс} + T_{кап.рем}) = R_{авар} \cdot \Phi_{пр}. \quad (17)$$

В рамках методологии приняты следующие границы снижения несущей способности, обоснованные с помощью закладываемых на стадии проектирования резервов железобетонных конструкций, приведенных в работе [5]:

- $R_{огр} = 0,9$ – для ограниченно работоспособного состояния, при этом $\Phi_{огр} = R_{огр} \cdot \Phi_{пр}$;
- $R_{авар} = 0,75$ – для аварийного состояния, при этом $\Phi_{авар} = R_{авар} \cdot \Phi_{пр}$.

Категория технического состояния конструкции определяется сопоставлением текущего значения несущей способности $\Phi(t)$ с граничными значениями.

Методы определение срока безопасной эксплуатации

Методы, с помощью которых определяют срок безопасной эксплуатации железобетонных конструкций, можно разделить на две группы – инженерные и вероятностные [8, 10, 20]. Предложенная обобщенная модель снижения несущей способности $\Phi(t)$ позволяет решать эту задачу.

Инженерные методы базируются на детерминированном подходе и используется при отсутствии достаточных статистических данных. В этом случае параметры модели ($\Delta_{доэк}$, α) определяются по резуль-

татам натурных обследований. Данные методы являются основой для практических расчетов при оценке технического состояния эксплуатируемых зданий и планировании ремонтно-восстановительных мероприятий. В работе [12] на основе статистической обработки данных натурных обследований 738 зданий с железобетонными конструкциями установлено, что снижение несущей способности во времени с высокой степенью достоверности аппроксимируется линейной зависимостью. Полученная зависимость имеет вид:

$$\Phi = 98,77 - 0,49t, \quad \%, \quad (18)$$

при достоверности аппроксимации $R^2 = 0,9805$. Это подтверждает данные проанализированных исследований о линейном или близком к линейному характеру протекания деградационных процессов в конструкциях при длительной эксплуатации.

Вероятностные подходы используются при наличии статистической информации о распределении начальных параметров $\Phi_{пр}$, F_0 и скоростей их изменения v_Φ , v_F , а также при необходимости обеспечить заданную вероятность безотказной работы. Методы позволяют учесть случайную природу нагрузок, прочностных характеристик материалов и отклонений реальных условий эксплуатации от проектных.

Переход от оценки срока безопасной эксплуатации отдельных конструкций к оценке здания в целом

При переходе от оценки технического состояния отдельных конструкций к оценке всего здания возникает задача объединения разнородной информации о повреждениях различных элементов в единый показатель, характеризующий конструктивную безопасность объекта в целом. Решение этой задачи требует учета величин значимости γ_j различных конструкций в обеспечении общей несущей способности и устойчивости здания.

Для оценки технического состояния здания необходимо обобщить данные о несущей способности отдельных конструкций с учетом их роли в конструктивной системе.

Пусть здание состоит из M типов конструкций (фундаменты, колонны, ригели, плиты перекрытия, стропильные конструкции и т. д.). Для каждого j -го типа ($j = 1, 2, \dots, M$) имеется N_j однотипных конструкций. В результате обследования для каждой i -й конструкции j -го типа определена фактическая несущая способность $\Phi_{ji}(t)$ в момент времени t .

Тогда средневзвешенный процент сниженной несущей способности для j -го типа конструкций, имеющих различную степень повреждения, вычисляется по формуле:

$$\bar{\Phi}_j(t) = \frac{\sum_{i=1}^{N_j} \Phi_{ji}(t)}{N_j}. \quad (19)$$

Различные типы конструкций вносят неодинаковый вклад в общую конструктивную безопасность здания. Например, разрушение колонны несущего каркаса имеет более тяжелые последствия, чем локальное повреждение плиты перекрытия. Для учета этого вводится система величин значимости γ_j .

Величины значимости удовлетворяют условию:

$$\sum_{j=1}^M \gamma_j = 100\%. \quad (20)$$

Определение численных значений γ_j производится методом Дельфи (Delphi method) [4], который представляет собой итеративную процедуру анонимного заочного анкетирования группы экспертов с целью выработки согласованного мнения по сложной проблеме. Данный метод относится к классу количественных методов оценки риска в соответствии

с ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010 и широко используется в стратегическом планировании и Форсайт-исследованиях от англ. foresight — предвидение, предсказание) [15]. Подробное описание процедуры прохождения опроса 15 квалифицированных экспертов и обработки его результатов с применением композиционного анализа (CoDa) [16–17] будет приведено в дальнейших публикациях автора. Итоговые значения полученных величин значимости для различных конструктивных систем приведены в таблице.

Таблица

Значения относительных величин значимости конструкций многоэтажных и одноэтажных зданий

№ п/п	Наименование конструктивной системы	Основные конструктивные элементы, %								Прочие конструкции, %	Итого %
		Основания	Фундаменты	Несущие стены	Колонны (пилоны)	Ригели (балки)	Стропильные и подстропильные конструкции	Плиты перекрытия / покрытия	Связи / диафрагмы		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1.	Многоэтажные каркасные здания	10	12	-	24	19	-	13	14	8	100
2.	Многоэтажные здания со стеновой конструктивной системой	10	13	34	-	15	-	20	-	8	100
3.	Многоэтажные здания комбинированной (смешанной) конструктивной системы	10	12	20	19	14	-	11	6	8	100
4.	Многоэтажные крупнопанельные здания	12	14	37	-	-	-	27	-	10	100
5.	Одноэтажные производственные каркасные здания	10	12	-	25	-	22	12	12	7	100

Примечания:

1. Прочие конструкции – вспомогательные и ограждающие конструкции, например кровля, лестничные клетки (за исключением ядер жесткости) и др.
2. В многоэтажных зданиях со стеновой конструктивной системой и крупнопанельных зданиях диафрагмы жесткости отнесены к несущим стенам.

Обобщенный показатель несущей способности здания $\Phi_{зд}(t)$ определяется как средневзвешенная величина с величин коэффициентов значимости:

$$\Phi_{зд}(t) = \sum_{j=1}^M \frac{\gamma_j \Phi_j}{100}(t), \quad (21)$$

Полученное значение $\Phi_{зд}(t)$ выражается в процентах от проектной несущей способности $\Phi_{пр.зд}$ и характеризует техническое состояние здания в целом на момент времени t .

Категория технического состояния здания устанавливается по тем же граничным значениям, что и для отдельных конструкций:

- работоспособное состояние – $\Phi_{зд}(t) > R_{огр} \cdot \Phi_{пр.зд}$;
- ограниченно работоспособное состояние – $R_{огр} \cdot \Phi_{пр.зд} \geq \Phi_{зд}(t) > R_{авар} \cdot \Phi_{пр.зд}$;
- аварийное состояние: $\Phi_{зд}(t) \leq R_{авар} \cdot \Phi_{пр.зд}$;

Для прогнозирования срока безопасной эксплуатации здания в целом используется линейная детерминированная модель деградации, аналогичная (7), но с параметрами, характеризующими здание как единую систему.

Обобщенный показатель деградации здания $\alpha_{зд}$ может быть определен как средневзвешенная величина с учетом коэффициентов значимости:

$$\alpha_{зд} = \sum_{j=1}^M \gamma_j \alpha_j, \quad (22)$$

где α_j – показатель деградации конструкций j -го типа, определенный по результатам обследований или принятый по нормативным документам.

Аналогично определяется обобщенный коэффициент начального повреждения для здания:

$$\Delta_{доэк.зд} = \sum_{j=1}^M \gamma_j \Delta_{доэк}^{(j)}, \quad (23)$$

где $\Delta_{доэк}^{(j)}$ – средний коэффициент начального повреждения для конструкций j -го типа.

Для здания, находящегося в эксплуатации в течение времени $t_{обс}$ (на момент обследования), с обобщенным показателем несущей способности $\Phi_{зд}(t_{обс})$ и обобщенной скоростью деградации $\alpha_{зд}$, время достижения аварийного состояния $t_{авар.зд}$ находится из уравнения:

$$\Phi_{зд}(t_{обс}) - \alpha_{зд} \cdot \Phi_{пр.зд} \cdot (1 - \Delta_{доэк.зд}) \cdot (t - t_{обс}) = R_{авар} \cdot \Phi_{пр.зд}. \quad (24)$$

Отсюда срок безопасной эксплуатации здания (до достижения аварийного состояния или до необходимости проведения капитального ремонта):

$$T_{\text{кап.рем}} = t_{\text{авар.эд}} - t_{\text{обс}} = (\Phi_{\text{эд}}(t_{\text{обс}}) - R_{\text{авар}} \cdot \Phi_{\text{пр.эд}}) / (\alpha_{\text{эд}} \cdot \Phi_{\text{пр.эд}} (1 - \Delta_{\text{доэк.эд}})). \quad (24)$$

В безразмерном виде, выражая несущую способность в процентах от проектной ($\Phi_{pr} = 100\%$):

$$T_{\text{кап.рем}} = (\Phi_{\text{эд}}(t_{\text{обс}}) - R_{\text{авар}}) / (\alpha_{\text{эд}} (1 - \Delta_{\text{доэк.эд}})). \quad (24)$$

Если в здании проводились выборочные ремонты отдельных конструкций или их групп, обобщенные параметры $\Delta_{\text{доэк.эд}}$ и $\alpha_{\text{эд}}$ должны быть скорректированы с учетом объемов выполненных работ. Для этого может использоваться подход к одной конструкции, аналогичный (16), но на уровне здания в целом:

$$\Phi_{\text{эд}}(t) = \Phi_{\text{пр.эд}} \cdot [1 - \Delta_{\text{доэк.эд}}(k) - (1 - \Delta_{\text{доэк.эд}}(k)) \cdot \alpha_{\text{эд}}(k) \cdot (t - t_{\text{рем}}(k))], \quad (25)$$

для $t \in [t_{\text{рем}}(k), t_{\text{рем}}(k+1)]$

где $t_{\text{рем}}(k)$ – момент проведения k -го ремонта для всего здания, $\Delta_{\text{доэк.эд}}(k)$ и $\alpha_{\text{эд}}(k)$ – обобщенные параметры после k -го ремонта.

Заключение

1. Разработана обобщенная математическая модель снижения несущей способности железобетонных конструкций во времени, которая позволяет отдельно учитывать потери несущей способности, накопленные на доэксплуатационной стадии (изготовление, транспортирование, монтаж) и в процессе эксплуатации под воздействием деградационных факторов и имеющихся дефектов. Предусмотрена возможность учета ремонтных воздействий путем кусочно-заданного изменения параметров модели после каждого ремонта.

2. Сформулирован подход к определению срока безопасной эксплуатации железобетонных конструкций и зданий на основе сопоставления текущей несущей способности с установленными границами технического состояния.

3. Разработан метод перехода от оценки отдельных конструкций к оценке здания с помощью величин значимости конструкций, определенных методом Дельфи для различных конструктивных систем. Получены формулы для прогнозирования срока безопасной эксплуатации здания до капитального ремонта с учетом обобщенных параметров деградации и начального повреждения.

4. Разработан метод определения остаточного ресурса железобетонных конструкций с учетом вероятностного анализа и ответственности для отдельных несущих элементов на основе вероятностного анализа / О. В. Мкртычев, О. С. Щедрин, Е. М. Лохова // Вестник МГСУ. – 2022. – Т. 17, № 10. – С. 1331-1346. – DOI 10.22227/1997-0935.2022.10.1331-1346. – EDN JPVJER.

Список литературы

1. 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.
2. Золина Т. В. Порядок проведения обследований здания с целью последующей оценки его остаточного ресурса / Т. В. Золина // Вестник МГСУ. – 2014. – № 11. – С. 98-108. – EDN SZCFRC.
3. Кудзис А. П. Оценка надежности железобетонных конструкций / А. П. Кудзис. — Вильнюс: Моклас, 1985. — 156 с.
4. Кукушкина С. Н. Метод Дельфи в Форсайт-проектах / С. Н. Кукушкина // Форсайт. – 2007. – Т. 1, № 1. – С. 68-73. – EDN NQTVUZ.
5. Келасьева Н. Г. Повышение экономической эффективности железобетонных конструкций / Н. Г. Келасьева, Н. Н. Трекин, Э. Н. Кодыш [и др.] // Промышленное и гражданское строительство. – 2025. – № 6. – С. 32-38. – DOI 10.33622/0869-7019.2025.06.32-38. – EDN RTSCMM.
6. Купчикова Н. В. Разработка программного модуля с веб-интерфейсом для проверки ТИМ-моделей зданий и сооружений при прохождении государственной экспертизы / Н. В. Купчикова, И. А. Демкина, Е. О. Шкруднев // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2026. – № 1(55). – С. 86-93. – DOI 10.52684/2312-3702-2026-55-1-86-93. – EDN XZRVFV.
7. Мкртычев О. В. Определение коэффициентов надежности по ответственности для отдельных несущих элементов на основе вероятностного анализа / О. В. Мкртычев, О. С. Щедрин, Е. М. Лохова // Вестник МГСУ. – 2022. – Т. 17, № 10. – С. 1331-1346. – DOI 10.22227/1997-0935.2022.10.1331-1346. – EDN JPVJER.
8. 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 МГСУ. – 2023. – Т. 18, № 4. – С. 533-544. – DOI 10.22227/1997-0935.2023.4.533-544. – EDN DBLSYW.
9. Ржаницын А. Р. Теория расчетов строительных конструкций на надежность / А. Р. Ржаницын. — М.: Стройиздат, 1978. — 200 с.
10. 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.
11. 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.
12. Терехов И. А. Инженерный метод определения срока безопасной эксплуатации железобетонных конструкций / И. А. Терехов // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2026. – № 1(55). – С. 5-12. – DOI 10.52684/2312-3702-2026-55-1-5-12. – EDN QXDSET.
13. Терехов И. А. Совместное влияние дефектов на несущую способность железобетонных конструкций / И. А. Терехов, А. В. Ямалов // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2025. – № 3(53). – С. 5-10. – DOI 10.52684/2312-3702-2025-53-3-5-10. – EDN MGSZAM.
14. 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.
15. 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.
16. Фесюн А. В. Форсайт как технология реализации стратегии развития nanoиндустрии / А. В. Фесюн // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Экономика и управление. – 2016. – № 1. – С. 144-152. – EDN VXDIII.

17. Aitchison J. M.: A Concise Guide to Compositional Data Analysis, Compositional Data Analysis Workshop, CoDaWork'05, Girona Universitat de Girona, 19-21 October 2005, available at: http://ima.udg.edu/Activitats/CoDaWork05/A_concise_guide_to_compositional_data_analysis.pdf (last access: 20 November 2021), 2005.
18. Boogaart K. & Tolosana-Delgado, Raimon. (2013). Analyzing Compositional Data with R. 10.1007/978-3-642-36809-7.
19. Perelmuter A. Ways of developing assessments of the technical condition of buildings and structures / A. Perelmuter // Strength of Materials and Theory of Structures. – 2024. – No. 112. – P. 28-35. – DOI 10.32347/2410-2547.2024.112.28-35. – EDN XRKFPD.
20. 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.

References

1. Gordeeva T. E. Uchyot izmeneniy vo vremeni kharakteristik betona pri planirovanii rekonstruktsii zastroiki [Concrete changes registration in time at a building reconstruction planning]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Vestnik of Saratov State Technical University]. 2007. Vol. 1. No. 1 (21). Pp. 116-119. (In Russian) EDN KZTLGN.
2. Zolina T. V. Poryadok provedeniya obsledovaniy zdaniya s tselyu posleduyushchey otsenki ego ostatochnogo resursa [Inspection procedure of buildings for the purpose of subsequent assessment of their residual life]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2014. No. 11. Pp. 98-108. (In Russian) EDN SZCFRC.
3. Kudzis A.P. Otsenka nadezhnosti zhelezobetonnykh konstruksiy [Assessment of reliability of reinforced concrete structures]. Vilnius: Mokslas, 1985. 156 p.
4. Kukushkina S.N. Metod Delfi v Forsayt-proektakh [Delphi method in Foresight projects]. *Forsayt* [Foresight]. 2007. Vol. 1, no. 1. Pp. 68-73.
5. Kelasyev N.G., Trekin N.N., Kodysh E.N. et al. Povyshenie ekonomicheskoy effektivnosti zhelezobetonnykh konstruksiy [improving the economic efficiency of reinforced concrete structures]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo* [Industrial and Civil Engineering]. 2025. No. 6. Pp. 32-38. DOI: 10.33622/0869-7019.2025.06.32-38.
6. Kupchikova N.V., Demkina I.A., Shkrudnev E.O. Razrabotka programmnogo modulya s veb-interfeysom dlya proverki TIM-modeley zdaniy i sooruzheniy pri prokhozhdenii gosudarstvennoy ekspertizy [Development of a software module with a web interface for tim model checking of buildings and structures during state expert review]. *Inzhenerno-stroitelnyy vestnik Prikaspiya* [Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region]. 2026. No. 1(55). Pp. 86-93. DOI: 10.52684/2312-3702-2026-55-1-86-93.
7. Mkrtichev O.V., Shchedrin O.S., Lkhova E.M. Opredelenie koeffitsientov nadezhnosti po otvetstvennosti dlya otdelnykh nesushchikh elementov na osnove veroyatnostnogo analiza [Determination of individual coefficients on the basis of probabilistic analysis]. *Vestnik MGSU* [Bulletin of Moscow State University of Civil Engineering]. 2022. Vol. 17, no. 10. Pp. 1331-1346. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.10.1331-1346.
8. Pshenichkina V. A., Gritsenko B. S., Glukhov A. V. et al. Otsenka ostatochnogo resursa zhelezobetonnykh balok obekta promyshlennogo naznacheniya s uchetom korrozionnogo iznosa [Estimation of the residual service life of reinforced concrete beams of an industrial facility taking into account corrosion wear]. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023. Vol. 18. No. 4. Pp. 533-544. DOI 10.22227/1997-0935.2023.4.533-544. (In Russian) EDN DBLSYW.
9. Rzhantsyn A.R. Teoriya raschetov stroitelnykh konstruksiy na nadezhnost [Theory of structural reliability calculations]. Moscow: Stroyizdat, 1978. 200 p.
10. Skorobogatov S. M., Kurshpel A. V. K raschetu ostatochnogo resursa zhelezobetonnykh konstruksiy sushchestvuyushchikh zdaniy i sooruzheniy [On calculation of remaining life time of reinforced concrete structures of existing buildings and facilities]. *Vestnik Uralskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Herald 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.
11. Tamrazyan A.G. Metodologiya analiza i otsenki nadezhnosti sostoyaniya i prognozirovaniya sroka sluzhby zhelezobetonnykh konstruksiy [Methodology for the Analysis and Assessment of the Reliability of the State and Prediction the Service Life of Reinforced Concrete Structures]. *Zhelezobetonnye konstruksii* [Reinforced Concrete Structures]. 2023. Vol. 1, no. 1. Pp. 5-18.
12. Terekhov I.A. Inzhenernyy metod opredeleniya sroka bezopasnoy ekspluatatsii zhelezobetonnykh konstruksiy [ENGINEERING METHOD FOR DETERMINING THE SAFE OPERATION PERIOD OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES]. *Inzhenerno-stroitelnyy vestnik Prikaspiya* [Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region]. 2026. No. 1(55). Pp. 5-12. DOI: 10.52684/2312-3702-2026-55-1-5-12.
13. Terekhov I.A., Yamalov A.V. Sovmestnoe vliyanie defektov na nesushchuyu sposobnost zhelezobetonnykh konstruksiy [Combined influence of defects on the load-loading capacity of reinforced concrete structures]. *Inzhenerno-stroitelnyy vestnik Prikaspiya* [Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region]. 2025. No. 3(53). Pp. 5-10. DOI: 10.52684/2312-3702-2025-53-3-5-10.
14. Trekin N.N., Kodysh E.N., Terekhov I.A. et al. Metodika opredeleniya ekspluatatsionnoy bezopasnosti zdaniy i ikh konstruksiy [methodology for determining the operational safety of buildings and their structures]. *Academia. Arkhitektura i stroitelstvo* [Academia. Architecture and Construction]. 2022. No. 4. Pp. 152-159. DOI: 10.22337/2077-9038-2022-4-152-159.
15. Fedorov V.S., Trekin N.N., Kodysh E.N., Terekhov I.A. Kriterii dlya otsenki kategorii tekhnicheskogo sostoyaniya zhelezobetonnykh kolonn, rigely, balok i ferm [Criteria for assessing the category of technical condition of reinforced concrete columns, crossbars, beams and trusses]. *Stroitelstvo i rekonstruktsiya* [Construction and Reconstruction]. 2023. No. 3(107). Pp. 58-69. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-107-3-58-69.
16. Fesyun A.V. Forsayt kak tekhnologiya realizatsii strategii razvitiya nanoindustrii [Forsythe as technology of realization of strategy of development nanotech industries]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika i upravlenie* [Bulletin of Voronezh State University. Series: Economics and Management]. 2016. No. 1. Pp. 144-152.
17. Aitchison J.M. A Concise Guide to Compositional Data Analysis. 2005. Available at: http://ima.udg.edu/Activitats/CoDaWork05/A_concise_guide_to_compositional_data_analysis.pdf (accessed: 20.11.2021).
18. Boogaart K, Tolosana-Delgado R. Analyzing Compositional Data with R. Berlin: Springer, 2013. DOI: 10.1007/978-3-642-36809-7.
19. 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.



20. Vanus D.S., Zharikhin A.A. Calculation and forecasting of operational durability of reinforced concrete structures. *E3S Web of Conferences*. 2024. Vol. 533. P. 02025. DOI: 10.1051/e3sconf/202453302025.

© И. А. Терехов

Ссылка для цитирования:

Терехов И. А. Модель снижения несущей способности в рамках методологии оценки конструктивной безопасности железобетонных элементов и зданий // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2026. № 2 (56). С. 5–12.

УДК 624.94

DOI 10.52684/2312-3702-2026-56-2-12-21

**НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ОПОР ДВОЙНОГО НАЗНАЧЕНИЯ
СПЛОШНОГО СЕЧЕНИЯ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ РАЗМЕЩЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ**

А. В. Голиков, А. В. Танасогло

Голиков Александр Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация, тел.: + 7 (960) 877-74-57; e-mail: alexandr_golikov@mail.ru;

Танасогло Антон Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация, тел.: + 7 (915) 544-36-23; e-mail: a.v.tan@mail.ru

В статье представлены результаты анализа конструктивных решений и численно-аналитического исследования работы под нагрузкой опор двойного назначения. Выполнен анализ требований Распоряжений правительства ряда городов России, регламентирующих способы размещения блоков оборудования и фидерных трасс, оказывающих влияние на напряженно-деформированное состояние конструкций и архитектурный облик дорожной инфраструктуры. Для наиболее распространенного в практике строительства конструктивного решения опор двойного назначения в виде сечений из круглых труб разработаны и рассчитаны серии моделей. По результатам расчетно-аналитической работы установлены характерные особенности напряженно-деформированного состояния конструкций: установлена группа предельных состояний, требования которой оказывают определяющее влияние на сечения ствола опоры, определено количественное влияние способов расположения фидерных трасс вдоль ствола на уровень данного состояния. Даны рекомендации по подходам к разработке достоверных расчетных моделей сооружения опор двойного назначения.

Ключевые слова: опора двойного назначения, конструктивные решения, напряженно-деформированное состояние, прочность, расчетно-аналитическое обоснование, аэродинамический коэффициент, фидерные трассы, механическая безопасность.

**STRESS-STRAIN STATE OF SOLID CROSS-SECTION DUAL-PURPOSE SUPPORTS
TAKING INTO ACCOUNT THE SPECIFICS OF EQUIPMENT PLACEMENT**

A. V. Golikov, A. V. Tanasoglo

Golikov Aleksandr Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Metal and Timber Structures Department, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation, phone: + 7 (960) 877-74-57; e-mail: alexandr_golikov@mail;

Tanasoglo Anton Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Metal and Timber Structures Department, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation, phone: + 7 (915) 544-36-23; e-mail: a.v.tan@mail.ru

This paper presents the results of an analysis of design solutions and a numerical-analytical study of the behavior under load of dual-purpose support structures. An analysis was performed of the requirements set forth by Decrees of the municipal governments of a number of Russian cities. These regulations govern the methods for placing equipment blocks and feeder cable routes, which impact the stress-strain state of the structures and the architectural appearance of road infrastructure. For the most common dual-purpose support structures design solution used in construction practice, employing cross-sections made of circular tubes, a series of models were developed and analyzed. Based on the results of the computational and analytical work, characteristic features of the stress-strain state were identified: a group of limit states was established, the requirements of which have a determining influence on the cross-sections of the support mast; the quantitative influence of the feeder route arrangement methods along the mast on the stress-strain state level was determined. Recommendations are provided regarding approaches for developing reliable computational models of dual-purpose support structures.

Keywords: dual-purpose support structures, design solution, stress-strain state, strength, design and analysis verification, aerodynamic coefficient, feeder cable routes, mechanical safety.

Введение

Создание условий для обеспечения населения городов качественной беспроводной связью неразрывно связано со строительством и эксплуатацией опор сотовой связи и опор двойного назначения для размещения оборудования инфраструктурных операторов. Требования по размещению и эксплуатации оборудования на опорах двойного назначения, опорах базовых станций подвижной радиотелефонной связи и контактной сети на опорах наружного

освещения устанавливаются постановлениями администраций городов, например, требованиями администраций Москвы [11], Великого Новгорода, Владимира и др. Конструкции типовых опор регламентированы материалами постановлений и конструктивно представляют собой сооружения высотой до 29,0 м со ступенчато уменьшающимся по высоте сечением, выполненным из круглых труб. Анализ установленных в городах опор показал не соответствие требованиям постановлений в части