

Д. И. Корольков

ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Д. И. Корольков

# ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ



Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации

Санкт-Петербургский государственный  
архитектурно-строительный университет

**Д. И. Корольков**

# **ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

Монография

Санкт-Петербург  
2020

УДК 69

*Рецензенты:*

д-р техн. наук, профессор *С. Н. Савин* (Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет);  
д-р техн. наук, профессор, заслуженный строитель России  
*В. И. Жаданов* (Оренбургский государственный университет)

**Корольков, Д. И.**

Оценка остаточного ресурса строительных конструкций : монография / Д. И. Корольков ; Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. – Санкт-Петербург : СПбГАСУ, 2020. – 168 с. – Текст : непосредственный.

ISBN 978-5-9227-1190-6

Представлены различные методики расчета остаточного ресурса строительных конструкций, в том числе несколько методик, разработанных автором данной монографии. Выделены достоинства и недостатки каждой из приведенных методик. Автором разработан алгоритм оценки полученных результатов при расчете по нескольким методикам сразу. Представлена экспертная система прогнозирования остаточных сроков службы.

Предназначена для специалистов, занимающихся процедурой продления сроков эксплуатации, а также научных работников, изучающих долговечность строительных конструкций.

Ил. 22. Табл. 6. Библиогр.: 69 назв.

ISBN 978-5-9227-1190-6

© Корольков Д. И., 2020

© Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2020

## Введение

В настоящее время прогнозирование остаточных сроков службы строительных конструкций является неструктурированной областью, фактически не имеющей какой бы то ни было формализации. Существующие методики и подходы к определению остаточных сроков службы строительных конструкций не имеют под собой четкой, логически построенной основы; они выполнены на моделях, часто не учитывающих особенности старения конструкций; многие из них содержат разного рода неточности и вольности трактовки терминов и понятий.

Что же такое остаточный ресурс?

*Остаточный ресурс* – это суммарная наработка объекта от момента контроля его технического состояния до перехода в предельное состояние [1, 66–69].

Для чего нужно знать остаточный ресурс?

Во-первых, зная время, в течение которого здание или сооружение будут использоваться, можно рассчитать необходимые размеры отчислений, которые будут поступать каждый месяц (квартал, год) для последующего ремонта. Это позволит равномерно распределить материальную нагрузку, что выгодно не только предприятиям, но и обычным гражданам, которые платят в фонд капитального ремонта жилья.

Во-вторых, зная остаточный срок эксплуатации, можно оценить целесообразность постройки нового здания или сооружения

для замены уже существующего. Ярким примером может служить атомная отрасль. Там в случае превышения срока службы, установленного нормативно технической документацией (НТД) или проектом, считается остаточный ресурс объекта, и это является одним из основных критериев (условий) для продления срока эксплуатации объекта [1].

Те же рассуждения можно применить и для других объектов строительства. Например – оценка остаточного срока службы хрущевки. Нормативный срок службы этих зданий уже давно вышел. При этом программа реновации успешно реализуется разве что в Москве. В регионах и даже в Петербурге эта программа выполняется не так активно. Поэтому в условиях дефицита финансирования можно было бы оценить дополнительный срок службы зданий и определить первоочередные объекты под снос (реновацию).

То же самое относится и к зданиям, причисленным к ветхому (аварийному) жилью. Благодаря оценке остаточного срока службы подобных зданий можно обосновать необходимость срочного расселения людей или же сделать вывод, что данное здание еще сможет прослужить какое-то время, что важно, когда подобных объектов много, а денег для постройки нового жилья для расселения выделяется мало. Это позволит определить первоочередные объекты для расселения исходя из остаточного срока службы.

Методы и методики расчета остаточного ресурса можно классифицировать по следующим признакам:

- по области применения:
  - универсальные, можно применять для любых строительных конструкций;
  - частные, применяются для определенных типов конструкций (металлических, железобетонных и др.);

- по количеству исходных данных, полученных по результатам обследования:
  - вероятностные;
  - вероятностно-инструментальные;
  - инструментальные;
- в зависимости от типа обследования:
  - применяемые только для визуального обследования;
  - применяемые только для инструментального обследования:
    - применяемые и для визуального, и для инструментального обследования.

В данной работе автором использована классификация *по исходным данным*.

# **Глава 1. ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА**

## **1.1. Оценка остаточного ресурса с применением нормального распределения (распределения Гаусса)**

Данная методика изначально была разработана для объектов атомной энергетики, поэтому она будет описана автором в терминах именно этой отрасли, хотя может применяться для любых строительных конструкций в любых отраслях промышленности.

По истечению 30-летнего срока службы или назначенного срока эксплуатации в проектной документации необходимо провести комплексное обследование и расчет остаточного ресурса объекта использования атомной энергии (ОИАЭ) [1]. Под ОИАЭ понимают ядерную установку, радиационный источник, пункт хранения ядерных материалов и радиоактивных веществ, хранилище радиоактивных веществ [1]. Мы будем рассматривать ОИАЭ только как пункт хранения ядерных материалов и радиоактивных веществ, хранилище радиоактивных веществ.

Расчет показателей надежности систем и элементов радиационного объекта производится с использованием «Методики определения остаточного ресурса систем и элементов...» [2], которая разрабатывается на втором этапе комплексного обследо-

ния ОИАЭ. В данной методике приводится расчет остаточного ресурса не только строительных конструкций, но и инженерных систем, а также оборудования, которое используется на ОИАЭ. Далее будет описано нахождение остаточного ресурса применительно только к строительным конструкциям [3].

В результате проводимого технического обследования получают значения интенсивности отказов  $\lambda_{\text{отк}}$  и вероятности отказов (или безотказной работы) элементов. Выбор нормативных (регламентированных, декретных и т. д.) показателей надежности (вероятности безотказной работы, средней или гамма-процентной наработки до отказа и др.) производится в соответствии с общими принципами, применяемыми для опасных производств [3].

Поскольку строительные конструкции ОИАЭ являются наиболее важной системой, которая в значительной степени обеспечивает безопасную эксплуатацию всего объекта, то оценка надежности строительных конструкций выполняется при следующих допущениях [3]:

- отказы элементов подчиняются закону нормального распределения [3];
- отказы несущих элементов приводят к отказам системы [3];
- отказы элементов независимы [3];
- вероятность отказа каждого элемента  $q_i = 1 - p_i$ , где  $p_i$  – вероятность безотказной работы элемента [3].

Исходными данными для расчета показателей безопасности объекта являются:

- номенклатура элементов несущего каркаса ОИАЭ [3];
- средний срок службы элементов несущего каркаса объекта  $T_x$ , который определяется согласно инструкции по технической эксплуатации данного объекта [3];



- ввиду отсутствия дополнительных данных среднеквадратичное отклонение  $G_x$  срока службы элемента несущего каркаса от его среднего значения  $T_x$  принимается равным [3]:

$$G_x \approx 0,18 \cdot T_x. \quad (1.1)$$

Последний пункт требует пояснений. Как показывает практика, имеющейся документации (проектной, эксплуатационной и др.) недостаточно для того, чтобы можно было ввести в расчет какую-либо другую зависимость, которая давала бы более точное значение [3].

Плотность распределения наработки элемента несущего каркаса до отказа при нормальном распределении имеет вид [3]:

$$f(t) = \frac{1}{G_x \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(t - T_x)^2}{2 \cdot G_x^2} \right], \quad (1.2)$$

где  $T_x$  – средний срок службы элементов несущего каркаса ОИАЭ [3];  $G_x$  – среднеквадратичное отклонение срока службы элемента несущего каркаса от его среднего значения  $T_x$  [3];  $t$  – время с момента начала эксплуатации хранилища, при этом  $T_x > 0$ ,  $G_x > 0$ ,  $G_x < 0,25 \cdot T_x$  [3].

Исходные данные (средний срок службы и среднеквадратичное отклонение), необходимые для оценки надежности конструктивных элементов, берутся из МДС 13-14.2000 [4].

*Важное замечание.* При исключении из расчета остаточного ресурса ряда элементов строительных конструкций производится перенормировка их вкладов в остаточный ресурс всего объекта [3].

Каждый элемент имеет значимость, иными словами – важность, вклад для строительной системы. Поскольку некоторые элементы могут отсутствовать, то значимость (вклад) остальных повышается, и соответственно, необходимо пересчитать их вклады, или, как говорят, «перенормировать» [3].

Коэффициенты значимости для элементов строительных конструкций объекта берутся из [5]. Их переводят в десятичную форму путем деления значения коэффициента значимости элемента на сумму значений всех коэффициентов значимости. При перенормировке коэффициенты значимости снова делят на сумму оставшихся после исключения элементов. После коэффициенты суммируют, и их значение должно быть равно единице (это контроль). Если оно не равно единице (расхождение должно быть небольшим), то остаток распределяют (раскидывают) [3].

Для определения «фактического» возраста элементов несущих строительных конструкций (фундаментов, стен и т. д.) используется описание технического состояния строительных конструкций, полученного при их техническом обследовании с использованием внешних признаков износа [3]. Категории технического состояния (ТС) радиационного объекта и принятые доверительные вероятности приведены в табл. 1.1 [3].

Принятые диапазоны износа элементов строительных конструкций по внешним признакам, доверительная вероятность, квантиль нормального распределения заносятся в таблицу [3].

Таблица 1.1

**Доверительные вероятности безотказной работы строительных конструкций, определяемые по сроку эксплуатации зданий**

Категория технического состояния	Описание технического состояния (ТС)	Принятая в методике доверительная вероятность	Квантили нормального распределения $x = (t - T_H) / \sigma$
1 (нормативная)	Нормативное техническое состояние. Отсутствуют повреждения. Выполняются все требования действующих норм и проектной	0,95	1,65

Окончание табл. 1.1

Категория технического состояния	Описание технического состояния (ТС)	Принятая в методике доверительная вероятность	Квантили нормального распределения $x = (t - T_n) / \sigma$
1 (нормативная)	документации. Необходимости в ремонтных работах нет	0,95	1,65
2 (работоспособная)	Работоспособное состояние. Несущая способность конструкций обеспечена, требования норм по предельным состояниям II группы и долговечности могут быть нарушены, но обеспечены нормальные условия эксплуатации. Требуется устранение мелких повреждений	0,90	1,28
3 (ограниченно работоспособная)	Ограниченно работоспособное состояние. Выявленные повреждения (износ) свидетельствуют о снижении несущей способности. Для продолжения нормальной эксплуатации требуется ремонт для устранения поврежденных конструкций	0,85	1,03

Отметим, что вероятность безотказной работы несущих строительных конструкций в течение дополнительного сро-

ка эксплуатации должна быть не ниже величины, приведенной в табл. 1.1 для категории ТС [3].

Полученная расчетная величина показателя надежности – вероятности безотказной работы – сопоставляется с рекомендованной нормируемой величиной и со средней наработкой до отказа, на основании чего делается вывод о величине дополнительного срока безопасной эксплуатации объекта. В расчетах остаточного ресурса возможно использование двух вариантов определения дополнительного срока эксплуатации строительных конструкций [3].

*Вариант 1.* На основе полученных результатов технического обследования возможна приближенная оценка остаточного ресурса строительных конструкций данного радиационного объекта с доверительными вероятностями, принятыми для различных категорий ТС объекта; она может быть произведена с использованием квантилей нормального распределения по следующей упрощенной формуле [3]:

$$T_{\text{ост}} = (T_{\text{н}} - U_{\alpha} \cdot \sigma) - t_{\text{экспл}}, \quad (1.3)$$

где  $t_{\text{экспл}}$  – календарный срок реальной эксплуатации объекта, лет [3];  $\sigma$  – среднеквадратичное отклонение [3];  $U_{\alpha}$  – квантиль распределения Гаусса, соответствующий принятой доверительной вероятности  $\alpha$  для принятого технического состояния объекта [3].

При длительном сроке эксплуатации ОИАЭ использовать эту формулу нельзя; ее можно использовать исключительно для предварительной оценки из-за большой погрешности [3].

*Вариант 2.* В этом варианте определения возможно использование кривых физического износа строительных конструкций в зависимости от сроков их эксплуатации, приведенных в ВСН 53-86(р) [7] для строительных конструкций. На основании

данных технического обследования по графикам, приведенным на рис. 1.1 и 1.2, определяется «фактический» возраст элементов несущего каркаса изотопной лаборатории, после чего в вероятностный (окончательный) расчет надежности строительных конструкций вносится соответствующая корректировка и определяется дополнительный срок эксплуатации строительных конструкций [3].

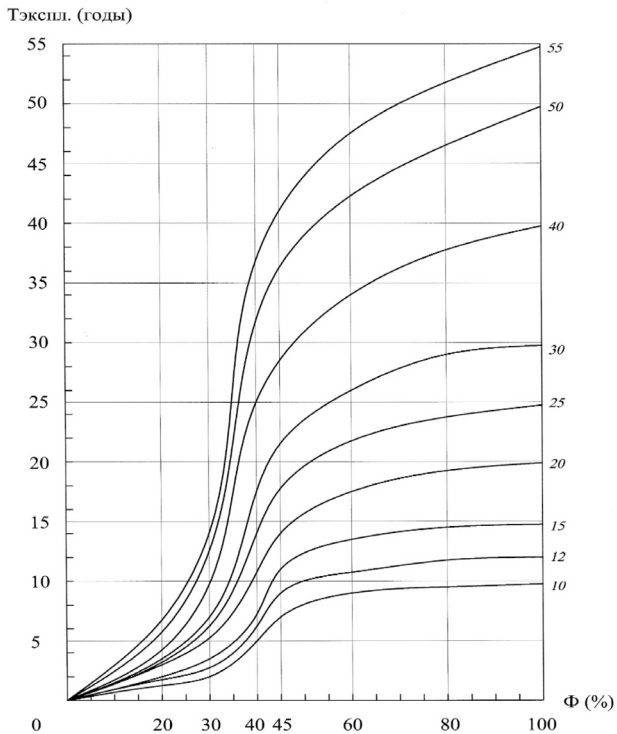


Рис. 1.1. Зависимость физического износа элементов строительных конструкций от срока эксплуатации объекта (при сроках службы объектов 10–55 лет)

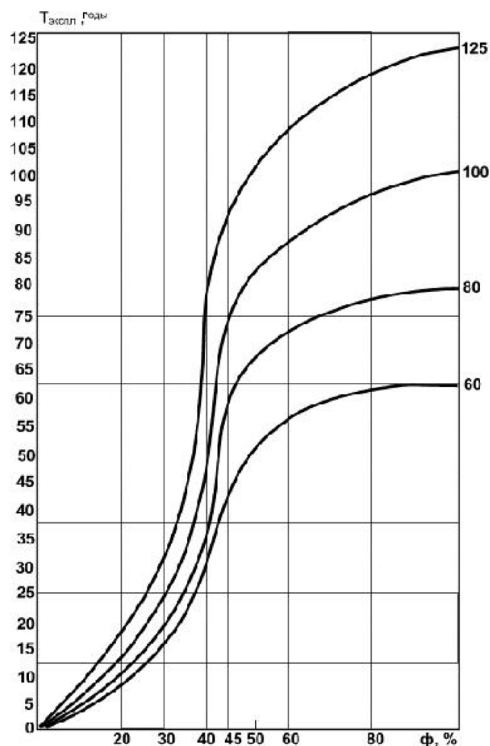


Рис. 1.2. Зависимость физического износа элементов строительных конструкций от срока эксплуатации объекта (при сроках службы объектов 60–125 лет)

Возможность применения положений ВСН 53-86(р) [7] для оценки (определения) физического износа строительных конструкций объекта использования атомной энергии, обосновывается [3]:

- использованием одинаковых видов строительных материалов (бетона, кирпича, стали и т. д.) как для жилых и гражданских, так и для промышленных объектов [3];

- параметрами и критериями (признаками и значениями) физического износа строительных конструкций, которые являются идентичными независимо от отрасли применения объектов [3];

- общим функциональным назначением (несущее, ограждающее, защитное) основных конструктивных элементов (фундаментов, стен, перекрытий и т. д.) зданий и сооружений [3].

Кроме того, следует отметить, что средневзвешенные значения физического износа строительных конструкций определяются в соответствии с удельным весом отдельных конструктивных элементов объекта по сборникам укрупненных показателей восстановительной стоимости зданий и сооружений по переоценке основных фондов. В сборниках укрупненные показатели восстановительной стоимости зданий и сооружений сгруппированы по отраслям народного хозяйства и промышленности или по видам зданий и сооружений [3].

Оценка технического состояния (износа) различных строительных конструкций, используемая в расчете, принята из [4].

Общая оценка износа конструкций ОИАЭ производится по формуле

$$\varepsilon = \frac{\alpha_1 \cdot \varepsilon_1 + \alpha_2 \cdot \varepsilon_2 + \dots + \alpha_i \cdot \varepsilon_i}{\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_i}, \quad (1.4)$$

где  $\varepsilon_1, \varepsilon_2 \dots \varepsilon_i$  – максимальная величина износа отдельных видов конструкций [5];  $\alpha_1, \alpha_2, \dots \alpha_i$  – коэффициенты значимости отдельных видов конструкций [5].

Для возможности определения дополнительного срока эксплуатации объекта на рис. 1.1 и 1.2 приведены кривые физического износа строительных конструкций в зависимости от срока их эксплуатации [3].

После того как определены все исходные данные – средний срок службы элемента, среднеквадратичное отклонение срока службы элемента от его среднего значения, коэффициенты значимости, категория ТС (износ), фактический возраст элементов по кривым физического износа – производится расчет вероятности безотказной работы [3].

Вероятность безотказной работы считаем по формуле [3]:

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^x e^{-\frac{z^2}{2}} dz, \quad (1.5)$$

где

$$x = \frac{T_x - t}{G_x}. \quad (1.6)$$

Такой расчет значительно упрощается тем, что существуют таблицы значений данной функции в зависимости от переменной  $x$ . Суммарная вероятность безотказной работы всех строительных конструкций может рассчитываться разными способами.

Первый – это нахождение среднего арифметического путем суммирования вероятностей безотказной работы всех строительных конструкций (элементов). При использовании данного подхода получается завышенная оценка вероятности безотказной работы из-за того, что все элементы считаются равноправными и малозначимые элементы (имеющие малый вес (коэффициент значимости)) вносят повышающий вклад своей высокой вероятностью.

Второй – в качестве суммарной вероятности берется наименьшая из вероятностей элемента. Достоинство данного подхода в том, что мы гарантировано получаем оценку ниже истинной, а значит, оценка будет всегда достоверной. Недостатком можно считать то, что мы как бы занижаем остаточный ресурс.



Третий подход заключается в том, что мы суммируем вероятности безотказной работы элементов, умножая на их коэффициенты значимости. При данном подходе мы получаем наиболее близкую к истинной вероятности безотказной работы величину [3].

*Достоинства данной методики:*

- дифференцированное рассмотрение конструкций. При таком подходе каждый элемент рассматривается отдельно в зависимости от материала, из которого он сделан, и величины его физического износа, что позволяет выявить наиболее «слабые» и также важные элементы строительных конструкций, которые оказывают влияние на работоспособность всего здания или сооружения [3];

- простота получения исходных данных. Для назначения величины физического износа достаточно провести визуальное обследование строительных конструкций [3];

- универсальность. Применима практически к любым конструкциям и при любых условиях эксплуатации [3].

*Недостатки:*

- субъективность. Назначение величины физического износа производится специалистом эмпирически на основе собственного опыта и знаний [3];

- не учитывает спонтанные факторы (отказы по общей причине). Если взять, к примеру, бетон, то со временем он набирает прочность, следовательно, надежность конструкции повышается. Отсюда следует, что и остаточный ресурс тоже увеличивается. Но при этом увеличивается хрупкость материала, что может привести к моментальному разрушению при определенных условиях [3].

## 1.2. Оценка остаточного ресурса с применением экспоненциального распределения

Часто в инженерной практике возникает необходимость определить, сколько времени объект капитального строительства сможет прослужить без капитального ремонта. Для того чтобы оценить данное время, применяют метод, основанный на распределении Пуассона [3].

Остаточный ресурс определяется по формуле

$$T_{\text{ост}} = T - t_{\text{фак}}, \quad (1.7)$$

где  $t_{\text{фак}}$  – фактический срок эксплуатации;  $T$  – срок службы до капитального ремонта, определяется согласно [5].

Остаточный срок службы до капитального ремонта равен

$$T = \frac{0,16}{\lambda}, \quad (1.8)$$

где 0,16 – значение, соответствующее ограниченно работоспособному состоянию (или вероятности безотказной работы 0,85 согласно табл. 1 [5]);  $\lambda$  – постоянная физического износа,

$$\lambda = \frac{-\ln \gamma}{t_{\phi}}, \quad (1.9)$$

где  $t_{\phi}$  – срок эксплуатации в годах на момент обследования [5];  $\gamma$  – относительная надежность [5] или же, по-другому, – вероятность безотказной работы, определяемая по формуле

$$\gamma = 1 - \varepsilon. \quad (1.10)$$

Повреждаемость здания определяется по формуле (1.4):

$$\varepsilon = \frac{\alpha_1 \cdot \varepsilon_1 + \alpha_2 \cdot \varepsilon_2 + \dots + \alpha_i \cdot \varepsilon_i}{\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_i},$$

*Достоинства данного метода:*

- дифференцированное рассмотрение конструкций (теоретически). В частном случае можно рассмотреть каждую конструкцию по отдельности, приняв, что повреждаемость остальных элементов равна нулю, т. е. рассмотреть ситуацию, когда влияние на техническое состояние объекта в целом оказывается только одна конструкция [3]. Тогда формула повреждаемости примет вид

$$\varepsilon = \frac{\alpha_1 \cdot \varepsilon_1}{\alpha_1} = \varepsilon_1; \quad (1.11)$$

- простота получения исходных данных. Для назначения величины повреждаемости достаточно провести визуальное обследование строительных конструкций [3];

- универсальность. Применим к любым конструкциям и при любых условиях эксплуатации [3].

*Недостатки:*

- субъективность. Назначение величины повреждаемости производится специалистом эмпирически на основе своего опыта, своих знаний и собственной оценки технического состояния конструкций [3];

- не учитывает спонтанные факторы (отказы по общей причине), как и методика определения остаточного ресурса строительных конструкций на основе распределения Гаусса [3];

- сложно либо невозможно дифференцированное рассмотрение конструкций. Связана эта проблема с тем, что данный метод

рассматривает хронологическое время жизни конструкций, а не «фактическое» – как методика определения остаточного ресурса строительных конструкций на основе распределения Гаусса. Поэтому при одинаковом значении повреждаемости различных типов конструкций (плиты, стены, фермы и т. д.), сделанных из разных материалов (кирпич, бетон и т. д.), они будут иметь одинаковый срок эксплуатации до капитального ремонта. В реальности такого не происходит [3].

О том, к чему могут привести подобные проблемы, и о методах их решения рассказано во второй главе данной работы [3].

### **1.3. Оценка остаточного ресурса по модифицированной методике с применением экспоненциального распределения**

На основе проведенного анализа существующего метода расчета остаточного ресурса по экспоненциальному распределению, определенных причин его недостатков, автором разработана следующая модифицированная методика расчета остаточного ресурса с использованием экспоненциального распределения.

Алгоритм по данной модифицированной методике будет следующим [3, 8].

1. Определяются исходные данные для расчета.

1.1. Определяется уровень расчета: поэлементно или укрупненно.

Это зависит от объема проведенного обследования зданий и сооружений [3, 8].

1.1.1. Расчет проводится укрупненно.

Если проведено только визуальное обследование и/или выборочное инструментальное. Здесь возможны два случая [3, 8].

*Первый случай.* Если проведено только визуальное обследование, необходимо проводить расчет для всего объекта (здания или сооружения) в целом [3, 8].

*Второй случай.* Если помимо визуального обследования (осмотра) проведено выборочное инструментальное обследование, то расчет проводится укрупнено по группам элементов в зависимости от их конструктивной схемы (плита, балка, колонна, ферма, стена и т. д.) и материала (кирпич, бетон, дерево и т. д.) [3, 8].

1.1.2. Расчет проводится поэлементно [3, 8].

Если проведено детальное инструментальное обследование (сплошное) [3, 8].

*Примечание.* Если объект изначально или впоследствии разделен на несколько отдельных блоков, то определение уровня расчета производится для каждого блока аналогично согласно п. 1.1 [3, 8].

1.2. Выбираются те элементы строительных конструкций, для которых будет вестись расчет остаточного ресурса.

1.2.1. Если расчет проводится укрупненно.

В этом случае выбираются критические элементы, т. е. такие элементы, отказ которых приведет к отказу всего объекта (здания или сооружения) [3, 8]. Группировка строительных элементов выполняется по типу конструкции (колонна, балка, ферма и т. д.) и материалу (кирпич, бетон и т. д.) [3, 8].

Если физический износ разных однотипных элементов неодинаков (в практике обследования это практически всегда так), то необходимо назначить величину физического износа и осуществить деление строительных конструкций не только по типу конструкций и материалу, но еще и по величине физического износа [3, 8].

Здесь можно выделить два случая назначения величины физического износа [3, 8].

*Первый случай.* Если здание или сооружение имеет небольшие габариты и малое количество этажей, то назначается физический износ  $\Phi_k$  для каждого однотипного элемента, а за конечный результат для каждого элемента в целом принимается среднее значение [3, 8].

$$\Phi_{\text{ост. об}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Phi_{k i}, \quad (1.12)$$

где  $n$  – количество однотипных элементов [3, 8];  $\Phi_{k i}$  – физический износ однотипного элемента [3, 8].

*Второй случай.* Если здание или сооружение имеет значительные размеры в плане и/или большое количество этажей

(3 и более) то в этом случае объект делится на отдельные сектора (блоки или секции). Для каждого однотипного элемента секции назначается величина физического износа  $\Phi_k$  и за конечный результат для каждого элемента секции в целом принимается среднее значение согласно формуле (1.12). Таким образом, в данном случае дальнейший расчет остаточного ресурса будет вестись посекторально [3, 8].

Если же в расчетах будет использован хронологический возраст, то назначать величину физического износа не требуется [3, 8].

1.2.2. Если расчет проводится поэлементно.

В этом случае считаются все элементы, для которых производилось визуальное (осмотр) и инструментальное (определение прочности, влажности и т. д.) освидетельствование [3, 8].

*Примечание 1.* К однотипным следует относить ряд элементов, которые относятся к одному типу конструкции (колонна, балка, ферма и т. д.) и состоят из одного и того же строительного материала (кирпич, бетон и т. д.) [3, 8].

*Примечание 2.* Если имеются элементы строительных конструкций, которые находятся в ограниченно-работоспособном и/или аварийном состоянии, при этом их число незначительно и в целом они не оказывают сильного влияния на здание или сооружение, то они исключаются из расчета остаточного ресурса. Условно будем считать, что их остаточный ресурс равен нулю [3, 8].

Если объект изначально состоит или разделен на несколько отдельных блоков, то выбор элементов для расчета остаточного ресурса производится для каждого блока аналогично согласно п. 1.2 [3, 8].

1.3. Назначаем коэффициенты значимости для каждой конструкции. Данные коэффициенты назначаются по п. 2.5 [5].

1.4. Определяем «фактический» или хронологический возраст (срок эксплуатации) для каждой конструкции.

«Фактический» возраст строительных конструкций необходимо назначать, если рассматривается весь временной интервал срока эксплуатации строительных конструкций [3, 8].

Определение «фактического» возраста строительных конструкций производится по нормативным документам (например, ВСН 53-86(р) [7]) или иным научно-экспериментальным материалам [3, 8].

Если необходимо провести оценку остаточного ресурса только для здания или сооружения в целом и используется «фактический» возраст, тогда определяется среднее значение «фактического» возраста объекта капитального строительства по формуле [3, 8]:

$$\left(t_{\text{фак}}\right)_{\text{сред}} = \frac{t_{\text{фак}1} \cdot \alpha_1 + t_{\text{фак}2} \cdot \alpha_2 + \dots + t_{\text{фак}i} \cdot \alpha_i}{\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_i}. \quad (1.13)$$

Если рассматривается только часть временного интервала срока эксплуатации, то в расчет подставляется фактический хронологический возраст объекта [3, 8].

*Примечание 1.* Формула (1.13) применяется только в случае укрупненного расчета остаточного ресурса. Если проводится поэлементный расчет, то определение среднего «фактического» возраста для всего объекта в целом не производится [3, 8].

*Примечание 2.* Хронологический возраст принимается одинаковым для всех строительных конструкций (элементов) с момента ввода объекта в эксплуатацию. Исключением являются случаи, когда имеются документальные свидетельства замены строительных элементов. Для данных строительных конструкций хронологический срок эксплуатации начинается с момента их ввода в эксплуатацию [3, 8].



Если объект изначально или впоследствии разделен на несколько отдельных блоков, то определение среднего «фактического» возраста производится для каждого блока согласно формуле (1.13) [3, 8].

1.5. Определяется переводной коэффициент между «фактическим» и хронологическим возрастом объекта для каждой конструкции:

$$c = \frac{t_{\phi}}{t_{\text{фак}}}. \quad (1.14)$$

Если необходимо провести оценку остаточного ресурса только для здания или сооружения в целом, тогда определяется среднее значение переводного коэффициента [3, 8]:

$$(c)_{\text{сред}} = \frac{t_{\phi}}{(t_{\text{фак}})_{\text{сред}}}. \quad (1.15)$$

*Примечание.* Переводной коэффициент вычисляется только в том случае, если в расчете будет использоваться «фактический» возраст конструкций [3, 8].

Если объект изначально состоит или разделен на несколько отдельных блоков, то определение переводного коэффициента производится для каждого блока согласно формуле (1.15) [3, 8].

1.6. Назначается поправочный коэффициент к постоянной физического износа для каждой конструкции.

Поправочный коэффициент в данном случае – это безразмерная величина отказов по общей причине. Данный коэффициент назначается эмпирически в случае отсутствия каких-либо тео-

ретических и экспериментальных данных по тем или иным видам отказов по общей причине [3, 8].

Если необходимо провести оценку остаточного ресурса только для здания или сооружения в целом, тогда определяется среднее значение поправочного коэффициента к постоянной физического износа по формуле [3, 8]:

$$(\lambda_c)_{\text{сред}} = \frac{\lambda_{c1} \cdot \alpha_1 + \lambda_{c2} \cdot \alpha_2 + \dots + \lambda_{ci} \cdot \alpha_i}{\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_i}, \quad (1.16)$$

либо назначается эмпирически [3, 8].

Если объект изначально состоит или разделен на несколько отдельных блоков, то определение переводного коэффициента производится для каждого блока согласно формуле (1.16) [3, 8].

1.7. Назначаются повреждаемости для каждой конструкции (элемента).

Повреждаемость назначается по результатам проведенного обследования [3, 8].

Если необходимо провести оценку остаточного ресурса только для здания или сооружения в целом, тогда определяется среднее значение поврежденности по формуле [3, 8] (1.4):

$$\varepsilon = \frac{\alpha_1 \cdot \varepsilon_1 + \alpha_2 \cdot \varepsilon_2 + \dots + \alpha_i \cdot \varepsilon_i}{\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_i}.$$

2. Вычисляется относительная надежность для каждой конструкции по формуле (1.10):

$$\gamma = 1 - \varepsilon.$$

Для здания или сооружения в целом необходимо подставить среднюю относительную повреждаемость [3, 8].

3. Вычисляется постоянная физического износа для каждой конструкции по формуле

$$\lambda = \frac{-\ln \gamma}{t_{\Phi}} + \lambda_c. \quad (1.17)$$

Для здания или сооружения в целом необходимо подставлять средние значения данных величин [3, 8].

4. Вычисляется остаточный ресурс по формуле (1.8):

$$T = \frac{0,16}{\lambda}.$$

Для здания или сооружения в целом необходимо подставлять среднее значение постоянной физического износа [3, 8].

5. Проводится анализ полученных результатов и назначается окончательное значение остаточного ресурса.

5.1. Оценка проводилась укрупненно.

Если оценка остаточного ресурса проводилась укрупненно и по первому расчетному случаю (для всего здания или сооружения в целом), то полученное значение остается без изменений [3, 8].

Если оценка остаточного ресурса проводилась укрупненно по второму расчетному случаю (по группам элементов в зависимости от их конструктивной схемы и материала), то окончательная величина назначается минимальной из полученных значений [3, 8]:

$$T_{\text{ост. об}} = \min \begin{cases} T_{\text{ост}1} \\ \dots \\ T_{\text{ост}i} \end{cases}, \quad (1.18)$$

где  $T_{\text{ост}i}$  – остаточный ресурс  $i$ -го критического элемента [3, 8].

Если объект изначально или впоследствии разделен на несколько отдельных блоков, то окончательная величина для каждого блока назначается аналогично п. 5.1. В этом случае величина остаточного ресурса для всего здания будет равна минимальной из полученных значений для каждого блока в целом согласно формуле (1.18) [3, 8].

#### 5.2. Оценка проводилась поэлементно.

Если оценка остаточного ресурса проводилась поэлементно, то окончательно значения остаточного ресурса назначаются в два этапа [3, 8].

На *первом этапе* полученные значения остаются для всех данных элементов строительных конструкций. Составляется «карта» остаточных ресурсов строительных элементов [3, 8].

На *втором этапе* укрупненно рассчитывается остаточный ресурс по второму расчетному случаю (по группам элементов в зависимости от их конструктивной схемы и материала). Данная величина берется как среднее значение для данного типа элементов [3, 8]:

$$T_{\text{ост. об}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{\text{ост } i}, \quad (1.19)$$

где  $n$  – количество однотипных элементов [3, 8].

Окончательная величина назначается минимальной из полученных значений [3, 8].

У данной методики можно выделить ряд *достоинств* [3, 8]:

- универсальность. Данная методика подходит для расчета остаточного ресурса любых строительных конструкций при любых условиях эксплуатации [3, 8];
- учет отказов по общей причине. Благодаря использованию поправочного коэффициента можно учесть деградационные

процессы, происходящие в строительных конструкциях, и иные внешние воздействия, оказывающие влияние на их техническое состояние, которые непосредственно сложно или невозможно учесть или устранить. По сути, поправочный коэффициент учитывает течение тех процессов, на которые практически нельзя повлиять, что логично, если учитываются отказы по общим причинам в процессе эксплуатации здания или сооружения [3, 8];

- дифференциальный подход при расчете. Данная методика позволяет осуществлять поэлементный расчет строительных конструкций, что дает возможность строить «карты» остаточных ресурсов строительных элементов. Это позволяет грамотно планировать ремонтно-восстановительные работы на объекте [3, 8];

- простота получения исходных данных. Для того чтобы провести расчет, достаточно провести только визуальное обследование [3, 8];

- простота расчета. Данная методика очень проста в использовании и позволяет быстро оценить остаточный ресурс строительных конструкций [3, 8].

Недостаток у данной методики всего один – субъективность. Если назначение предельного возраста и срока эксплуатации еще можно обосновать, сославшись на нормативные источники или справочную литературу, то назначение коэффициентов всецело зависит от опыта и квалификации специалиста, проводящего расчет остаточного ресурса [3, 8].

## **1.4. Оценка остаточного ресурса по хронологическому или фактическому сроку эксплуатации**

На основе выведенного и доказанного автором уравнения оценки остаточного ресурса по возрасту [9] в общем виде распишем алгоритм методики расчета остаточного ресурса строительных конструкций по их возрасту (фактическому или хронологическому) [3, 10].

Последовательность расчета будет следующей [3, 10].

1. Определяются исходные данные для расчета.

1.1. Определяется уровень расчета: поэлементно или укрупненно.

Это зависит от объема проведенного обследования зданий и сооружений.

1.1.1. Расчет проводится укрупненно.

Если проведено только визуальное обследование и/или выборочное инструментальное. Здесь возможны два случая.

*Первый случай.* Если проведено только визуальное обследование, необходимо проводить расчет для всего объекта (здания или сооружения) в целом [3, 10].

*Второй случай.* Если помимо визуального обследования (осмотра) проведено выборочное инструментальное обследование, то расчет проводится укрупненно по группам элементов в зависимости от их конструктивной схемы (плита, балка, колонна, ферма, стена и т. д.) и материала (кирпич, бетон, дерево и т. д.) [3, 10].

1.1.2. Расчет проводится поэлементно.

Если проведено детальное инструментальное обследование (сплошное) [3, 10].

Если объект изначально или впоследствии разделен на несколько отдельных блоков, то определение уровня расчета производится для каждого блока согласно п. 1.1 [3, 10].

1.2. Выбираются те элементы строительных конструкций, для которых будет вестись расчет остаточного ресурса.

1.2.1. Если расчет проводится укрупненно.

В этом случае выбираются критические элементы, т. е. такие элементы, отказ которых приведет к отказу всего объекта (здания или сооружения) [3, 10].

Группировка строительных элементов выполняется по типу конструкции (колонна, балка, ферма и т. д.) и материалу (кирпич, бетон и т. д.) [3, 10].

Если физический износ разных однотипных элементов неодинаков (в практике обследования это практически всегда так), то необходимо назначить величину физического износа и осуществить деление строительных конструкций не только по типу конструкций и материалу, но еще и по величине физического износа. Выбор расчетной зависимости [21–29] для определения величины остаточного ресурса специалист, проводящий расчет, осуществляет на основе результатов обследования и изучения проектной и эксплуатационной документации объекта капитального строительства [3, 10].

Здесь можно выделить два случая назначения величины физического износа [3, 10].

*Первый случай.* Если здание или сооружение имеет небольшие габариты и малое количество этажей, то назначается физический износ  $\Phi_k$  для каждого однотипного элемента, а за конечный результат для каждого элемента в целом принимается среднее значение [3, 10] по формуле (1.12):

$$\Phi_{\text{ост. об}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Phi_{ki},$$

где  $n$  – количество однотипных элементов [3, 10];  $\Phi_{ki}$  – физический износ однотипного элемента.

*Второй случай.* Если здание или сооружение имеет значительные размеры в плане и/или большое количество этажей (3 и более) то в этом случае объект делится на отдельные сектора (блоки или секции). Для каждого однотипного элемента секции назначается величина физического износа  $\Phi_k$  и за конечный результат для каждого элемента секции в целом принимается среднее значение согласно формуле (1.12). Таким образом, в данном случае дальнейший расчет остаточного ресурса будет вестись посекторально [3, 10].

1.2.2. Если расчет проводится поэлементно.

В этом случае считаются все элементы, для которых производилось визуальное (осмотр) и инструментальное (определение прочности, влажности и т. д.) освидетельствование [3, 10].

*Примечание 1.* К однотипным следует относить ряд элементов, которые относятся к одному типу конструкции (колонна, балка, ферма и т. д.) и состоят из одного и того же строительного материала (кирпич, бетон и т. д.) [3, 10].

*Примечание 2.* Если имеются элементы строительных конструкций, которые находятся в ограниченно-работоспособном и/или аварийном состоянии, при этом их число незначительно и в целом они не оказывают сильного влияния на здание или сооружение, то они исключаются из расчета остаточного ресурса. Условно будем считать, что их остаточный ресурс равен нулю [3, 10].

Если объект изначально состоит или разделен на несколько отдельных блоков, то выбор элементов для расчета остаточного ресурса производится для каждого блока согласно п. 1.2 [3, 10].

1.3. Назначаются коэффициенты  $A$ ,  $B$ ,  $C$  для каждой конструкции.



Данные коэффициенты назначаются по результатам обследования здания или сооружения [3, 10].

Коэффициент  $A$  назначается по результатам изучения проектной и исполнительной документации на строительномонтажные работы на здание или сооружение в диапазоне от 0 до 1. При назначении данного коэффициента важно учитывать факт наличия данной документации, ее полноту, принятые проектные решения, использованные строительные материалы и технологии при строительстве объекта и другие факторы и параметры, которые важны при назначении данного коэффициента [3, 10].

Также важно установить ряд ограничений на назначаемую величину коэффициента  $A$  [3, 10].

*Первое ограничение.* В случае полного или частичного отсутствия проектной и исполнительной документации коэффициент  $A$  следует назначать не более 0,85 [3, 10].

*Примечание.* Если в ходе проведения обследования был осуществлен расчет несущей способности, и по его результатам определено, что она выше минимальных значений, то данное ограничение не применяется [3, 10].

*Второе ограничение.* В случае выявления в процессе обследования дефектов и повреждений, которые можно однозначно отнести к дефектам и повреждениям, которые имели место в процессе выполнения строительномонтажных работ, но при этом они не снижают несущую способность конструкций, но влияют на эксплуатационные характеристики, то коэффициент  $A$  следует назначать не более 0,90 [3, 10].

*Третье ограничение.* В случае выявления в процессе обследования дефектов и повреждений, которые можно однозначно отнести к дефектам и повреждениям, которые имели место в процессе выполнения строительномонтажных работ, при этом они снижают несущую способность конструкций (ниже проектных значений), то коэффициент  $A$  следует назначить равным нулю [3, 10].

*Четвертое ограничение.* Если срок эксплуатации обследуемого объекта превысил установленный для него проектный (нормативный) срок эксплуатации, то коэффициент  $A$  следует назначать не более 0,90 [3, 10].

Коэффициент  $B$  назначается по результатам изучения эксплуатационной и исполнительной документации на здание и сооружение, а также по результатам оценки условий эксплуатации на момент проведения обследования [3, 10].

Исполнительная документация в данном случае включает в себя [3, 10]:

- акты выполненных ремонтно-восстановительных работ [3, 10];
- проекты реконструкции, перепланировки и переоборудования зданий и сооружений [3, 10];
- акты сезонных осмотров строительных конструкций [3, 10];
- отчеты по результатам проведенных ранее обследований и т. д. [3, 10].

Наличие данной документации позволяет специалисту оценить условия эксплуатации объекта на протяжении всего срока его службы. В случае ее полного или частичного отсутствия условия эксплуатации принимаются по результатам проведенного обследования [3, 10].

Так же, как и для коэффициента  $A$ , устанавливается ряд ограничений на назначаемую величину коэффициента  $B$  [3, 10].

*Первое ограничение.* В случае полного или частичного отсутствия исполнительной и эксплуатационной документации коэффициент  $B$  следует назначать не более 0,85 [3, 10].

*Второе ограничение.* В случае выявления в процессе обследования дефектов и повреждений, которые не снижают несущую способность конструкций, но влияют на эксплуатационные характеристики, то коэффициент  $B$  следует назначать не более 0,80 [3, 10].

Коэффициент  $C$  принимается изначально равным единице. Иное значение данного коэффициента принимается при наличии соответствующего обоснования [3, 10].

Пример такого обоснования есть в атомной сфере. В этом документе, в частности, сказано: «2.1. При достижении ОИАЭ назначенного (или 30-летнего) срока эксплуатации...» [1], т. е. если отсутствует проектная документация, то предельный срок равен 30 годам [1].

Второй случай – когда предельный срок службы рассчитывают по одному или нескольким методам. В этом случае формально определять коэффициент  $C$  не нужно [3, 10].

Если необходимо провести оценку остаточного ресурса только для здания или сооружения в целом, тогда определяется среднее значение коэффициентов  $A, B, C$  по формуле [3, 10]:

$$(K)_{\text{сред}} = \frac{K_1 \cdot \alpha_1 + K_2 \cdot \alpha_2 + \dots + K_i \cdot \alpha_i}{\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_i}, \quad (1.20)$$

где  $K_i$  – коэффициент ( $A, B$  или  $C$ ) [3, 10];  $\alpha_i$  – коэффициент значимости, принимается согласно [5] либо назначается эмпирически [3, 10].

*Примечание.* Формула (1.20) применяется только в случае укрупненного расчета остаточного ресурса. Если проводится поэлементный расчет, то определение среднего значения коэффициентов для всего объекта в целом не производится [3, 10].

Если объект изначально состоит или разделен на несколько отдельных блоков, то определение среднего значения коэффициентов для каждого блока производится по формуле (1.20) в случае укрупненного расчета остаточного ресурса [3, 10].

1.4. Определяется предельно допустимый возраст каждой конструкции.

Здесь возможны два случая [3, 10].

1.4.1. Предельный возраст принимается в виде определенного значения.

Если расчет остаточного ресурса производится не для здания или сооружения в целом (укрупненный или поэлементный расчет строительных элементов), то предельный возраст каждой конструкции берется из проектно-конструкторской документации, а точнее – из паспорта на данную конструкцию. В случае ее отсутствия необходимо брать значения из нормативно-справочной литературы [3, 10].

Если необходимо провести оценку остаточного ресурса только для здания или сооружения в целом, принимается нормативный предельный срок эксплуатации, установленный для данного типа объекта капитального строительства в нормативных документах [3, 10].

1.4.2. Предельный возраст рассчитывается.

В этом случае выбирается один или несколько методов, позволяющих рассчитать значение предельного срока службы конструкции [3, 10].

1.5. Определяется «фактический» или хронологический возраст (срок эксплуатации) для каждой конструкции.

«Фактический» возраст строительных конструкций необходимо назначать в том случае, если здание или сооружение превысило свой проектный срок эксплуатации (если предельный срок эксплуатации определялся согласно п. 1.4.1) [3, 10].

Если необходимо провести оценку остаточного ресурса только для здания или сооружения в целом и используется «фактический» возраст, тогда определяется среднее значение «фактического» возраста объекта капитального строительства по формуле [3, 10] (1.13):

$$\left(t_{\text{фак}}\right)_{\text{сред}} = \frac{t_{\text{фак1}} \cdot \alpha_1 + t_{\text{фак2}} \cdot \alpha_2 + \dots + t_{\text{фак } i} \cdot \alpha_i}{\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_i}.$$

*Примечание.* Формула (1.13) применяется только в случае укрупненного расчета остаточного ресурса. Если проводится поэлементный расчет, то определение среднего «фактического» возраста для всего объекта в целом не производится [3, 10].

Определение «фактического» возраста строительных конструкций производится по нормативным документам [7] или иным научно-экспериментальным материалам [3, 10].

После определения «фактического» возраста здания исчисление возраста строительных конструкций продолжается как для хронологического возраста [3, 10].

Если здание или сооружение не превысило свой проектный срок эксплуатации и/или предельный срок службы определялся согласно п. 1.4.2, то в расчет подставляется фактический хронологический возраст здания [3, 10].

2. Вычисляется остаточный ресурс по формуле

$$T_{\text{ост}} = A \left[ -\frac{1}{B} t_{\text{экспл}} + C \cdot T_{\text{н}} \right]. \quad (1.21)$$

3. Проводится анализ полученных результатов и назначается окончательное значение остаточного ресурса.

3.1. Оценка проводилась укрупненно.

Если оценка остаточного ресурса проводилась укрупненно и по первому расчетному случаю (для всего здания или сооружения в целом), то полученное значение остается без изменений [3, 10].

Если оценка остаточного ресурса проводилась укрупненно по второму расчетному случаю (по группам элементов в зависимости от их конструктивной схемы и материала), то окончательная величина назначается минимальной из полученных значений [3, 10] по формуле (1.18):

$$T_{\text{ост. об}} = \min \begin{cases} T_{\text{ост}1} \\ \dots \\ T_{\text{ост}i} \end{cases},$$

где  $T_{\text{ост}i}$  – остаточный ресурс  $i$ -го критического элемента [3, 10].

*Примечание.* Если объект изначально состоит или разделен на несколько отдельных блоков, то окончательная величина для каждого блока назначается аналогично п. 3.1. В этом случае величина остаточного ресурса для всего здания будет равна минимальной из полученных значений для каждого блока в целом согласно формуле (1.18) [3, 10].

### 3.2. Оценка проводилась поэлементно.

Если оценка остаточного ресурса проводилась поэлементно, то окончательно значения остаточного ресурса назначают в два этапа [3, 10].

На первом этапе полученные значения остаются для всех элементов строительных конструкций. Составляется «карта» остаточных ресурсов строительных элементов [3, 10].

На втором этапе укрупненно рассчитывается остаточный ресурс по второму расчетному случаю (по группам элементов в зависимости от их конструктивной схемы и материала). Данная величина берется как среднее значение для данного типа элементов [3, 10] по формуле (1.19):

$$T_{\text{ост. об}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{\text{ост}i},$$

где  $n$  – количество однотипных элементов.

Окончательная величина назначается минимальной из полученных значений.

У данной методики можно выделить ряд *достоинств*:

- универсальность. Данная методика подходит для расчета остаточного ресурса любых строительных конструкций при любых условиях эксплуатации [3, 10];

- учет отказов по общей причине. Благодаря использованию коэффициента эксплуатации  $B$  можно учесть деградиационные процессы, происходящие в строительных конструкциях, и иные внешние воздействия, оказывающие влияние на их техническое состояние, которые непосредственно сложно или невозможно учесть или устранить. По сути, коэффициент  $B$  ускоряет течение времени срока эксплуатации, что логично, если учитываются отказы по общим причинам в процессе эксплуатации здания или сооружения [3, 10];

- дифференциальный подход при расчете. Данная методика позволяет осуществлять поэлементный расчет строительных конструкций, что дает возможность строить «карты» остаточных ресурсов строительных элементов. Это позволяет грамотно планировать ремонтно-восстановительные работы на объекте [3, 10];

- простота получения исходных данных. Для того чтобы провести расчет, достаточно провести только визуальное обследование [3, 10];

- простота расчета. Данная методика очень проста в использовании и позволяет быстро оценить остаточный ресурс строительных конструкций даже при отсутствии простейших вычислительных средств [3, 10].

Недостаток у данной методики всего один – субъективность. Если назначение предельного возраста и срока эксплуатации еще можно обосновать, сославшись на нормативные источники или справочную литературу, то назначение коэффициентов всецело зависит от опыта и квалификации специалиста, проводящего расчет остаточного ресурса [3, 10].

## 1.5. Метод оценки остаточного ресурса в зависимости от накопленного износа

Остаточный ресурс с учетом процесса коррозии арматуры вычисляется по формуле

$$T = \frac{\alpha \cdot \gamma_n^2 (V_1^2 \cdot \psi_{cr}^2 + V_2^2 \cdot \psi_t^2)}{k^2 \cdot c - \gamma_n^2 (V_1^2 \cdot \psi_{cr}^2 + V_2^2 \cdot \psi_t^2)}. \quad (1.22)$$

При  $V_1 = V_2$ :

$$T = \frac{\alpha \cdot \gamma_n^2 \cdot V^2 (\psi_{cr}^2 + \psi_t^2)}{k^2 \cdot c - \gamma_n^2 \cdot V^2 (\psi_{cr}^2 + \psi_t^2)}, \quad (1.23)$$

где  $\psi_{cr}$  – математическое ожидание предельной величины меры накопления износа [20];  $\psi_t$  – математическое ожидание меры накопления износа, установленное в процессе технической диагностики [20];  $V_1$  и  $V_2$  – коэффициенты вариации распределений соответственно  $\psi_{cr}$  и  $\psi_t$  [20];  $\gamma_n$  – нормативное значение характеристики безопасности, определяемое в зависимости от уровня надежности [20].

Остаточный ресурс с учетом прогибов (провисания) вычисляется по формуле

$$T = \frac{\alpha_f \cdot \gamma_n \sqrt{V_1^2 \cdot \psi_{cr}^2 + V_2^2 \cdot \psi_t^2}}{C_f - \gamma_n \sqrt{V_1^2 \cdot \psi_{cr}^2 + V_2^2 \cdot \psi_t^2}}. \quad (1.24)$$

При  $V_1 = V_2$ :

$$T = \frac{\alpha_f \cdot \gamma_n \cdot V \sqrt{\psi_{cr}^2 + \psi_t^2}}{C_f - \gamma_n \cdot V \sqrt{\psi_{cr}^2 + \psi_t^2}}. \quad (1.25)$$



Остаточный ресурс с учетом деградации в структуре бетона вычисляется по формуле

$$T = T_{res} \frac{1}{N_{cr}} \times \left[ 1 - \frac{\Psi_{cr} - \gamma_n \sqrt{V_1^2 \cdot \Psi_{cr}^2 + V_2^2 \cdot \Psi_t^2}}{\alpha_k} \right]^{-1/\alpha} \quad (1.26)$$

Данный метод очень сложно применять, поскольку он требует определенных наблюдений за объектом в течение некоторого времени для получения исходных данных для расчета. При этом он не освобождается от субъективных оценок, что приводит к большим погрешностям при определении величины остаточного ресурса. Также данный метод не учитывает отказы по общей причине [3].

## 1.6. Экспертный метод прогнозирования остаточного ресурса по нелинейной модели развития физического износа

Остаточный ресурс вычисляется по формуле

$$T = \frac{t(F + e^{m \cdot f})}{e^{m \cdot f} - 1}, \quad (1.27)$$

где  $t$  – текущее время эксплуатации;  $F$  – предельное значение физического износа;  $f$  – физический износ строительных конструкций в момент времени  $t$  (рис. 1.3);  $m$  – коэффициент, характеризующий форму кривой.

Значение параметра  $m$  при 70- и 80%-м значении предельного физического износа (рис. 1.4) [22]:

$$m = 0,014 \cdot \ln T + 0,082; \quad (1.28)$$

$$m = 0,012 \cdot \ln T + 0,073. \quad (1.29)$$

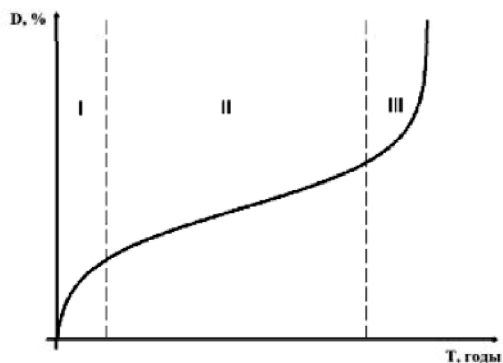


Рис. 1.3. График накопления повреждений во времени

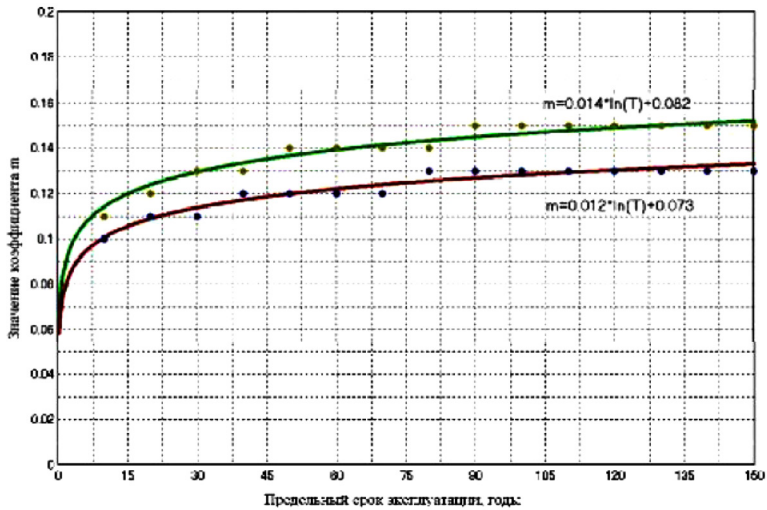


Рис. 1.4. Зависимость коэффициента  $m$  от предельного значения физического износа  $F$  и предельного срока службы конструкции  $T$

Достоинством данного метода можно считать то, то он позволяет получать объективные и точные оценки величины остаточного ресурса [3].

*Недостатки* же данного метода следующие:

- сложность вычислений. Поскольку остаточный ресурс и коэффициент  $m$  выводятся друг из друга, необходимо провести ряд итерационных операций, чтобы найти величину остаточного ресурса. Поэтому для проведения расчета необходимо иметь комплекс ЭВМ с программой, где будет вестись данный расчет [3];
- необходимы длительные наблюдения для установления зависимости остаточного ресурса от величины физического износа [3].

## 1.7. Применение двухпараметрических распределений для оценки остаточного ресурса строительных конструкций

Применение двухпараметрических распределений позволит одновременно определять остаточный ресурс строительных конструкций и систем инженерно-технического обеспечения как вместе, так и по отдельности [30].

К таким двухпараметрическим распределениям, которые можно использовать при расчете остаточного ресурса систем инженерно-технического обеспечения и строительных конструкций зданий и сооружений, можно отнести [30]:

- распределение Вейбулла;
- бета-распределение;
- гамма-распределение;
- распределение Стьюдента ( $t$ -распределение).

Такой выбор объясняется универсальностью данных распределений, которые могут подойти для описания работы различных по составу, компоновки и предназначению систем. Еще одним преимуществом таких распределений можно считать то, что в частных случаях они переходят в более простые распределения, которые уже применяются для оценки остаточного ресурса как строительных конструкций, так и инженерных систем зданий и сооружений [30].

*Распределение Вейбулла* хорошо описывает элементы, работающие в условиях динамических нагрузок (например, разброс усталостной прочности стали или пределы ее упругости). Также данное распределение нашло применение при описании сложных технических систем [30].

Функция надежности, или наработки на отказ, описывается уравнением [30]:

$$F(x) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1 - e^{-\lambda \cdot t^\alpha} & t \geq 0 \end{cases} \quad (1.30)$$

Функция надежности (вероятности безотказной работы) равна [30]:

$$P(x) = 1 - F(x) = e^{-\lambda \cdot t^\alpha}, \quad (1.31)$$

где  $\alpha$  – параметр формы кривой, задается по результатам обследования (рис. 1.5) [30];  $\lambda$  – параметр масштаба кривой или – применительно к строительству – вероятность отказа элемента строительных конструкций (см. рис. 1.5) [30].

При  $\alpha = 1$  распределение Вейбулла превращается в показательное (экспоненциальное), при  $\alpha \approx 3,3$  – в нормальное (распределение Гаусса) (см. рис. 1.5) [30].

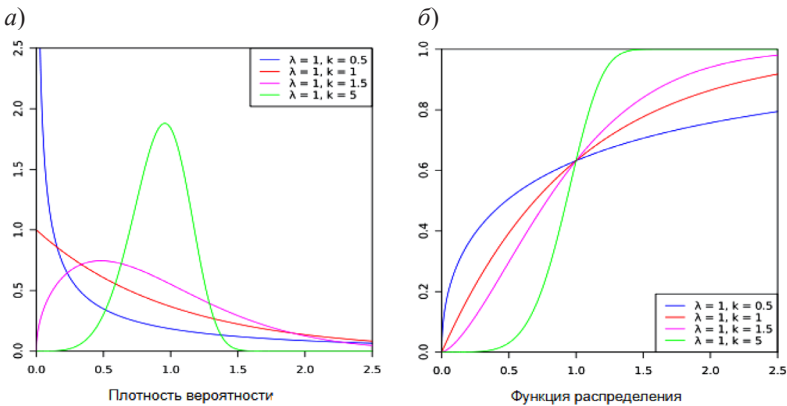


Рис. 1.5. Кривые плотностей (а) и функции (б) распределения Вейбулла

Таким образом, распределение Вейбулла рекомендуется применять для элементов строительных конструкций, работающих в условиях динамического нагружения, а также для деталей и узлов машин [30].

Остаточный ресурс инженерных систем объектов капитального строительства будет равен [30]:

$$t = \alpha \sqrt{\frac{-\ln P(x)}{\lambda}}. \quad (1.32)$$

*Бета-распределение* используется для описания случайных величин, значения которых ограничены конечным интервалом (рис. 1.6) [30].

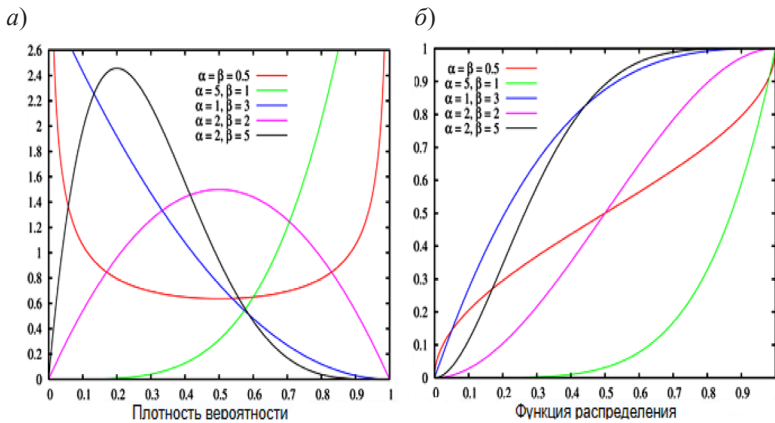


Рис. 1.6. Кривые плотностей (а) и функции (б) бета-распределения

Интегральная функция надежности или наработки на отказ описывается уравнением [30]

$$F(x) = \int_0^1 \frac{\Gamma(a+b)x^{\alpha-1} \cdot (1-x)^{b-1}}{\Gamma(a) \cdot \Gamma(b)} dx. \quad (1.33)$$

Функция надежности (вероятности безотказной работы) равна [30]:

$$P(x) = 1 - \int_0^x \frac{\Gamma(a+b)t^{\alpha-1} \cdot (1-t)^{b-1}}{\Gamma(a) \cdot \Gamma(b)} dt, \quad (1.34)$$

где  $\Gamma(a)$  и  $\Gamma(b)$  – гамма-функции.

Бета-распределение хорошо применять тогда, когда рассматривается ограниченный по времени срок службы строительных конструкций, например, время между проведениями капитального ремонта и инженерных систем [30].

*Гамма-распределение* используется при описании появления отказов во время нормальной работы системы с резервированием и старения элементов [30].

Интегральная функция надежности или наработки на отказ строительных конструкций равна

$$F(x, \alpha, \lambda) = \frac{\lambda^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \int_0^x t^{\alpha-1} \cdot e^{-\lambda t} dt. \quad (1.35)$$

Функция надежности (вероятности безотказной работы строительных конструкций) равна [30]:

$$P(x) = 1 - \frac{\lambda^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \int_0^x x^{\alpha-1} \cdot e^{-\lambda x} dx, \quad (1.36)$$

где  $\alpha > 0$  – параметр формы кривой, задается по результатам обследования (рис. 1.7) [30]; если параметр  $\alpha$  принимает целое значение, то такое гамма-распределение также называется *распределением Эрланга* [30];  $\lambda > 0$  – параметр масштаба кривой или –

применительно к строительству – вероятность отказа элемента строительных конструкций (см. рис. 1.7) [30]; гамма-функция

$$\Gamma(a) = \int_0^{\infty} t^{a-1} \cdot e^{-t} dt. \quad (1.37)$$

При  $\alpha = 1$  гамма-распределение превращается в показательное (экспоненциальное), при  $\alpha \rightarrow \infty$  превращается в нормальное (распределение Гаусса) (см. рис. 1.7) [30].

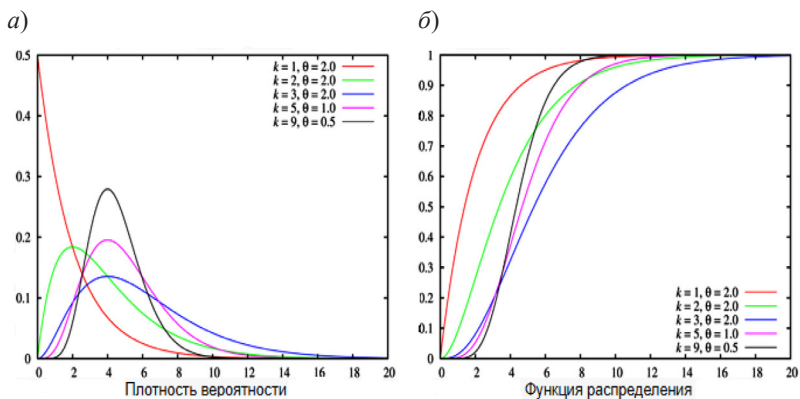


Рис. 1.7. Кривые плотностей (а) и функции (б) гамма-распределения

Данное распределение рекомендуется применять тогда, когда срок эксплуатации строительных конструкций и инженерных систем превысил нормативный срок, установленный в нормативных документах или проектом, а также для инженерных систем, имеющих резервирование [30].

*Распределение Стьюдента (t-распределение)* рекомендуется применять тогда, когда срок эксплуатации строительных конструкций и инженерных систем превысил нормативный срок, установленный в нормативных документах или проектом [30].



Интегральная функция надежности равна

$$F(x) = \frac{1}{2^{\frac{k-1}{2}} \cdot \Gamma(a) \cdot \sqrt{k} \cdot \pi} \cdot \int_{-\infty}^x \left(1 + \frac{x^2}{k}\right)^{-\frac{k-1}{2}} dx. \quad (1.38)$$

Функция надежности (вероятности безотказной работы строительных конструкций) равна [30]:

$$P(x) = 1 - \frac{1}{2^{\frac{k-1}{2}} \cdot \Gamma(a) \cdot \sqrt{k} \cdot \pi} \cdot \int_{-\infty}^x \left(1 + \frac{x^2}{k}\right)^{-\frac{k-1}{2}} dx. \quad (1.39)$$

При  $k \rightarrow \infty$  распределение Стьюдента превращается в нормальное (распределение Гаусса) (рис. 1.8).

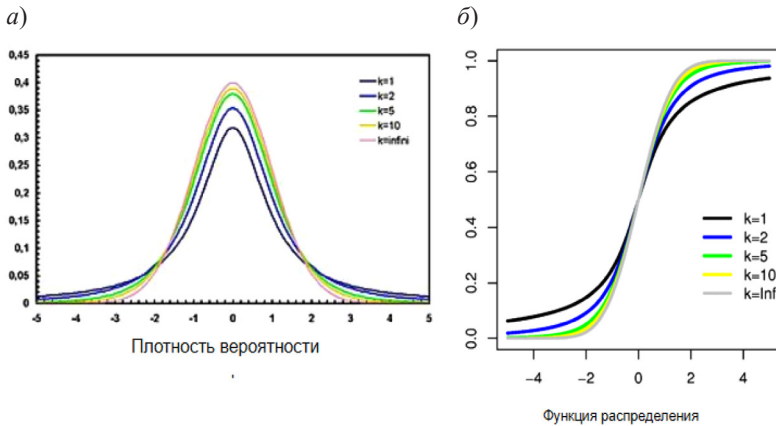


Рис. 1.8. Кривые плотностей (а) и функции (б) распределения Стьюдента

Рассмотрев кратко данные распределения, автор предлагает следующий алгоритм расчета остаточного ресурса строительных конструкций и инженерных систем по двухпараметрическим распределениям.

**Порядок расчета остаточного ресурса  
инженерных систем  
и строительных конструкций  
по двухпараметрическим распределениям**

1. Определение элементов (систем) инженерно-технического обеспечения зданий и сооружений и строительных конструкций, для которых будет рассчитываться остаточный ресурс [31].

2. Выбор двухпараметрических распределений для оценки остаточного ресурса [31].

При выборе того или иного распределения необходимо руководствоваться следующими параметрами факторами: тип системы (простая или сложная, с резервом или без, последовательное или параллельное соединение элементов и т. д.), главенствующий фактор воздействия (старение, износ, динамическое воздействие и др.) и иные параметры и факторы, которые были выявлены в процессе обследования [31].

3. Определение интенсивности отказов [31].

В общем случае интенсивность отказов для одного элемента, для которого используются сразу несколько распределений, будет разной. Это необходимо учесть при расчете [31].

В тех случаях, когда были зафиксированы случаи отказов элемента (системы), расчет ведется по формуле [31]

$$\lambda = \frac{n}{N_{\text{сп}} \cdot t} = \frac{n}{(N - n)t} = \frac{f(t)}{P(t)}, \quad (1.40)$$

где  $N$  – общее число рассматриваемых изделий;  $f(t)$  – скорость отказов, т. е. количество элементов, отказавших к моменту времени  $t$  в единицу времени;  $P(t)$  – количество элементов,

не отказавших к моменту времени  $t$ ;  $n$  – число отказавших элементов за время  $t$ ;  $t$  – интервал времени;  $N_{\text{cp}}$  – среднее число исправно работающих элементов за время  $t$ :

$$N_{\text{cp}} = \frac{N_i + N_{i+1}}{2}, \quad (1.41)$$

где  $N_i$  – число исправно работающих элементов в начале эксплуатации;  $N_{i+1}$  – число исправно работающих элементов на момент обследования;

В тех случаях, когда отказы не фиксировались в течение срока эксплуатации консервативно для расчета показателя надежности принимается один отказ за определенный период их эксплуатации. Этот период может быть назначен по нормативным документам или документам на данную систему [31].

В таком случае сначала находят среднюю интенсивность отказов по формуле [31]

$$\lambda_{\text{cp}} = \frac{1}{T_{\text{нор}}}. \quad (1.42)$$

За расчетную тогда принимают гамма-процентную интенсивность отказов, вычисляемую по формуле [31]

$$\lambda_{\gamma} = \lambda_{\text{cp}} \cdot k, \quad (1.43)$$

где  $k$  – квантиль экспоненциального распределения [31].

Также необходимо при расчете учитывать отказы по общей причине [31].

Тогда суммарное значение интенсивности отказов можно вычислить, применив метод  $\beta$ -фактора [31]:

$$\lambda_{\Sigma} = \lambda_{\text{рас}} + \lambda_{\text{оп}}, \quad (1.44)$$

где  $\lambda_{\text{рас}}$  – расчетная интенсивность отказов, вычисляемая по п. 3 порядка расчета остаточного ресурса инженерных систем [31];  $\lambda_{\text{оп}}$  – интенсивность отказов по общей причине.

4. Определение параметра формы кривой [31].

Данный параметр определяется на основе данных обследования и изучения имеющейся проектной, исполнительной и эксплуатационной документации [31].

5. Задаем для выбранных элементов вероятность безотказной работы [31].

Данная величина задается на основании тех данных, которые были получены при техническом обследовании инженерно-технических систем и строительных конструкций зданий и сооружений [31].

6. Находим остаточный ресурс элемента (системы) [31].

7. Проводим анализ полученных значений и назначаем окончательную величину остаточного ресурса элемента (системы) [31].

Необходимо оценить разброс полученных значений. Оценка проводится относительно среднего. Выбор среднего значения, относительно которого производится оценка разброса величин остаточного ресурса, объясняется тем, что в теории математической статистики оно считается наиболее близким к истинному значению [31].

Среднее значение равно [31]:

$$T_{\text{пред. сред}} = \frac{T_{\text{пред}1} + \dots + T_{\text{пред}i}}{i}, \quad (1.45)$$

где  $T_{\text{пред}i}$  – значение остаточного ресурса, определенное по  $i$ -му распределению [31];  $i$  – количество используемых распределений [31].

Оценка разброса значений относительно среднего по формуле [31]:

$$\Delta = \frac{T_{\text{пред } i} - T_{\text{пред. сред}}}{T_{\text{пред. сред}}} 100 \%. \quad (1.46)$$

Если разброс не превышает 20 %, то за окончательную величину принимаем среднее значение. Если превышает, то необходимо заново провести расчет [31].

Данный алгоритм расчета остаточного ресурса строительных конструкций зданий и сооружений имеет свои достоинства и недостатки [31].

*Достоинства:*

- универсальность. Данный метод можно применять ко всем элементам без исключения [31];
- абстрактность. Применение абстрактных исходных данных (вероятность безотказной работы и интенсивность отказов) позволяет учесть множество различных факторов технического и эксплуатационного характера [31].

Недостаток – субъективность. Задание исходных данных (вероятность безотказной работы и интенсивность отказов) и выбор способа расчета производит сам обследователь. Поэтому точность данного метода сильно зависит от квалификации и опыта того, кто проводит обследование и расчет [31].

В заключение хотелось бы отметить пути совершенствования данного метода [31].

*Первый путь.* Применение методов логико-вероятностного моделирования для расчета остаточного ресурса систем инженерно-технического обеспечения и строительных конструкций. Это позволит улучшить результаты расчета остаточного ресурса при учете взаимодействия разных систем и элементов [31].

*1.7. Применение двухпараметрических распределений для оценки...*

---

*Второй путь.* Применение совместно с другими методиками расчета остаточного ресурса для сравнения полученных результатов с целью повышения их точности и достоверности [31].

## **Глава 2. ВЕРОЯТНОСТНО- ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА**

### **2.1. Оценка остаточного ресурса по модифицированному методу с применением экспоненциального распределения**

Данный метод, как и предыдущий, в своей основе использует экспоненциальное распределение. Разница заключается в том, что здесь вместо относительной надежности используется коэффициент относительного запаса несущей способности. Постоянная физического износа определяется аналогичным образом.

Формула в этом случае примет следующий вид [15]:

$$T = \frac{-\ln \omega}{\lambda}. \quad (2.1)$$

Коэффициент относительного запаса несущей способности для здания (сооружения) в целом является приведенным. Естественно, в расчет берутся только несущие конструкции [15]:

$$\omega = \frac{\sum \Delta N_l \cdot A_{vl} + \sum \Delta M_l \cdot A_{gl} + \sum \Delta Q_l \cdot A_{gl}}{\sum A_{vl} + 2 \cdot \sum A_{gl}}, \quad (2.2)$$

где  $\Delta N_I$  – запас несущей способности  $i$ -го вертикального элемента (колонна, столб, стойка и т. д.) на действие вертикальной силы [15]:

$$\Delta N_I = N_{pi} - N_{ui}, \quad (2.3)$$

где  $N_{pi}$  – проектная несущая способность вертикального элемента на действие вертикальной силы [15];  $N_{ui}$  – продольное усилие, приложенное к вертикальному элементу [15];  $A_{vj}$  – площадь обрушения, которую вызовет авария  $i$ -го вертикального элемента [15];  $\Delta M_I$  – запас несущей способности на действие изгибающего момента  $i$ -го горизонтального элемента (ригели, фермы, плиты и т. д.) [15]:

$$\Delta M_I = M_{pi} - M_{ui}, \quad (2.4)$$

где  $M_{pi}$  – проектная несущая способность горизонтального элемента на действие момента [15];  $M_{ui}$  – изгибающий момент, действующий в сечении горизонтального элемента [15];  $\Delta Q_I$  – запас несущей способности на действие перерезывающей силы  $i$ -го горизонтального элемента (ригеля, фермы, плиты и т. д.) [15]:

$$\Delta Q_I = Q_{pi} - Q_{ui}, \quad (2.5)$$

где  $Q_{pi}$  – проектная несущая способность горизонтального элемента на действие перерезывающей силы [15];  $Q_{ui}$  – перерезывающая сила, действующая у опор горизонтального элемента [15];  $A_{gj}$  – площадь обрушения, которую вызовет авария  $i$ -го горизонтального элемента [15].

Запасы несущей способности на действие изгибающего момента и перерезывающей силы определяются при проведении поверочных расчетов конструкций на действующие нагрузки.



Если необходимо определить величину остаточного ресурса здания с момента обследования, то в формулы (2.3)–(2.5) вместо величин проектной несущей способности конструкций  $N_{pi}$ ,  $M_{pi}$ ,  $Q_{pi}$  следует подставлять значения фактической несущей способности конструкций  $N_{fi}$ ,  $M_{fi}$ ,  $Q_{fi}$ , рассчитанные по результатам обследования технического состояния с учетом всех нарушений (дефектов и повреждений).

Рассмотрим достоинства и недостатки данного метода, а затем сравним его с предыдущим.

*Достоинства:*

- дифференцированное рассмотрение конструкций. В отличие от предыдущего метода, не имеет сложностей, поскольку несущая способность у всех элементов всегда отличается друг от друга [3];
- универсальность – как и у предыдущего метода [3].

*Недостатки:*

- субъективность. Так же, как и предыдущий метод, требует назначения коэффициентов повреждаемости [3];
  - не учитывает спонтанные факторы (отказы по общей причине) – как и предыдущий метод [3];
  - требует проведения инструментального обследования.
- В отличие от предыдущего метода, не применим для визуального обследования. Причем важно учесть, что точность определения несущей способности зависит от способа ее определения (разрушающий или неразрушающий, косвенный или прямой) [3].

## 2.2. Вероятностный расчет гамма-процентного остаточного ресурса металлических строительных конструкций

На основании проведенного диагностирования и принятых фактора повреждения и параметра технического состояния элементов металлоконструкций возможен и вероятностный расчет гамма-процентного остаточного ресурса.

Так, при прогнозировании остаточного ресурса металлоконструкций, когда происходит только коррозионный износ толщины стенки элемента металлоконструкций, расчет ресурса ведется по изменению текущей толщины стенки.

Представим текущую толщину стенки в виде

$$S_f = S_n - S_0 - S, \quad (2.6)$$

где  $S_n$  – номинальная толщина стенки;  $S_0$  – начальное технологическое изменение толщины стенки;  $S$  – износ стенки.

Если начальное технологическое отклонение толщины стенки  $S_0$  и абсолютную величину износа стенки  $S$  привести к номинальной толщине стенки элемента, на котором проводятся замеры:

$$\sigma_0 = \frac{S_0}{S_n}; \quad \sigma = \frac{S}{S_n}. \quad (2.7)$$

Тогда условие прочности можно представить в виде

$$[\sigma]_д \geq \sigma, \quad \text{где } [\sigma]_д = 1 - S_p / S_n - \sigma_0. \quad (2.8)$$

Здесь  $[\sigma]_д$  и  $\sigma$  – допустимый и текущий относительный износ стенки;  $\sigma_0$  – начальное изменение толщины стенки.

Предположим, что процесс износа стенки описывается степенной функцией

$$\sigma = a \cdot t^m, \quad (2.9)$$

где  $a$  – случайный,  $m$  – детерминированный параметры.

Полагаем, что параметр  $a$  имеет нормальное распределение.

При  $m = 1$  износ осуществляется с постоянной скоростью  $a$ , при  $m > 1$  процесс износа ускоряется при эксплуатации, при  $m < 1$  – замедляется.

Если диагностирование проводилось один раз, показатель степени  $m$  рекомендуется принимать равным единице.

Если диагностирование проводилось не один раз ( $n \geq 2$ ), то параметр  $m$  может быть определен по результатам статистической обработки замеров толщины стенки.

Необходимые для расчетов значения среднего относительного износа диагностируемого элемента объекта на момент  $i$ -го диагностирования определяются по формуле

$$\sigma_{i, \text{cp}} = \frac{1}{N_i} \cdot \sum_{k=1}^{N_i} \left( 1 - \frac{S_k}{S_{nk}} \right), \quad (2.10)$$

где  $S_k$  – текущая толщина стенки в месте  $k$ -го замера;  $S_{nk}$  – номинальная толщина стенки диагностируемого элемента.

В первом случае, когда при оценке остаточного ресурса приходится иметь дело только с результатами одного диагностирования, величина  $a_{\text{cp}} = \sigma_{\text{cp}} / t_{\text{д}}^m$ , где  $t_{\text{д}}$  – время последнего диагностирования.

Статическая оценка среднего квадратического отклонения параметра  $a$  – величина  $Q_a$  – определяется по формуле

$$Q_a = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{k=1}^N \left( \frac{\sigma_k^2 - Q_\sigma^2}{t_i^{2m}} - a_{\text{cp}}^2 \right)}, \quad (2.11)$$

где  $\sigma = \sigma_k = (S_n - S_k) / S_n$ ;  $Q_a$  – начальное среднеквадратическое отклонение толщины стенки;  $t_i$  – время диагностирования, когда проводился  $k$ -й замер толщины стенки.

В начальный момент времени  $a_{\text{cp}} = Q_a = 0$ . Если диагностирование проводилось в момент времени  $t_d$ , то

$$Q_a = \frac{\sqrt{Q_s^2 + Q_d^2}}{t_d}, \quad (2.12)$$

где  $Q_s$  – среднее квадратическое отклонение относительной толщины стенки в момент времени  $t_d$ .

Положим, что допускаемый относительный износ  $[\sigma]$  также имеет нормальное распределение. Тогда из уравнения (2.9) его среднее значение имеет вид

$$[\sigma]_{\text{cp}} = 1 - \bar{S}_{\text{cp}}, \quad (2.13)$$

где  $\bar{S}_{\text{cp}} = S_p / S_n$ .

Дисперсия допустимого относительного износа определяется по формуле

$$Q^2[\sigma] = Q_s^2 + Q_d^2, \quad (2.14)$$

где  $Q_s^2$  и  $Q_d^2$  – дисперсии начального технологического отклонения и значений  $S_p / S_n$  для всех диагностируемых элементов.

Все эти величины могут быть определены с заданной точностью. Однако целесообразность детального расчета невелика,

когда износ достаточно высок, и именно его рассеяние определяет величину остаточного ресурса.

Остаточный ресурс будет равен

$$t_{\text{ост}} = t_{\text{д}} \cdot (\gamma^{1/m} - 1), \quad (2.15)$$

где

$$\gamma = \frac{[\sigma]_{\text{ср}} \cdot \sigma_{\text{ср}} - U_r \cdot \sqrt{Q_s^2} \cdot [\sigma]_{\text{ср}}^2 + Q^2 (\sigma_{\text{ср}}^2 - U_r^2 \cdot Q_{\text{д}}^2)}{\sigma_{\text{ср}}^2 - U_r^2 \cdot Q_{\text{д}}^2}, \quad (2.16)$$

где  $[\sigma]_{\text{ср}}$  и  $\sigma_{\text{ср}}$  – допускаемое и текущее средние значения относительного износа при диагностировании в момент времени  $t_{\text{д}}$ ;  $Q[\sigma]$  и  $Q_{\text{д}} = \sqrt{Q_{\sigma}^2 + Q_0^2}$  – среднее квадратическое отклонение допускаемого и текущего значений относительного износа (если  $Q_{\sigma} \leq Q_0$ , то полагается  $Q_{\text{д}} = 0$ );  $U_r$  – квантиль нормального распределения, соответствующий вероятности.

По уравнениям (2.15), (2.16) определяется точечное значение гамма-процентного остаточного ресурса. Для получения нижнего интервального значения воспользуемся идущей в запас приближенной оценкой. Полагаем, что интервальные значения подсчитываются по тем же формулам (2.15), (2.16), что и точечные, но в них вместо среднего значения и среднеквадратического отклонения текущего износа подставляются их верхние оценки с односторонней доверительной вероятностью  $q$ .

В результате данного решения будет найдена нижняя доверительная граница гамма-процентного остаточного ресурса. Изложенная методика расчета остаточного ресурса может быть обобщена на случай, когда со временем изменяются механические свойства материалов диагностируемых элементов объекта. По существу, это эквивалентно изменению во времени допускаемого относительного износа  $[\sigma]$ .

Полагаем, что процесс деградации свойств материала определяется одной и той же функцией времени. Примем, что  $Q[\sigma]$  и  $[\sigma]_{\text{cp}}$  обозначают среднее значение допускаемого износа и его среднеквадратическое отклонение, определенные в момент диагностирования  $t_d$ . Тогда их текущие значения при  $t \geq t_d$  определяются по формулам

$$[\sigma]_d(t) = [\sigma]_{\text{cp}} \cdot F(t); \quad (2.17)$$

$$Q[\sigma](t) = Q[\sigma] \cdot F(t). \quad (2.18)$$

Здесь  $F(t)$  – монотонно убывающая функция времени, равная единице при  $t = t_d$ . Уравнение для точечной оценки остаточного ресурса примет вид

$$U_r = \frac{[\sigma]_{\text{cp}} \cdot F(t_{\text{ост}} + t_d) - \sigma_{\text{cp}} \cdot (1 + t_{\text{ост}} / t_d)^m}{\sqrt{Q_s^2 \cdot [\sigma] \cdot [F(t_{\text{ост}} + t_d)]^2 + Q_a^2 \cdot (1 + t_{\text{ост}} / t_d)^{2m}}}. \quad (2.19)$$

Наиболее просто задача решается при линейных функциях текущего ( $m = 1,0$ ) и допускаемого ( $F(t) = 1 - C \cdot t_{\text{ост}} / t_d$ ) относительных износов. В этом случае возможно получение точного решения, однако в общем случае необходимо решать задачу методом последовательных приближений.

Когда на момент прогнозирования остаточного ресурса отсутствуют в полном объеме данные об износе элементов объекта, однако имеются данные по отказам и информация о величине общего (среднего) износа на момент диагностирования, возможен расчет гамма-процентного остаточного ресурса по отказам ее элементов.

Величина общего износа равна произведению средней скорости износа на величину наработки к моменту диагностирования

$$S_{\text{cp}} = V_{\text{cp}} \cdot t_d. \quad (2.20)$$

Рассмотрим линейную модель износа. Линейная модель износа является в большинстве случаев консервативной и достаточно широко используется на практике при расчете остаточного ресурса. Если имеется определенный банк данных, который можно использовать при проектировании для назначения прибавки на коррозию и которым можно воспользоваться и при диагностировании, однако учитывая при этом следующее ограничение:

$$V_{\text{сп}} < \frac{0,85 \cdot S_n - S_r}{t_d}. \quad (2.21)$$

Положим, что условие прочности элемента имеет вид (2.8), но рассеиванием  $[\sigma]$  будем пренебрегать (такое допущение приводит к некоторому занижению значения расчетного остаточного ресурса и идет в запас), и, таким образом, формула для определения  $[\sigma]$  имеет следующий вид:

$$[\sigma] = 1 - \frac{S_r}{S_n}. \quad (2.22)$$

Допустим, что доля отказавших элементов на момент диагностирования  $t_d$  составляет  $a = (r + 1) / Z$ , где  $r$  – число отказавших элементов,  $Z$  – полное число элементов. При этом точечная оценка вероятности безотказной работы на момент диагностирования равна

$$P(t_d) = 1 - a. \quad (2.23)$$

В данном случае полагается, что на момент диагностирования возможно дополнительное, незафиксированное разрушение.

Таким образом, в качестве расчетного числа разрушений принимается действительное значение плюс единица, что идет в запас.

Вероятность безотказной работы на момент диагностирования  $t_d$  имеет вид

$$P(t_d) = \Phi \frac{[\sigma] - a_{\text{cp}} \cdot t_d}{Q_Q \cdot t_d}. \quad (2.24)$$

Выражение для расчета остаточного ресурса:

$$t_{\text{ост}} = t_d \cdot \left( [\sigma] - \sigma_{\text{cp}} \right) / \frac{[\sigma]}{\frac{U_{1-\alpha}}{U_{\gamma(1-\alpha)}} - 1} + \sigma_{\text{cp}}. \quad (2.25)$$

В данном выражении  $[\sigma]$  определяется по формуле (2.22), а  $\sigma_{\text{cp}}$ :

$$\sigma_{\text{cp}} = a_{\text{cp}} \cdot t_d = \frac{V_{\text{cp}}}{S_n} \cdot t_d. \quad (2.26)$$

Задаваясь величиной  $V_{\text{cp}}$  по формулам (2.25) и (2.26) можно определить остаточный ресурс.

Рассмотренный метод расчета может быть применен для ориентировочных оценок, если отсутствуют конкретные изменения параметра технического состояния металлических элементов, однако в их паспортах содержится достоверная информация об имевших место разрушениях. В расчете необходимо учитывать только те отказы, которые связаны с износом и возникшими недоступными дефектами, приведшими в результате к разрушению. Кроме того, необходимо располагать справочными данными по скорости общей коррозии. При этом в формулу (2.26) должна быть подставлена верхняя оценка средней



скорости коррозии  $a_{\text{ср}}^*$ . После проведения двух расчетов в качестве действительного значения остаточного ресурса следует принимать минимальную из полученных оценок.

Достоинством предлагаемого метода оценки остаточного ресурса по отказам является то, что поскольку физическая природа этих отказов роли не играет, то метод может быть распространен и на другие факторы разрушения.

За ресурс остаточной работоспособности принимается минимальное из полученных значений расчетного ресурса основных несущих ее элементов, которое обеспечит безопасную эксплуатацию объекта в течение прогнозируемого назначенного ресурса.

### 2.3. Определение остаточного ресурса металлических конструкций по числу циклов нагружения

Число образцов должно обеспечить представительную выборку для оценки после их испытаний среднего остаточного ресурса с заданной доверительной вероятностью.

Одну партию образцов в количестве  $N_{\text{ст}}^{\text{н}} + N_{\text{уст}}^{\text{н}}$  подвергают рекристаллизационному отжигу при температуре 650 °С в течение 1 часа с целью устранения влияния старения (этим достигается имитация исходного состояния металла), вторую партию в количестве  $N_{\text{ст}}^{\text{з}} + N_{\text{уст}}^{\text{з}}$  оставляют в состоянии, соответствующем состоянию металла при отборе образцов при обследовании.

Рассчитывают среднее число циклов нагружения до разрушения отожженных образцов по формуле

$$\bar{n}_{\text{н}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{уст}}^{\text{н}}} \frac{n_{\text{н}}(i)}{N_{\text{уст}}^{\text{н}}}, \quad (2.27)$$

где  $n_{\text{н}}(i)$  – число циклов нагружения к моменту разрушения  $i$ -го отожженного образца из металла;  $N_{\text{уст}}^{\text{н}}$  – число отожженных образцов из металла, испытанных на усталость.

Рассчитывают среднюю наработку до разрушения отожженных образцов по формуле

$$\bar{t}_{\text{н}} = \frac{\bar{n}_{\text{н}}}{n_{\text{г}}}, \quad (2.28)$$

где  $n_{\text{г}}$  – среднее число циклов нагружения за один год.

С удовлетворительной погрешностью можно считать  $n_{\text{г}} \geq 30$ .

Рассчитывают среднее число циклов нагружения до разрушения образцов из металла эксплуатируемых металлоконструкций по формуле

$$\bar{n}_3 = \sum_{i=1}^{N_{\text{уст}}^3} \frac{n_3(i)}{N_{\text{уст}}^3}, \quad (2.29)$$

где  $n_3(i)$  – среднее число циклов нагружения до разрушения образца из металла;  $N_{\text{уст}}^3$  – число образцов из металла, испытанных на усталость.

Рассчитывают степень деформационного старения металла по формуле

$$C_c = \frac{\bar{n}_n - t_3 \cdot n_r}{\bar{n}_3}, \quad (2.30)$$

где  $n_r$  – среднее число циклов нагружения конструкции за один год.

Рассчитывают средний предел прочности металлоконструкции по результатам испытаний отоженных образцов по формуле

$$\bar{\sigma}_b^n = \sum_{i=1}^{N_{\text{ст}}^n} \frac{\sigma_b^n(i)}{N_{\text{ст}}^n}, \quad (2.31)$$

где  $\sigma_b^n(i)$  – предел прочности  $i$ -го отоженного образца из металла, МПа;  $N_{\text{ст}}^n$  – число отоженных образцов из металла, испытанных на статическое растяжение.

Рассчитывают средний предел прочности металла эксплуатируемых металлоконструкций по формуле

$$\bar{\sigma}_b^3 = \sum_{i=1}^{N_{\text{ст}}^3} \frac{\sigma_b^3(i)}{N_{\text{ст}}^3}, \quad (2.32)$$

где  $\sigma_b^3(i)$  – предел прочности  $i$ -го образца из металла, МПа;  $N_{ст}^3$  – число образцов из металла, испытанных на статическое растяжение.

Рассчитывают коэффициент упрочнения металла по формуле

$$K_y = \frac{\overline{\sigma}_b^3}{\overline{\sigma}_b^n}. \quad (2.33)$$

Рассчитывают коэффициент деформационного старения металла по формуле

$$C_D = \frac{K_y}{C_c}. \quad (2.34)$$

Рассчитывают средний остаточный ресурс трубопровода по формуле

$$t_{ост} = \frac{\overline{t}_n - t_э}{C_D}. \quad (2.35)$$

Достоинством данной методики можно считать то, что получаемое значение будет объективным, поскольку исходные данные получаются по результатам испытаний.

Недостатком же такого подхода можно считать то, что он требует большого числа отобранных образцов, что редко можно сделать. Поэтому его применение сильно ограничено.

## 2.4. Оценка остаточного ресурса по критерию коррозионной стойкости

Поскольку различные участки поверхности металлоконструкции при эксплуатации могут подвергаться различной интенсивности повреждающих воздействий, полученные данные необходимо проверять на однородность. Для этого выборку разделяют на две, соответствующие сравниваемым участкам поверхности металлоконструкции. Проверку осуществляют по критерию Стьюдента по формуле

$$t = \frac{\bar{h}_1 - \bar{h}_2}{S \cdot \sqrt{\frac{1}{n_1} - \frac{1}{n_2}}} < t_{\tau}, \quad (2.36)$$

где  $t_{\tau}$  – табличное значение критерия Стьюдента;  $\bar{h}_1, \bar{h}_2$  – средние глубины коррозии образцов на первом и втором участках поверхности;  $n_1, n_2$  – число точек измерений на первом и втором участках;  $S$  – объединенная оценка среднего квадратического отклонения, вычисляемая по формуле

$$S = \sqrt{\frac{S_1^2 (n_1 - 1) + S_2^2 (n_2 - 1)}{n_1 + n_2 - 2}}, \quad (2.37)$$

в которой  $S_1, S_2$  – оценки среднеквадратических отклонений глубины коррозии на первом и втором участках:

$$S_{1(2)} = \sqrt{\frac{\sum (h_{1i} - \bar{h}_1)^2}{n_{1(2)} - 1} - \left(\frac{\Delta}{3}\right)^2}, \quad (2.38)$$

где  $\Delta$  – предельная ошибка метода измерений; при определении глубины коррозии по остаточной толщине стенки в эту ошибку входят отклонения в пределах допуска толщины проката металла.

В случае выполнения условия (2.36) различие в глубине коррозии образцов на первом и втором участках не является статистически значимым и результаты испытаний могут быть объединены в одну выборку, что позволяет повысить точность оценки скорости коррозии металлоконструкции. При невыполнении условия (2.36) ресурс рассматриваемых участков определяют раздельно.

Определение коэффициента вариации глубин коррозии по поверхности  $V$  осуществляется по формуле

$$V = \frac{S}{\bar{h}}. \quad (2.39)$$

*Определение параметров распределения глубин коррозии.* Параметры распределения определяются для функции Вейбулла

$$F(h) = 1 - e^{-(h/a)^b}, \quad (2.40)$$

где  $a$  – параметр масштаба;  $b$  – параметр формы.

Параметр масштаба  $a$  определяется по средней глубине разрушения:

$$a = \frac{\bar{h}}{k_b}, \quad (2.41)$$

где  $k_b$  – коэффициент, зависящий от  $V$ , определяется по табл. 2.1.

Параметр формы  $b$  определяется по коэффициенту вариации  $V$  по табл. 2.1.

Таблица 2.1

**Взаимосвязь параметров  $b$ ,  $k_b$  и  $V$  распределения Вейбулла [57]**

$b$	$k_b$	$V$	$b$	$k_b$	$V$
0,8	1,133	1,261	3,1	0,894	0,353
0,9	1,052	1,113	3,2	0,896	0,343
1	1	1	3,3	0,897	0,334
1,1	0,965	0,91	3,4	0,898	0,325
1,2	0,941	0,837	3,5	0,9	0,316
1,3	0,924	0,775	3,6	0,901	0,309
1,4	0,911	0,723	3,7	0,902	0,301
1,5	0,903	0,679	3,8	0,904	0,294
1,6	0,897	0,64	3,9	0,905	0,287
1,7	0,892	0,605	4	0,906	0,281
1,8	0,889	0,575	4	0,913	0,253
1,9	0,887	0,547	5	0,918	0,23
2	0,886	0,523	6	0,928	0,194
2,1	0,886	0,5	7	0,935	0,168
2,2	0,886	0,48	8	0,942	0,148
2,3	0,886	0,461	9	0,947	0,133
2,4	0,887	0,444	10	0,951	0,12
2,5	0,887	0,428	12	0,958	0,101
2,6	0,888	0,413	14	0,964	0,087
2,7	0,889	0,393	16	0,969	0,077
2,8	0,89	0,386	18	0,971	0,069
2,9	0,892	0,375	20	0,974	0,0625
3	0,893	0,363	25	0,978	0,051

*Определение максимальной глубины коррозии на обследуемой поверхности.* Максимальная глубина коррозии при возможности измерения на всех участках обследуемой поверхности определяется путем непосредственного измерения.

При выборочном измерении глубин коррозии на отдельных участках поверхности максимальную вероятную глубину коррозии на всей поверхности, подлежащей обследованию, определяют расчетом по формуле

$$h_{\max} = a \left[ -\ln \left( \frac{\ln \gamma}{M} \right) \right]^{1/b}, \quad (2.42)$$

где  $\gamma$  – требуемая достоверность оценки;  $M = S / S_0$  – показатель масштаба;  $S$  – площадь поверхности, подлежащей обследованию;  $S_0$  – площадь поверхности, приходящаяся на одно независимое измерение.

Величина  $S_0$  определяется по среднему числу  $n$  каверн (язв, перегибов профиля поверхности), приходящихся на единицу поверхности,  $S_0 = 1 / n$ .

Глубину коррозии  $h_\beta$  на доле поверхности  $\beta$  определяют по формуле

$$h_\beta = a (-\ln \beta)^{1/b}. \quad (2.43)$$

*Прогнозирование ресурса объекта.* Прогнозирование ресурса осуществляют по параметрам распределения глубин коррозии, приведенным к заданному моменту времени (экстраполицией по времени), предельно допустимой глубине проникновения коррозии  $h$  и допустимой доле поражения поверхности на предельную глубину.

Значение средней глубины коррозии  $h_t$  определяется по функции  $h(t)$ , а коэффициент вариации  $V_t$  – по формуле



$$V_t = \sqrt{V \left( \frac{\bar{h}}{h_t} \right)}, \quad (2.44)$$

где  $V$  – коэффициент вариации, соответствующий средней глубине коррозии; при  $V_t < 0,05$  принимается  $V_t = 0,05$ .

Расчет среднего ресурса (срока службы) при нелинейности функции  $h(t)$  осуществляют путем решения относительно  $t$  уравнения

$$h(t) = \frac{h_n \cdot k_E}{(-\ln \frac{S_0}{S})^{1/b}}, \quad (2.45)$$

в котором  $b$  и  $k$  определяют по табл. 2.2 в зависимости от  $V_h$ .

Таблица 2.2

Определение коэффициента  $V_h$  [57]

$S_1/S_0$	10	$10^2$	$10^3$	$10^4$
$V_h$	0,3	0,2	0,15	0,1

При линейности функции  $h(t)$  средний ресурс определяют по формуле

$$T_{cp} = \frac{h_n \cdot k_E}{C(-\ln \frac{S_0}{S})^{1/b}}, \quad (2.46)$$

где  $C$  – средняя скорость коррозии:

$$C = \frac{\bar{h}}{t_k}. \quad (2.47)$$

#### *2.4. Оценка остаточного ресурса по критерию коррозионной стойкости*

---

Расчет гарантированного ресурса (срока службы) осуществляют по формуле

$$T_{\gamma} = T_{\text{cp}} (1 - U_{\gamma} \cdot V_t), \quad (2.48)$$

где  $U_{\gamma}$  – квантиль нормального распределения.

Остаточные средний и гарантированный ресурс определяют вычитанием из вычисленного среднего или гарантированного ресурса наработки конструкции на момент контроля.

Данный подход не учитывает отказы по общим причинам.

## **2.5. Оценка остаточного ресурса металлических конструкций с использованием уравнений регрессии для определения скорости коррозии**

Для оценки остаточного ресурса металлоконструкций часто используют метод, который применяют для определения остаточного ресурса металлических трубопроводов, которые используются в атомной [11, 12] и нефтегазовой сфере.

Это определение остаточного ресурса по утонению стенки. Предполагается, что за время эксплуатации трубопроводов, они корродируют на некоторую толщину стенки трубы. Если очистить металлическую поверхность трубы от коррозии, то можно измерить фактическую толщину стенки. Если она оказывается больше минимально допустимой (устанавливается требованиями нормативной документации или по проекту), то получаем запас. Зная скорость коррозии, фактическую и минимальную, можно рассчитать остаточный срок эксплуатации данного трубопровода.

Остаточный ресурс будет определяться по формуле

$$T = \frac{S_f - S_0}{v}, \quad (2.49)$$

где  $S_f$  – фактическая толщина металла, мм (получена по результатам освидетельствования металлоконструкции);  $S_0$  – минимальная толщина металла, мм (определяется расчетом либо прописывается в проектной документации в момент проектирования здания или сооружения);  $v$  – скорость коррозии.

Разработано множество подходов для определения скорости коррозии [11, 12]. В строительстве из всех этих зависимо-

стей в основном применяется подход, основанный на определении средней скорости коррозии [13, 14]. С чем это связано, будет изложено далее.

Обычно применяются следующие зависимости.

1. Линейная:

$$v = a \cdot t + m, \quad (2.50)$$

где  $a$  – случайный параметр;  $m$  – детерминированный параметр.

При равномерной коррозии  $m = 0$ .

Эта зависимость хорошо описывает кинетику разрушения металлов при общей коррозии [11].

2. Степенная:

$$v = a \cdot t^m. \quad (2.51)$$

Зависимость применяется при описании многих видов коррозии поверхностей металлов (как сплошной, так и локальной), а также при коррозии под напряжением и изнашивании. Для многих случаев общей коррозии при умеренных напряжениях, а также при локальной коррозии  $m < 1$ . При высоких напряжениях (превышающих некоторое значение, называемое пороговым напряжением)  $m > 1$  [11].

При химической коррозии металлов, в частности при газовой,  $m$  часто имеет значения, близкие к  $1/2$ . Изменение максимальной глубины питтингов хорошо описывается при  $m = 1/3$  [11].

3. Логарифмическая:

$$v = a \cdot \ln(t + m). \quad (2.52)$$

Зависимость хорошо описывает кинетику газовой и локальной коррозии [11].

#### 4. Экспоненциальная:

$$v = a \cdot e^{T(t)}, \quad (2.53)$$

где  $T(t)$  – некоторая функция от времени.

Применяется при описании кинетики общей коррозии под напряжением [11].

На практике при оценке ресурса чаще всего применяется линейная модель, которая во многих случаях дает оценки остаточного ресурса с некоторым запасом [11].

Пояснений по поводу того, как находить данные параметры в нормах [11], не дается. По сути, данные формулы являются некими упрощенными аппроксимирующими функциями, которые находятся по результатам проведенного обследования (контроля). Получается, что назначение параметров происходит эмпирически. Поскольку мнения разных специалистов могут разойтись, то даже незначительное различие в параметрах  $a$  и  $m$  приведет к значительным различиям в результатах вычисления скорости коррозии.

## 2.6. Оценка остаточного ресурса с использованием уравнений регрессии

Для того чтобы выявить зависимость одной величины от другой, применяют регрессивный анализ.

Наиболее часто используются следующие уравнения регрессии.

1. Множественная линейная регрессия:

$$y = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot x_1 + \dots + \alpha_n \cdot x_n + \varepsilon. \quad (2.54)$$

Частным случаем является парная линейная регрессия:

$$y = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot x + \varepsilon. \quad (2.55)$$

2. Полиномиальная регрессия:

$$y = \alpha_0 + \alpha_{n,i} \cdot x_i^n + \dots + \alpha_{1,i} \cdot x_i + \varepsilon. \quad (2.56)$$

Частным случаем является регрессия  $n$ -й степени для одной переменной:

$$y = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot x + \dots + \alpha_n \cdot x^n + \varepsilon. \quad (2.57)$$

3. Степенная регрессия:

$$y = \alpha_0 \cdot x_1^{\alpha_1} \cdot \dots \cdot x_n^{\alpha_n} + \varepsilon. \quad (2.58)$$

4. Показательная регрессия:

$$y = \alpha_0 \cdot \alpha_1^{x_1} \cdot \dots \cdot \alpha_n^{x_n} + \varepsilon. \quad (2.59)$$

5. Экспоненциальная регрессия:

$$y = e^{(\alpha_0 + \alpha_1 \cdot x_1 + \dots + \alpha_n \cdot x_n)} + \varepsilon. \quad (2.60)$$

6. Логарифмическая регрессия:

$$y = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot \ln x_1 + \dots + \alpha_n \cdot \ln x_n + \varepsilon; \quad (2.61)$$

$$y = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot \lg x_1 + \dots + \alpha_n \cdot \lg x_n + \varepsilon. \quad (2.62)$$

7. Полулогарифмическая регрессия:

$$y = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot \log x_1 + \dots + \alpha_n \cdot \log x_n + \varepsilon. \quad (2.63)$$

8. Гиперболическая регрессия:

$$y = \alpha_0 + \frac{\alpha_1}{x_1} + \dots + \frac{\alpha_n}{x_n} + \varepsilon; \quad (2.64)$$

$$y = \frac{1}{\alpha_0 + \alpha_1 \cdot x_1 + \dots + \alpha_n \cdot x_n} + \varepsilon. \quad (2.65)$$

9. Логистическая регрессия:

$$y = \frac{1}{1 + e^{(\alpha_0 + \alpha_1 \cdot x_1 + \dots + \alpha_n \cdot x_n)}} + \varepsilon, \quad (2.66)$$

где  $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_n$  – параметры уравнения регрессии;  $x_0, x_1, \dots, x_n$  – независимые переменные;  $\varepsilon$  – невязка (ошибка) аппроксимации;  $y$  – зависимая переменная, которая находится по уравнению регрессии.

Представленные уравнения являются многофакторными. На практике же часто для упрощения решаемой задачи применяют однофакторные уравнения регрессии.

В работе [58] была исследована прочность различных пород древесины в условиях повышенной влажности с течением времени, с применением однофакторных уравнений регрессии. В качестве независимой переменной аппроксимации было выбрано время эксплуатации древесины в условиях повышенной влажности. Невязкой в уравнениях пренебрегали, поскольку

ку истинное значение прочности неизвестно, только некое среднее по результатам испытаний.

В результате экспериментальных исследований (рис. 2.1– 2.3) были получены уравнения регрессии прочности древесины при длительном нахождении в условиях повышенной влажности при сжатии вдоль (табл. 2.3) и поперек волокон (табл. 2.4), а также при изгибе (табл. 2.5). Приведены только те уравнения, которые имеют коэффициент детерминации выше 0,85, либо уравнения регрессии с самым высоким коэффициентом детерминации.

Таблица 2.3

**Уравнения регрессии прочности древесины при сжатии  
вдоль волокон от длительности нахождения в условиях  
повышенной влажности**

№ п/п	Тип древесины	Уравнение регрессии	Коэффициент детерминации $R^2$
1	Береза	$y = 86,465 - 2,319x$	0,9893
		$y = 84,624 - 4,9792\ln(x)$	0,9890
		$y = 87,802 - 3,6565x + 0,2675x^2$	0,9999
		$y = 84,659x^{-0,0614}$	0,9864
		$y = 86,621e^{-0,0287x}$	0,9916
2	Красное дерево	$y = 77,365 - 1,639x$	0,9681
		$y = 75,911 - 3,3266\ln(x)$	0,8648
		$y = 75,703 + 0,0235x - 0,3325x^2$	0,9999
		$y = 75,94x^{-0,0455}$	0,8586
		$y = 77,47e^{-0,0225x}$	0,9647
3	Сосна	$y = 52,288 + 14,619x - 2,6925x^2$	0,9122



Окончание табл. 2.3

№ п/п	Тип древесины	Уравнение регрессии	Коэффициент детерминации $R^2$
4	Ель	$y = 52,927 + 18,195x - 3,5075x^2$	0,9373
5	Ясень	$y = 97,563 + 2,8785x - 1,3675x^2$	0,7883
6	Дуб	$y = 66,348 + 6,6605x - 1,5175x^2$	0,9880
7	Вяз	$y = 63,16 + 2,121x - 0,635x^2$	0,8555
8	Клен	$y = 100,3 - 3,859x$	0,8205
		$y = 90,213 + 6,2285x - 2,0175x^2$	0,9999
9	Липа	$y = 80,9 - 3,287x$	0,9378
		$y = 76,312 + 1,3005x - 0,9175x^2$	0,9962
		$y = 81,382e^{-0,0458x}$	0,9282

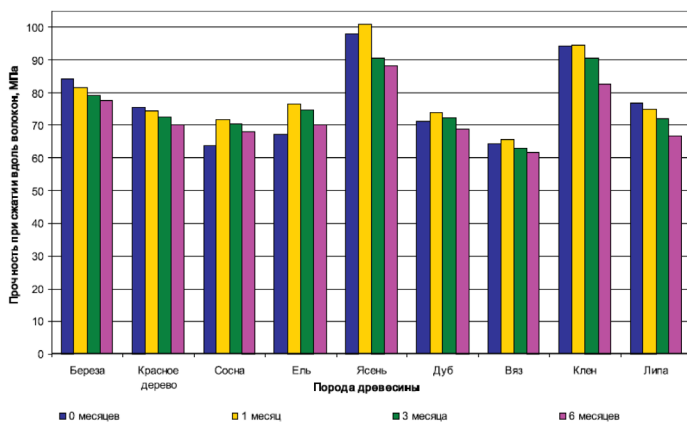


Рис. 2.1. Изменение прочности при сжатии вдоль волокон образцов древесины различных пород при выдерживании в условиях повышенной влажности

Таблица 2.4

**Уравнения регрессии прочности древесины при сжатии  
поперек волокон от длительности нахождения в условиях  
повышенной влажности**

№ п/п	Тип древесины	Уравнение регрессии	Коэффициент детерминации $R^2$
1	Береза	$y = 19,55 - 0,78x$	0,9990
		$y = 18,90 - 1,63\ln(x)$	0,9500
		$y = 19,425 - 0,655x - 0,025x^2$	0,9998
		$y = 18,921x^{-0,0927}$	0,9408
		$y = 19,643e^{-0,0444x}$	0,9974
2	Красное дерево	$y = 19,565 - 0,562x$	0,8796
		$y = 18,565 + 0,438x - 0,2x^2$	0,9687
		$y = 19,62e^{-0,0312x}$	0,8788
3	Сосна	$y = 9,0325 + 2,2665x - 0,4475x^2$	0,7963
4	Ель	$y = 9,375 + 2,45x - 0,5x^2$	0,9000
5	Ясень	$y = 25,063 + 0,0505x - 0,2575x^2$	0,7580
6	Дуб	$y = 16,275 + 1,274x - 0,27x^2$	0,9501
7	Вяз	$y = 17,663 + 1,1455x - 0,2925x^2$	0,9943
8	Клен	$y = 25,165 - 1,004x$	0,8608
		$y = 22,94 + 1,221x - 0,445x^2$	0,9961
		$y = 25,324e^{-0,0451x}$	0,8507
9	Липа	$y = 19,33 - 1,065x$	0,9140

Окончание табл. 2.4

№ п/п	Тип древесины	Уравнение регрессии	Коэффициент детерминации $R^2$
9	Липа	$y = 17,668 + 0,5975x - 0,3325x^2$	0,9853
		$y = 19,564e^{-0,0653x}$	0,8984

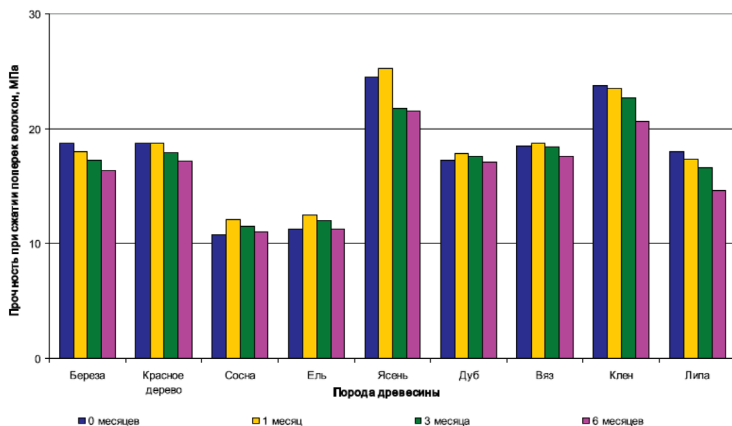


Рис. 2.2. Изменение прочности при сжатии поперек волокон образцов древесины различных пород при выдерживании в условиях повышенной влажности

Таблица 2.5

Уравнения регрессии прочности древесины при изгибе от длительности нахождения в условиях повышенной влажности

№ п/п	Тип древесины	Уравнение регрессии	Коэффициент детерминации $R^2$
1	Береза	$y = 754,46 - 37,626x$	0,9424
		$y = 726,46 - 83,154\ln(x)$	0,9981

2.6. Оценка остаточного ресурса с использованием уравнений регрессии

Продолжение табл. 2.5

№ п/п	Тип древесины	Уравнение регрессии	Коэффициент детерминации $R^2$
1	Береза	$y = 805,18 - 88,351x + 10,145x^2$	0,9972
		$y = 727,24x^{-0,124}$	0,9996
		$y = 758,77e^{-0,0564x}$	0,9531
2	Красное дерево	$y = 577,65 - 22,032x$	0,9987
		$y = 559,65 - 46,668\ln(x)$	0,9716
		$y = 581,85 - 26,232x + 0,84x^2$	0,9998
		$y = 560,22x^{-0,089}$	0,9654
		$y = 580,01e^{-0,0422x}$	0,9996
3	Сосна	$y = 593,45 - 26,61x$	0,9595
		$y = 570,77 - 55,191\ln(x)$	0,8950
		$y = 577,58 - 10,735x - 3,175x^2$	0,9704
		$y = 571,79x^{-0,105}$	0,8792
		$y = 587,4e^{-0,00509x}$	0,9528
4	Ель	$y = 319,68 + 42,984x - 10,44x^2$	0,9664
5	Ясень	$y = 831,78 - 26,856x$	0,9748
		$y = 808,27 - 54,918\ln(x)$	0,8839
		$y = 808,83 - 3,906x - 4,59x^2$	0,9976
		$y = 809,02x^{-0,072}$	0,8736
		$y = 834,58e^{-0,0353x}$	0,9696
6	Дуб	$y = 614,81 + 15,007x - 3,7125x^2$	0,7225

Окончание табл. 2.5

№ п/п	Тип древесины	Уравнение регрессии	Коэффициент детерминации $R^2$
7	Вяз	$y = 559,57 + 62,595x - 15,525x^2$	1,0000
8	Клен	$y = 875,93 - 60,885x$	0,8988
		$y = 761,74 + 53,302x - 22,838x^2$	1,0000
		$y = 894,39e^{-0,0868x}$	0,8824
9	Липа	$y = 608,63 - 39,915x$	0,8417
		$y = 515,81 + 52,897x - 18,563x^2$	0,9873

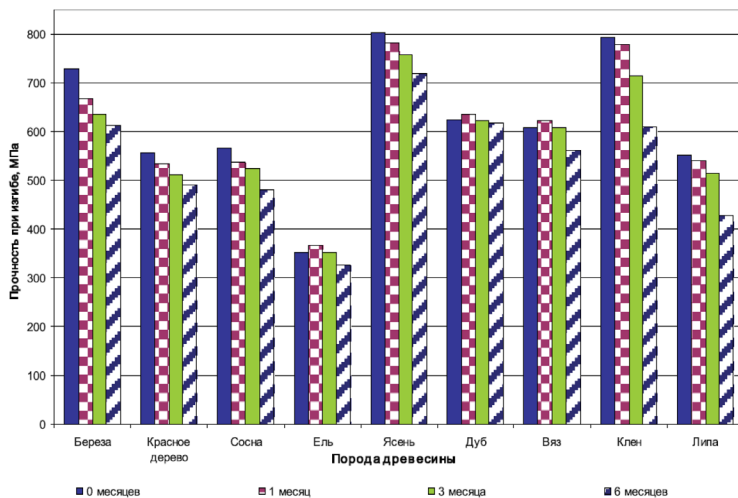


Рис. 2.3. Изменение прочности при изгибе образцов древесины различных пород при выдерживании в условиях повышенной влажности

В отличие от других подходов к оценке долговечности деревянных конструкций данный способ интересен тем, что исполь-

зует регрессионный анализ, который можно применить к любым конструкциям и условиям эксплуатации.

Поскольку, как показали исследования, оценить длительную прочность древесины можно с помощью уравнений однофакторной регрессии (применяется только один фактор – время эксплуатации), то эти же уравнения можно использовать и для оценки остаточного ресурса деревянных конструкций. При этом вводится предположение, что условия эксплуатации остаются неизменными в течение всего срока службы конструкций.

Данную идею можно воплотить в двух вариантах.

*Первый вариант* заключается в том, что, зная минимальную (проектную) прочность деревянной конструкции и известное уравнение регрессии, где определены параметры уравнения регрессии, можно определить предельный срок эксплуатации данной конструкции. Вычитая из него фактический срок, который уже отслужила конструкция, получаем остаточный ресурс.

Предельные сроки службы будут равны:

- для линейной регрессии:

$$t = \frac{R_{\min} - \alpha_0}{\alpha_1}; \quad (2.67)$$

- для полиномиальной регрессии: поскольку представлены уравнения второго порядка (параболическая регрессия), то ответ будет в виде решения квадратного уравнения:

$$\alpha_2 \cdot t^2 + \alpha_1 \cdot t + (\alpha_0 - R_{\min}) = 0; \quad (2.68)$$

$$t = \frac{-\alpha_1 \pm \sqrt{\alpha_1^2 - 4 \cdot \alpha_2 (\alpha_0 - R_{\min})}}{2 \cdot \alpha_2}, \quad (2.69)$$

ограничение на полученное решение будет заключаться в том, что время не должно быть отрицательным;

- для степенной регрессии:

$$t = \alpha_1 \sqrt{\frac{R_{\min}}{\alpha_0}}; \quad (2.70)$$

если  $\alpha_1$  является отрицательным числом, то необходимо единицу разделить на полученное значение  $t$  в уравнении (2.70); ограничение на полученное решение будет заключаться в том, что время не должно быть отрицательным;

- для показательной регрессии:

$$t = \log_{\alpha_1} \frac{R_{\min}}{\alpha_0}; \quad (2.71)$$

• для экспоненциальной регрессии напишем два возможных варианта:

$$t = \frac{1}{\alpha_1} \cdot \ln \frac{R_{\min}}{\alpha_0}; \quad (2.72)$$

$$t = \frac{1}{\alpha_1} (\ln R_{\min} - \alpha_0); \quad (2.73)$$

- для логарифмической регрессии:

$$t = \exp \left[ \frac{R_{\min} - \alpha_0}{\alpha_1} \right]; \quad (2.74)$$

$$t = 10^{\frac{(R_{\min} - \alpha_0)}{\alpha_1}}; \quad (2.75)$$

- для полулогарифмической регрессии:

$$t = \gamma^{\frac{(R_{\min} - \alpha_0)}{\alpha_1}}; \quad (2.76)$$

ограничения будут следующими:  $\gamma > 0$  и  $\gamma \neq 1$ ;

- для гиперболической регрессии:

$$t = \frac{\alpha_1}{R_{\min} - \alpha_0}; \quad (2.77)$$

$$t = \frac{\frac{1}{R_{\min}} - \alpha_0}{\alpha_1}; \quad (2.78)$$

- для логистической регрессии:

$$t = \frac{\ln\left(\frac{1}{R_{\min}} - 1\right) - \alpha_0}{\alpha_1}, \quad (2.79)$$

где  $\alpha_0$  – начальное значение параметра;  $\alpha_1$  – скорость изменения параметра;  $\alpha_2$  – ускорение изменения параметра;  $R_{\min}$  – минимальное значение параметра.

Поскольку для ряда пород можно применять сразу несколько уравнений регрессии, то за окончательную величину предельного срока эксплуатации в данном случае необходимо принимать среднее арифметическое. Также можно брать среднее значение при назначении окончательной величины, если расхождения относительно среднего не превышает 10 %:

$$t_{\text{сред}} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n t_i. \quad (2.80)$$

Если напряженно-деформированное состояние является сложным, то необходимо оценить предельный срок эксплуатации по нескольким состояниям сразу. За окончательное значение следует принимать наименьшее из полученных значений.



Также наименьшее значение выбирается, если разброс значений составляет от 10 до 20 %:

$$T_{\text{ок. пред}} = \min \begin{cases} T_{\text{пред}1} \\ \dots \\ T_{\text{пред}i} \end{cases} \quad (2.81)$$

Остаточный ресурс деревянных конструкций будет равен

$$T_{\text{ост}} = t - t_{\text{эксп}}. \quad (2.82)$$

При этом следует отметить, что выведенные уравнения для оценки предельного срока службы деревянных конструкций можно применять для любых условий эксплуатации, потому что в данных уравнениях регрессии используются абстрактные параметры  $a$  и  $b$ .

Данные уравнения можно применять и при совместном действии нескольких факторов одновременно. Тогда остаточный ресурс будет вычисляться по формуле

$$T_{\text{ост}} = A \left[ -\frac{1}{B} t_{\text{эксп}} + T_{\text{пред}} \right]. \quad (2.83)$$

Физический смысл коэффициента  $A$  заключается в том, что он снижает изначальный (заданный) остаточный ресурс строительных конструкций вследствие несовершенства технологии изготовления, устройства, монтажа, ошибок при проектировании и т. д. Физический смысл коэффициента  $B$  заключается в том, что он снижает остаточный ресурс строительных конструкций в процессе их эксплуатации. Поэтому коэффициенты  $A$  и  $B$  можно считать коэффициентами запаса (понижающими коэффициентами). В общем случае они будут принимать значения от 0 до 1.

Недостатком такого подхода является то, что необходимо заранее знать вид уравнения регрессии. Не для каждого фактора эксплуатации и породы древесины есть данные уравнения.

*Второй вариант* заключается в том, что, зная запас несущей способности деревянных конструкций, можно непосредственно оценить их остаточный ресурс. Тогда остаточный ресурс будет равен:

- для линейной регрессии:

$$\Delta t = \frac{\Delta R - \alpha_0}{\alpha_1}; \quad (2.84)$$

- для полиномиальной регрессии: поскольку представлены уравнения второго порядка (параболическая регрессия), то ответ будет в виде решения квадратного уравнения:

$$\alpha_2 \cdot \Delta t^2 + \alpha_1 \cdot \Delta t + (\alpha_0 - \Delta R) = 0; \quad (2.85)$$

$$\Delta t = \frac{-\alpha_1 \pm \sqrt{\alpha_1^2 - 4\alpha_2(\alpha_0 - \Delta R)}}{2\alpha_2}. \quad (2.86)$$

ограничение на полученное решение будет заключаться в том, что время не должно быть отрицательным;

- для степенной регрессии:

$$\Delta t = \alpha_1 \sqrt{\frac{\Delta R}{\alpha_0}}, \quad (2.87)$$

если  $\alpha_1$  является отрицательным числом, то необходимо единицу разделить на полученное значение  $t$  в уравнении (2.87); ограничение на полученное решение будет заключаться в том, что время не должно быть отрицательным;

- для показательной регрессии:

$$\Delta t = \log_{\alpha_1} \frac{\Delta R}{\alpha_0}; \quad (2.88)$$

- для экспоненциальной регрессии напишем два возможных варианта:

$$\Delta t = \frac{1}{\alpha_1} \cdot \ln \frac{\Delta R}{\alpha_0}; \quad (2.89)$$

$$\Delta t = \frac{1}{\alpha_1} (\ln \Delta R - \alpha_0); \quad (2.90)$$

- для логарифмической регрессии:

$$\Delta t = \exp \left[ \frac{\Delta R - \alpha_0}{\alpha_1} \right]; \quad (2.91)$$

$$\Delta t = 10^{\frac{(\Delta R - \alpha_0)}{\alpha_1}}; \quad (2.92)$$

- для полулогарифмической регрессии:

$$\Delta t = \gamma^{\frac{(\Delta R - \alpha_0)}{\alpha_1}}; \quad (2.93)$$

ограничения будут следующими:  $\gamma > 0$  и  $\gamma \neq 1$ ;

- для гиперболической регрессии:

$$\Delta t = \frac{\alpha_1}{\Delta R - \alpha_0}; \quad (2.94)$$

$$\Delta t = \frac{\frac{1}{\Delta R} - \alpha_0}{\alpha_1}; \quad (2.95)$$

- для логистической регрессии:

$$\Delta t = \frac{\ln\left(\frac{1}{\Delta R} - 1\right) - \alpha_0}{\alpha_1}, \quad (2.96)$$

где  $\Delta R$  – разность между минимальным и действующим значением параметра на момент контроля технического состояния;  $\Delta t$  – остаточный ресурс.

Поскольку для ряда пород можно применять сразу несколько уравнений регрессии, то за окончательную величину остаточного ресурса необходимо принимать среднее арифметическое. Также можно брать среднее значение при назначении окончательной величины, если расхождения относительно среднего не превышает 10 %:

$$\Delta t_{\text{сред}} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta t_i. \quad (2.97)$$

Если напряженно-деформированное состояние является сложным, то необходимо оценить остаточный ресурс по нескольким состояниям сразу. За окончательное значение следует принимать наименьшее из полученных значений. Также наименьшее значение выбирается, если разброс значений составляет от 10 до 20 %:

$$\Delta t_{\text{окон}} = \min \begin{cases} \Delta t_1 \\ \dots \\ \Delta t_i \end{cases} \quad (2.98)$$

Здесь важно сделать одно уточнение: расчет остаточного ресурса проводится только после того как было установлено,

что несущая способность обеспечена. Недостатком такого подхода также является то, что необходимо заранее знать вид уравнения регрессии.

Несмотря на то что данный метод рассматривался автором применительно к деревянным конструкциям, его можно применить к любым другим строительным конструкциям и условиям эксплуатации.

Отметим достоинства и недостатки данного метода прогнозирования остаточного ресурса строительных конструкций, предложенного автором.

Достоинства:

- универсальность. Данные уравнения можно применять к любым конструкциям и условиям эксплуатации;

- можно применять любые параметры. Поскольку данные уравнения изначально состоят из безразмерных и абстрактных величин, которые не имеют первоначально физического смысла, исследователь может по собственному усмотрению выбирать те параметры, которые ему необходимы;

- можно раскрыть данные уравнения. Несмотря на то, что они не нуждаются в каких-либо уточнениях и/или модификациях, их можно расширить, представив, что каждая переменная является некой функцией;

- не требует физического обоснования или физической интерпретации. Используя данные уравнения, можно отбросить физическую интерпретацию протекающих процессов. Это позволяет существенно упростить процесс, поскольку исследователь может сосредоточиться на поиске зависимости изменения интересующего его параметра во времени. Плюсом такого подхода можно считать то, что исследователь ничем не ограничен в своих поисках и тем самым может выйти, так сказать, за рамки классических представлений;

- простота расчета. Регрессионный анализ давно компьютеризирован, т. е. данные уравнения решаются в автоматическом режиме в программах практически мгновенно. Причем данными программами пользуются даже обычные пользователи, что говорит о широких возможностях его применения.

Недостатки:

- практическая реализация. Несмотря на простоту самого метода его практическая реализация является оптимальной для случаев, когда в качестве входных параметров используют не более трех величин. Причина этого кроется в том, что для получения достаточного количества данных требуется много испытаний, причем не только во времени (хотя даже временной промежуток, который выбран для эксперимента, может быть значительным) при неизменных параметрах, но и при огромном числе различных комбинаций этих параметров. Причем количество комбинаций возрастает очень быстро при росте числа используемых параметров;

- проблема физического обоснования или физической интерпретации. Ранее отмечалось, что достоинством данного метода является необязательность физического обоснования, однако это утверждение можно считать справедливым только в том случае, когда исследователь, так сказать, исследует следствие, а не причину. Поясним, что это значит. Находясь в определенных условиях внешней среды, строительная конструкция испытывает влияние ряда факторов (входных параметров). Эти факторы оказывают влияние на напряженно-деформированное состояние, структуру конструкции, ее характеристики. Таким образом, изменение выходного параметра, который исследует автор, является следствием, а причиной является воздействие данных факторов (входных параметров). В практических целях достаточно знать саму зависимость, не вдаваясь в причины ее возникновения, но в научных

целях необходимо, помимо выявленной зависимости, дать еще и объяснения тому, почему так происходит. Применение данного метода может вызвать проблему с обоснованием, потому что получаемые коэффициенты в физическом плане могут отличаться от принятых в настоящее время представлений.

## 2.7. Метод оценки остаточного ресурса по коэффициенту запаса

Остаточный ресурс определяется по формуле

$$T = \min[(t_u - t)_n \cdot \beta_n], \quad (2.99)$$

где  $t_u$  – время, когда коэффициент запаса достигает предельного значения, равного единице, определяемое по формуле

$$t_u = t \cdot \sqrt{\frac{k_0 - 1}{k_0 - k}}, \quad (2.100)$$

где  $t$  – рассматриваемое время эксплуатации;  $k = k(t)$  – коэффициент запаса в момент времени  $t$  (рис. 2.4) [21];  $k_0 = k_0(t)$  – коэффициент запаса в момент времени  $t_0$  (см. рис. 2.4) [21];  $\beta_n$  – поправочный коэффициент, учитывающий влияние некоторых неучтенных в расчетах факторов. Например, таких как превышение нормативного срока эксплуатации конструкции.

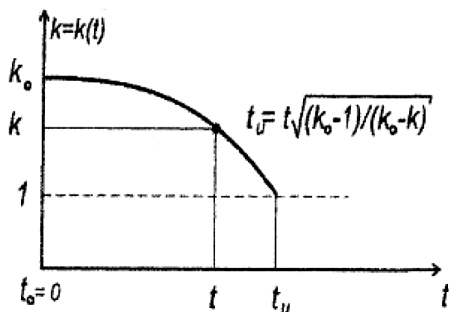


Рис. 2.4. Описание закона изменения коэффициентов запаса во времени



Данный метод может применять, только если проведено детальное (инструментальное) обследование строительных конструкций.

*Достоинством* данного метода является то, что получаемая величина остаточного ресурса является объективной и достоверной при условии, что проведено необходимое количество обследований, которые позволяют достаточно точно определить вид закона изменения коэффициента запаса со временем [3].

Основным *недостатком* данного метода можно считать то, что назначение величины поправочного коэффициента носит больше субъективный, чем объективный характер, поэтому разброс в величине остаточного ресурса может быть достаточно большим. Получается, что несмотря на то что формально метод учитывает отказы по общей причине, он не позволяет говорить о точности полученной величины остаточного ресурса. Это требует проверки полученного значения с применением других методов и методик расчета остаточного ресурса [3].

## 2.8. Интервальный метод оценки остаточного ресурса

Суть метода состоит в том, что оцениваемый параметр строительной конструкции ограничивается на полученном в ходе измерений интервале максимальным и минимальным значениями из полученного ряда значений. Прогнозирование ведется с использованием только полученных границ интервала. При этом все возможные изменения контролируемого параметра или параметров с большой долей вероятности попадут внутрь полученных границ прогнозирования.

Измерение отдельных параметров любых объектов и процессов связано с разбросом измеряемых величин. На разброс оказывают влияние:

- статистическая изменчивость самого измеряемого параметра;
- ошибки и погрешности используемых приборов;
- грубые ошибки оператора, фиксирующего результаты измерений;
- ошибки измерений, заложенные непосредственно в методику измерений.

В итоге каждое значение, измеренное с использованием любого прибора, получает значение

$$x = x_i + \Delta x_i, \quad (2.101)$$

где  $x_i$  – истинное значение измеряемой величины контролируемого параметра;  $\Delta x_i$  – суммарная ошибка измерения.

В результате величина любого единичного измерения может быть оценена интервалом погрешностей

$$x_i - \Delta x_i \div x_i + \Delta x_i. \quad (2.102)$$

После проведения единичных измерений контролируемого параметра в соответствии с классическими положениями математической статистики получается набор из  $n$  единичных измерений, который после ранжирования можно представить в следующем виде:  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_n$ .

В результате статистической обработки полученного ряда значений контролируемого параметра часть значений может быть отброшена, так как является грубой ошибкой эксперимента или выбросом. Допустим, что таким выбросом является число  $x_i$ .

Из оставшихся чисел в ходе последующей статистической обработки будут получены следующие параметры, характеризующие оставшуюся выборку:

- $\bar{x}$  – среднее арифметическое значение показателя;
- $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение показателя;
- $x_\gamma$  – гамма-процентное значение верхней или нижней границы статистического интервала.

В этом случае истинное значение контролируемого параметра будет находиться в интервале

$$x_\gamma^{\min} = \bar{x} - m \cdot \sigma < x_i < x_\gamma^{\max} = \bar{x} + m \cdot \sigma, \quad (2.103)$$

где  $x_\gamma^{\min}$  – минимальное значение или нижняя граница оцененного интервала значений контролируемого параметра;  $x_\gamma^{\max}$  – максимальное значение или верхняя граница оцененного интервала значений контролируемого параметра;  $m$  – целое число в ряду 1, 2, 3, 4, ..., зависящее от выбранной точности и достоверности интервала значений (доверительной вероятности –  $\gamma$ ).

Как правило, при оценке параметров строительных конструкций значение  $m$  чаще всего равно 3, что соответствует доверительной вероятности 0,9973.

В итоге принято считать, что истинное значение контролируемого параметра  $x_i$  находится в интервале значений  $x_\gamma^{\min} \div x_\gamma^{\max}$ .

В дальнейшем в расчетах и анализе используют одно из значений: среднее значение  $\bar{x}$  или значение одной из доверительных границ интервала. При этом реальное значение с учетом всех ошибок и погрешностей находится именно в интервале значений.

Любая строительная конструкция, как минимум, должна дожить до срока проведения капитального ремонта, т. е. срок его проведения  $T_{кр}$  может быть принят за минимальную границу срока службы конструкции. В предположении, что распределение сроков службы строительных конструкций подчиняется нормальному закону распределения, и с учетом того, что нам известны усредненные значения сроков службы строительных конструкций  $T_{ср}$ , будем иметь (рис. 2.5):

- половина интервала нормального распределения сроков службы строительных конструкций:  $T_{ср} - T_{кр}$ ;
- минимальная продолжительность службы строительной конструкции (нижний доверительный интервал):  $T_{min} = T_{кр}$ ;
- максимальная продолжительность срока службы строительной конструкции (верхний доверительный интервал)

$$T_{max} = T_{ср} + (T_{ср} - T_{кр}). \quad (2.104)$$

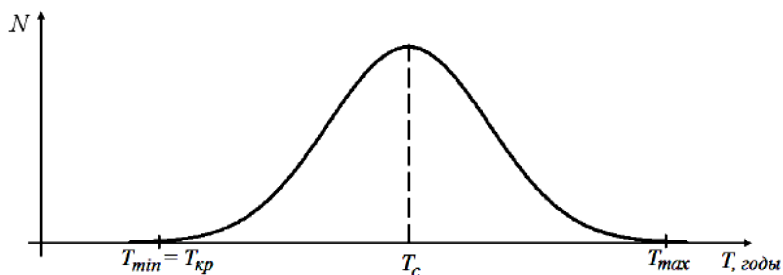


Рис. 2.5. Схема нормального распределения сроков службы строительных конструкций

Использование интервального метода прогнозирования остаточных сроков службы позволяет одновременно учесть возможные разбросы значений отдельных контролируемых показателей строительных конструкций и накрыть интервалы наиболее вероятных исходов прогнозирования.

Значительный разброс значений сроков службы строительных конструкций заложен в нормативных сведениях о сроках службы строительных конструкций до капитального ремонта и усредненных сроках службы. Значительный разброс учитывает неоднородность работы однотипных конструкций как по действующим нагрузкам, так и по условиям эксплуатации конструкций.

Применение метода интервальной оценки и интервального прогнозирования не исключает возможных отклонений за пределы прогноза, однако позволяет свести их к минимуму.

К недостаткам метода интервального прогнозирования можно отнести слишком широкий итоговый интервал сроков службы.

## Глава 3. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА

### 3.1. Оценка остаточного ресурса по прочности строительных конструкций

Остаточный ресурс по критерию предельного состояния – допускаемому напряжению – составляет [13, 14]

$$T_{\kappa}(T_{\sigma}) = \frac{\sigma_{\text{в}}(t) - [\sigma]}{\alpha_{\sigma}}, \quad (3.1)$$

где  $\sigma_{\text{в}}(t)$  – предел прочности на момент проведения обследования;  $[\sigma]$  – предел прочности по расчету;  $\alpha_{\sigma}$  – скорость снижения механических свойств.

Скорость снижения механических свойств [13, 14]

$$\alpha_{\sigma} = \frac{\sigma_{\text{в}} - \sigma_{\text{в}}(t)}{t}, \quad (3.2)$$

где  $\sigma_{\text{в}}$  – нормативный предел прочности;  $t$  – время от начала эксплуатации до момента проведения обследования.

Данный метод можно применять, только если проведено детальное (инструментальное) обследование строительных конструкций. Причем точность данного метода сильно зависит от того, каким способом определена прочность материала. Наибольшая точность будет достигаться при определении прочности испытанием на прессе.

### 3.2. Оценка остаточного ресурса железобетонных конструкций при температурно-влажностном воздействии

Еще одним из способов определения времени эксплуатации ЖБК является методика расчета остаточного ресурса ЖБК, эксплуатируемых в условиях температурных и влажностных воздействий.

Производится расчет срока службы ЖБК по следующим зависимостям.

Срок службы до момента достижения структурных параметров бетона предельного состояния

$$t_1 = \frac{2(K_{cr} - K_N)}{|K_w - K_s|} \cdot \Psi. \quad (3.3)$$

Долговечность с учетом длительности воздействия нагрузки определяется формулой

$$\lg t_2 = \frac{K_{cr} \cdot \lg 28 \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot E_b \cdot C_{(\infty, 28)} \cdot (1 - e^{-\gamma(t-28)})}}{K_c}, \quad (3.4)$$

где  $K_{cr}$  – критический коэффициент интенсивности напряжений (КИН):

$$K_{cr} = -0,015 + 0,001R_a - 0,133 \frac{\Pi}{B} + 0,006R_c - 0,08W - 0,583K_{ag}, \quad (3.5)$$

где  $R_a$  – прочность заполнителя;  $\Pi/B$  – цементно-водное отношение;  $R_c$  – активность цемента;  $W$  – влажность бетона;  $K_{ag}$  – количество



крупного заполнителя в единице объема массы;  $K_w$  и  $K_s$  – суммарные КИН для каждого вида дефектов при температурном и влажностном воздействии в холодное и теплое время года:

$$K_w = \sum N \cdot K_{i,w}; \quad (3.6)$$

$$K_s = \sum N \cdot K_{i,s}, \quad (3.7)$$

где  $N$  – количество дефектов одного вида;  $K_{i,w}$  и  $K_{i,s}$  – КИН для каждого вида дефектов (рис. 3.1), определяемые по табл. 4.2 [18];

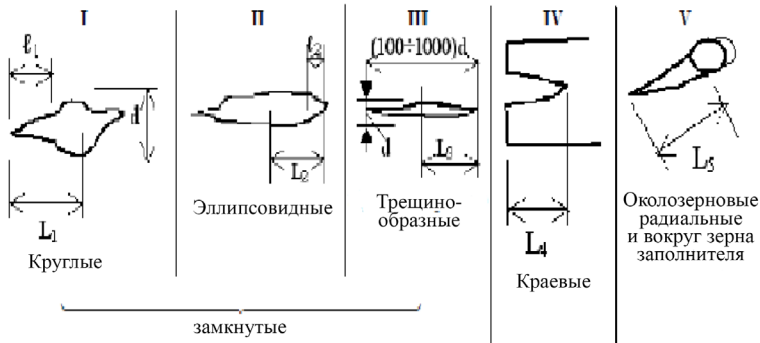


Рис. 3.1. Виды дефектов

$K_C$  – показатель трещиностойкости:

$$K_C = K_N + \frac{K_w + K_s}{2}, \quad (3.8)$$

где  $K_N$  – КИН от силовой нагрузки [18];  $E_b$  – модуль упругости бетона;  $\psi$  – концентрационный критерий меры повреждения;

$$C_{(\infty,28)} = 0,8 \left( \frac{56}{K_C \cdot \pi^2} - 0,63 \right) \cdot 10^4. \quad (3.9)$$

Окончательно величина срока службы ЖБК принимается минимальной из полученных значений:

$$t = \min \begin{cases} t_1 \\ t_2 \end{cases}. \quad (3.10)$$

Отсюда остаточный ресурс ЖБК будет равен

$$T_{\text{ост}} = T - t_{\text{фак}}. \quad (3.11)$$

где  $t_{\text{фак}}$  – фактический срок эксплуатации.

*Достоинства данного метода:*

- получаемая величина остаточного ресурса является объективной и достоверной, поскольку используются объективные величины, которые получают в процессе обследования [3];

- учитывает отказы по общим причинам (спонтанные отказы). Это возможно благодаря тому, что при проведении обследования проводится глубокий анализ структуры бетона [3].

*Недостатки данного метода:*

- применим только к конструкциям, работающим в агрессивных и влажных условиях эксплуатации. Для конструкций, которые работают в нормальных условиях эксплуатации, это метод применять нельзя [3];

- можно применять, только если проведено детальное (инструментальное) обследование строительных конструкций [3];

- точность сильно зависит от того, каким способом определяются характеристики материала. Наибольшая точность будет достигаться при применении разрушающих методов контроля [3];

- дороговизна.

Также хочется отметить, что данная методика расчета остаточного ресурса ЖБК применяется исключительно для особо важных и опасных объектов атомной промышленности. Распространения

в обследовании обычных гражданских и промышленных зданий методика не получила. Причина в дороговизне, поскольку она требует привлечения организаций с широкой лабораторной базой и высококлассными специалистами в штате. Немногие эксплуатирующие организации готовы тратить большие деньги для того, чтобы оценить остаточный ресурс. Поэтому в ближайшее время данная методика оценки остаточного ресурса ЖБК не будет применяться в гражданской сфере [3].

### 3.3. Оценка остаточного ресурса железобетонных конструкций по длительной прочности бетона

Метод расчета остаточного ресурса по длительной прочности бетона основан на предположении, что прочность бетона со временем уменьшается, т. е. предполагается, что набора прочности (теоретический случай) нет. Тогда предельного состояния железобетонные конструкции (ЖБК) достигнут в момент, когда длительная прочность сравняется с проектной. Наглядно это можно продемонстрировать на графике (рис. 3.2).

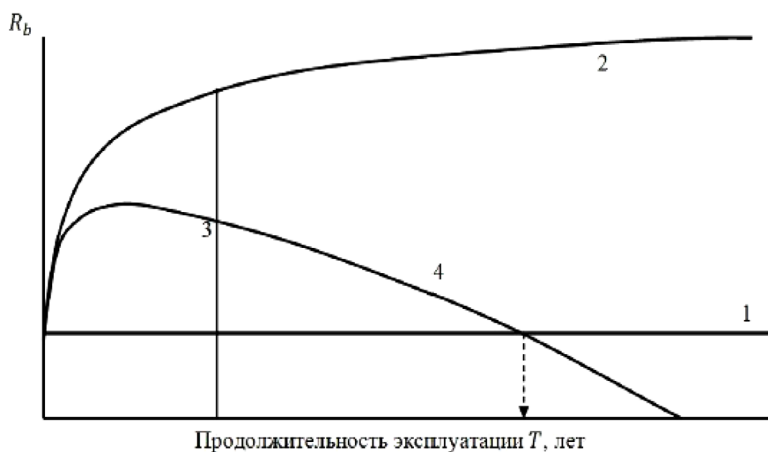


Рис. 3.2. Определение продолжительности эксплуатации ЖБК по длительной прочности бетона: 1 – проектная прочность бетона конструкции; 2 – теоретическая кривая набора прочности бетона в условиях нормальной влажности; 3 – прочность бетона, соответствующая моменту проведения обследования; 4 – прогнозируемое изменение прочности бетона в реальных условиях

Длительная прочность в течение срока эксплуатации вычисляется по формуле

$$R_{(t)} = R_{b, \text{проект}} (1 + \alpha \cdot \lg t) - k_R (t - t_0), \quad (3.12)$$

где  $R_{b, \text{проект}}$  – проектная прочность бетона;  $\alpha$  – коэффициент, характеризующий интенсивность прироста прочности бетона со временем и зависящий от состава бетонной смеси, условий хранения образцов и других факторов;  $t$  – срок эксплуатации ЖБК;  $t_0$  – начальный период времени, от которого ведется расчет продолжительности срока эксплуатации ЖБК;  $k_R$  – коэффициент интенсивности снижения прочности бетона, определяется по формуле

$$k_R = \frac{R_{(t)}^{\text{теор}} - R_{(t)}^{\text{фак}}}{T_{\text{эсп}}}, \quad (3.13)$$

где  $R_{(t)}^{\text{теор}}$  – теоретическое значение длительной прочности бетона, определяемое по формуле (1) приложения Е [16]:

$$R_{(t)}^{\text{теор}} = R_{b, \text{проект}} \cdot (1 + \alpha \cdot \lg t), \quad (3.14)$$

где  $R_{(t)}^{\text{фак}}$  – фактическое значение прочности бетона, определенное по результатам обследования;

Если при обследовании интенсивность снижения прочности не выявлена, значения  $k_R$  допускается принимать следующими:

- $k_R = 4$  при переменном замораживании и оттаивании и воздействии водной среды или температуры 120 – 200 °С (до 30 лет);
- $k_R = 1,5$  при воздействии температуры, не превышающей 120 °С при  $t > 30$  лет.

Расчет ведется до тех пор, пока значение длительной прочности бетона не будет ниже проектной:

$$R_{(t)} \leq R_{b, \text{проект}} \quad (3.15)$$

Отсюда остаточный ресурс ЖБК будет равен (3.11):

$$T_{\text{ост}} = T - t_{\text{фак}}$$

*Достоинство данного метода:* получаемая величина остаточного ресурса является объективной и достоверной, поскольку используются объективные величины, которые получают в процессе обследования. К тому же само выражение для определения длительной прочности бетона получено на основании многочисленных экспериментальных исследований и, следовательно, хорошо согласуется с практикой [3, 59].

При этом данный метод имеет и ряд недостатков (*ограничений*):

- применим только к конструкциям, работающим в агрессивных и влажных условиях эксплуатации. Для конструкций, которые работают в нормальных условиях эксплуатации (для них характерна кривая 2 на рис. 3.2), это метод применять нельзя [3, 59];
- можно применять, только если проведено детальное (инструментальное) обследование строительных конструкций [3, 59];
- точность сильно зависит от того, каким способом определена прочность материала. Наибольшая точность будет достигаться при определении прочности испытанием на прессе [3, 59];
- не учитывает отказы по общим причинам (спонтанные отказы конструкции). Здесь подразумеваются не учет структурных изменений (например, хрупкости), которые не влияют на состояние конструкции при нормальных условиях эксплуатации,

но могут привести к моментальному или значительному разрушению при сложении нескольких неблагоприятных факторов одновременно. Особенно это актуально для зданий и сооружений, работающих в агрессивных или влажных условиях, поскольку сами условия создают предпосылки для возникновения подобных отказов [3, 59].

Также хотелось бы отметить ряд моментов касательно применения данного метода [3, 59].

*Первый момент* касается уровня рассмотрения ЖБК. На данном этапе при расчете важно сразу определить, как мы будем рассматривать конструкции [3, 59].

1. Можно рассматривать элементы укрупненно. Например, плиты перекрытия как один элемент. В этом случае  $R_{(t)}^{\text{фак}}$  будет равно либо минимальному из всех значений прочности для плит, либо среднему значению прочности. Достоинством данного укрупненного подхода можно считать то, что процесс расчета значительно упрощается в плане количества вычислений и их обработки (трудоемкость вычислений). Недостатком можно считать то, что данный подход не дает представления о проблемных зонах здания или сооружения, так как условно выравнивает возраст элементов. Это может иметь неприятные последствия как с точки зрения безопасности, так и с точки зрения экономики [3, 59].

2. Лучшим подходом можно считать поэлементный (детерминированный) расчет длительной прочности бетона. В этом случае каждый элемент считается независимо и имеет свою длительную прочность (например, при расчете длительной прочности бетона сборного перекрытия каждая плита рассматривается отдельно). Этот подход можно применить не только к сборным конструкциям, но и к монолитным. В этом случае монолитная ЖБК условно разделяется на сектора, и считается длительная

прочность каждого сектора. Достоинством такого метода является то, что можно построить своеобразную «карту» длительной прочности конструкций. Благодаря этому можно увидеть наиболее «слабые» конструкции, которые требуют или потребуют в ближайшее время проведения ремонтных работ. Это серьезно повышает безопасность и снижает экономические издержки. Недостатком такого подхода можно считать трудоемкость вычислений, поскольку их нужно выполнить для большого количества конструкций [3, 59].

*Второй момент* касается назначения окончательной величины остаточного ресурса. Если получившаяся величина остаточного ресурса является на текущий момент достаточно большой, то тогда необходимо установить ограничение. Оно заключается в том, чтобы проводить периодические обследования через определенный промежуток времени согласно [17]. Это необходимо для подтверждения характеристик ЖБК. Если данные характеристики нашли подтверждение, то возможно продолжить дальнейшую эксплуатацию до следующего планового обследования. Если нет, то необходимо выполнить ремонтно-восстановительные работы с пересчетом остаточного ресурса. Таким образом, величина остаточного ресурса ЖБК как бы разбивается на равные интервалы, где наступление следующего происходит только после подтверждения работоспособного состояния ЖБК. Такое ограничение позволяет повысить безопасность [3, 59].



### 3.4. Оценка остаточного ресурса по циклической нагрузке

Ресурс циклической работоспособности определяется по формуле [13, 14]

$$T_{\text{ц}} = \frac{T_{\text{э}}[N]}{N_{\text{э}}}, \quad (3.16)$$

где  $T_{\text{э}}$  – время эксплуатации с момента начала эксплуатации, лет;  $[N]$  – допустимое количество циклов нагружения;  $N_{\text{э}}$  – количество циклов нагружения за период эксплуатации.

Ресурс остаточной работоспособности определяется по формуле [13, 14]

$$T_{\text{ост(ц)}} = T_{\text{ц}} - T_{\text{э}}. \quad (3.17)$$

Данный метод подходит исключительно для конструкций, работающих в условиях динамического нагружения [3].

### 3.5. Оценка остаточного ресурса металлических конструкций по скорости коррозии

Одним из недостатков методики, представленной выше, являлось то, что она не позволяла рассчитать остаточный ресурс ряда металлических конструкций. Для решения этой проблемы можно использовать метод, который применяется для определения остаточного ресурса металлических трубопроводов в атомной [11, 12] и нефтегазовой сферах.

*Метод определения остаточного ресурса по утонению стенки.* Предполагается, что за время эксплуатации трубопроводы корродируют на некоторую толщину стенки трубы. Если очистить металлическую поверхность трубы от коррозии, то можно замерить фактическую толщину стенки. Если она оказывается больше минимально допустимой (устанавливается требованиями нормативной документации или по проекту), то получаем запас. Зная скорость коррозии, фактическую и минимальную, можно рассчитать остаточный срок эксплуатации данного трубопровода.

Остаточный ресурс будет определяться по формуле

$$T = \frac{S_f - s_0}{v}, \quad (3.18)$$

где  $S_f$  – фактическая толщина металла, мм (получена по результатам освидетельствования металлоконструкции);  $s_0$  – минимальная толщина металла, мм (определяется расчетом либо прописывается в проектной документации в момент проектирования здания или сооружения);  $v$  – скорость коррозии.

Разработано множество подходов для определения скорости коррозии [11, 12]. В строительстве из всех этих зависимостей

в основном применяется подход, основанный на определении средней скорости коррозии [13, 14]. С чем это связано, будет изложено далее.

Сначала рассмотрим подходы в порядке возрастания количества проведенных (минимально необходимых) обследований (контролей), а затем линейные и нелинейные законы, которые выводятся либо эмпирически, либо методом аппроксимации.

*Первый метод* основан на определении средней скорости коррозии металлоконструкций [11, 12].

Средняя скорость утонения металла

$$v = \frac{S + C_0 - s_f}{t}, \quad (3.19)$$

где  $S$  – исполнительная толщина металла, мм (выбирается из проектной (конструкторской) документации);  $t$  – срок эксплуатации металлоконструкции;  $s_f$  – фактическое утонение металла за период эксплуатации, мм:

$$s_f = S - S_f, \quad (3.20)$$

где  $S_f$  – фактическая толщина металла, определенная на момент обследования (контроля технического состояния), мм;  $C_0$  – плюсовой допуск на толщину металла, мм.

Основным преимуществом, которое имеет данная линейная зависимость перед нелинейными, является то, что при незначительном изменении исходных данных конечный результат также изменится незначительно, т. е. не подвержен колебаниям. Именно поэтому данный метод нашел широкое применение в строительной отрасли [13, 14].

Также данный метод имеет и ряд *недостатков*:

- необходимо проводить инструментальное обследование для получения исходных данных [3, 60];

- в зависимости от способа измерения и доступности конструкции погрешность определения фактической толщины металлической конструкции, не поврежденной коррозией, может достигать нескольких сантиметров. В основном именно доступность является определяющим фактором по точности измерения, ведь чтобы определить толщину конструкции, не поврежденную коррозией, нужно предварительно ее очистить, а это делается или можно сделать не всегда [3, 60];

- применим исключительно в нормальных условиях эксплуатации. При агрессивных и влажных условиях дает заниженную скорость коррозии [3, 60].

*Второй метод* заключается в определении скорости коррозии, если было проведено два обследования (контроля толщины металла) в течение некоторого времени [11].

В этом случае формула имеет вид

$$v = \frac{S_1 - S_2}{(t_2 - t_1) \cdot K_1 \cdot K_2}, \quad (3.21)$$

где  $S_1$  и  $S_2$  – фактическая толщина металла, определенная при первом и втором обследованиях соответственно, мм;  $t_1$  и  $t_2$  – время от момента начала эксплуатации до момента первого и второго обследования соответственно, лет;  $K_1$  – коэффициент, учитывающий отличие средней ожидаемой скорости коррозии (эрозии) от гарантированной скорости коррозии (эрозии) с доверительной вероятностью  $Y = 0,7-0,95$ ;  $K_2$  – коэффициент, учитывающий погрешность определения скорости коррозии (эрозии) по линейному закону от скорости коррозии, рассчитанной по более точным (нелинейным) законам изменения контролируемого параметра.

*Недостатки* данного подхода:

- необходимо проводить инструментальное обследование для получения исходных данных [3, 60];

- точность определения фактической толщины металлической конструкции, не поврежденной коррозией [3, 60];
- неприменим, если обследование проводилось только один раз [3, 60];
- проблема с назначением коэффициентов  $K_1$  и  $K_2$ . Это связано с тем, что точный нелинейный закон нам практически никогда не известен. Из-за этого данный метод уступает первому по точности и достоверности результатов. Поэтому он не нашел применения в строительной отрасли [3, 60].

*Третий метод* заключается в определении скорости коррозии, если было проведено три обследования (контроля толщины металла) в течение некоторого времени [11]:

$$v = \frac{X_1 \cdot S_1 - 3 \cdot S_2}{(3 \cdot X_2 - X_1^2) \cdot K_1 \cdot K_2}; \quad (3.22)$$

$$S_1 = \sum_{i=1}^3 S(t_i); \quad (3.23)$$

$$S_2 = \sum_{i=1}^3 S(t_i) \cdot t_i; \quad (3.24)$$

$$X_1 = \sum_{i=1}^3 t_i; \quad (3.25)$$

$$X_2 = \sum_{i=1}^3 t_i^2, \quad (3.26)$$

где  $t_i$  – момент времени, при котором проводилось обследование (контроль толщины металла);  $S(t_i)$  – фактическая толщина металла, определенная при обследовании (контроле) в момент времени  $t_i$ .

Недостатки данного метода аналогичны тем, которые имеет второй метод (плюс он неприменим, если обследование проводилось один или два раза) [3, 60].

### 3.6. Метод оценки остаточного ресурса по несущей способности

Оценка остаточного ресурса проводится сопоставлением контролируемых параметров, определенных в ходе выполнения обследования, с соответствующим проектными параметрами или определенными в результате расчетов. Но прежде чем приступить непосредственно к расчету, необходимо убедиться в том, что несущая способность строительных конструкций обеспечена. Для этого нужно выполнить сравнение с минимальной несущей способностью:

$$F_{cr} [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)] \geq F, \quad (3.27)$$

где  $F_{cr}[x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]$  – функция несущей способности [19];  $x_n(t)$  – параметр функции несущей способности. В качестве параметров принимаются размеры поперечного сечения, прочность материалов и т. д.;  $F$  – минимальная несущая способность, определенная по результатам расчета.

Если условие не выполняется, то остаточный ресурс приравнивается к нулю.

Остаточный ресурс по несущей способности вычисляется по формуле

$$t_R = \Delta t \cdot \frac{F_{cr} - F}{F_{pr} - F_{cr}}, \quad (3.28)$$

где

$$\Delta t = t_1 - t_0, \quad (3.29)$$

где  $t_1$  – дата выполнения обследования;  $t_0$  – дата начала эксплуатации конструкции (после изготовления, усиления или замены)

или предыдущего обследования;  $F_{pr}$  – несущая способность элемента, которая определена по данным проекта.

Данный метод может применять, только если проведено детальное (инструментальное) обследование строительных конструкций [3].

*Достоинством* данного метода является то, что получаемая величина остаточного ресурса является объективной и достоверной [3].

*Недостатки* же данного метода следующие:

- точность определения несущей способности зависит от применяемых методов контроля (разрушающих или неразрушающих) [3];
- величина минимальной несущей способности будет зависеть от метода расчета и от того, как проводится расчет – вручную или с помощью программного комплекса [3];
- не учитывает отказы по общим причинам. Несмотря на то что проводится инструментальное обследование, не учитываются факторы, которые могут привести к спонтанным отказам [3].

### 3.7. Метод определения остаточного ресурса по кинетике процесса карбонизации бетона

Все железобетонные конструкции, эксплуатирующиеся в воздушной среде, подвержены влиянию кислых газов. Поскольку концентрация углекислого газа в воздухе в десятки раз больше концентрации других кислых газов, именно он оказывает основное влияние на бетонные конструкции. Это явление получило название карбонизации. Процесс карбонизации зависит от множества факторов, таких как относительная влажность атмосферного воздуха, пористость материала, температура, давление, влажность цементного камня и др.

Рассмотрим физические и математические модели процесса карбонизации.

*Физические модели* процесса карбонизации описываются уравнением

$$X = a \cdot \sqrt{t} + b, \quad (3.30)$$

где  $X$  – глубина карбонизации;  $a$  и  $b$  – коэффициенты, зависящие от перечисленных выше факторов.

Отсюда ресурс бетона

$$t = \left(\frac{X - b}{a}\right)^2. \quad (3.31)$$

В данном случае используется максимальная глубина карбонизации, т. е. та глубина, при которой начинаются процессы коррозии арматуры. Иначе говоря, защитный слой бетона перестает выполнять свои защитные функции.



Рассмотрим некоторые способы определения глубины карбонизации.

1. Способ подсчета глубины карбонизации по теоретической формуле А. Фика:

$$X = \sqrt[n]{\frac{2 \cdot D \cdot C \cdot t}{m}}. \quad (3.32)$$

Отсюда ресурс бетона равен

$$t = \frac{X^n \cdot m}{2 \cdot D \cdot C}, \quad (3.33)$$

где  $n$  – показатель степени, зависящий от класса водонепроницаемости бетона. Для класса бетона W2, W4  $n = 2$ , для класса W6, W8  $n = 3$ ;  $D$  – эффективный коэффициент диффузии углекислого газа в карбонизированном бетоне, данный коэффициент можно определить по следующим уравнениям:

$$D = 10^{-4} \cdot 10^{(B/C-0,4)/0,27}, \quad (3.34)$$

где  $B/C$  – водно-цементное отношение, или по уравнению, связывающему диффузионные характеристики бетона с его капиллярной пористостью (уравнение Бабицкого В. В.):

$$D = k_{ц} \cdot D_0 \cdot (\Pi_k^6 - 0,03)^3, \quad (3.35)$$

где  $k_{ц}$  – коэффициент, определяющий влияние вида цемента (например, для портландцемента  $k_{ц} = 12$ , для шлакопортландцемента  $k_{ц} = 20$ );  $D_0$  – коэффициент диффузии углекислого газа в воздухе:

$$D_0 = 1,65 \cdot 10^{-1} \text{ см}^2 / \text{с},$$

$\Pi_k^{\circ}$  – капиллярная пористость бетона;  $C$  – концентрация углекислого газа у поверхности бетона (в нормальных условиях  $C = 0,03$ );  $m$  – количество углекислого газа, поглощенного единицей объема бетона (реакционная емкость бетона), его можно оценить по следующим уравнениям:

$$m = 0,4 \cdot V_c \cdot P_{\text{CaO}} \cdot f_k, \quad (3.36)$$

где  $V_c$  – количество цемента в 1  $\text{дм}^3$  бетона;  $P_{\text{CaO}}$  – относительное содержание CaO в цементе;  $f_k$  – степень карбонизации бетона, равная отношению CaO, связанного в карбонат к общему CaO в цементе ( $f_k = 0,6$ ), или

$$m = 0,294 \cdot \alpha \cdot \text{Ц} \cdot \alpha_k, \quad (3.37)$$

где  $\text{Ц}$  – расход цемента при изготовлении.

2. Формула определения глубины карбонизации С. Н. Алексеева и Н. К. Розенталя:

$$X = \sqrt{\frac{2 \cdot D \cdot C \cdot t}{m_0 \cdot m_c / 300}}, \quad (3.38)$$

где  $m_c$  – расход цемента в 1  $\text{м}^3$  бетона.

На практике часто упрощают данное выражение для инженерных расчетов. Приближенная формула имеет вид

$$X = K \cdot \sqrt{t}, \quad (3.39)$$

где  $K$  – скорость процесса карбонизации, мм/год<sup>0,5</sup>:

$$K = \sqrt{\frac{2 \cdot D \cdot C}{m_0}}. \quad (3.40)$$

Экспериментальные данные о кинетике карбонизации бетона подтверждают зависимость толщины карбонизированного слоя по закону квадратного корня из времени, однако при возрастании влажности развитие происходит медленнее, чем это следует из расчета.

Математические модели процесса карбонизации основываются на втором законе Фика:

$$\frac{\partial C}{\partial t_{\partial}} = D_{eff} \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}. \quad (3.41)$$

Рассмотрим некоторые модели определения скорости карбонизации.

1. Модель Schiessel:

$$K = \sqrt{\frac{2 \cdot D_b \cdot C_{s, atm}}{m_c \cdot C_{CO_2} / 100}}, \quad (3.42)$$

где  $D_b$  – постоянная диффузии бетона, м<sup>2</sup>/с;  $C_{s, atm}$  – концентрация CO<sub>2</sub> в атмосфере, %;  $C_{CO_2}$  – концентрация CO<sub>2</sub> для превращения всех продуктов в карбонаты, мг/м<sup>3</sup>.

2. Модель De Sitter:

$$K = \sqrt{\frac{46 \cdot (B/\Pi) - 17,6}{2,7}} \cdot R_{\Pi} \cdot k_{RH}, \quad (3.43)$$

где  $R_{II}$  – коэффициент влияния типа бетона;  $k_{RH}$  – коэффициент, характеризующий воздействие влажной окружающей среды.

3. Модель Bob:

$$K = \frac{150 \cdot C \cdot k_{RH} \cdot d_{CO_2}}{f_e}, \quad (3.44)$$

где  $d_{CO_2}$  – коэффициент концентрации  $CO_2$  в атмосфере, %;  $f_e$  – прочность на сжатие, Н/мм<sup>2</sup>.

4. Модель Papadakis:

$$K = 350 \frac{\rho_c \left[ \frac{m_v}{m_c} - 0,3 \right]}{\rho_v \left[ 1 + \frac{\rho_c \cdot m_v}{\rho_v \cdot m_c} \right]} \cdot f_R \times \\ \times \sqrt{\left[ 1 + \frac{\rho_c \cdot m_v}{\rho_v \cdot m_c} + \frac{\rho_c \cdot m_k}{\rho_a \cdot m_c} \right]} \cdot C_{s, atm}, \quad (3.45)$$

где  $\rho_c$  и  $m_c$  – объемная плотность и содержание цемента;  $\rho_v$  и  $m_v$  – объемная плотность и содержание воды;  $\rho_a$  и  $m_k$  – объемная плотность и содержание заполнителя;  $f_R$  – относительная влажность, %.

5. Модель DuraCrete:

$$X = \frac{2 \cdot k_c \cdot k_t \cdot k_{RH} \cdot D_{eff} \cdot C}{a_{CO_2}} \cdot \sqrt{t} \cdot \left( \frac{t_0}{t} \right), \quad (3.46)$$

где  $k_c$  – коэффициент твердения;  $a_{CO_2}$  – способность  $CO_2$  закрепляться в бетоне;  $D_{eff}$  – эффективный коэффициент диффузии в сухом карбонизированном бетоне для диоксида углерода при определенном уплотнении, условиях твердения во внешней среде:

$$D_{eff} = \frac{a_{CO_2}}{R_{Carb}}, \quad (3.47)$$

где  $R_{Carb}$  – эффективное сопротивление карбонизации бетона;  
 $t_0$  – эталонное время, 1 год.

6. Модель Gehlen:

$$X = \sqrt{2 \cdot k_c \cdot k_{RH} \cdot \left( k_t \cdot R_{ACC,0}^{-1} + \varepsilon_t \right) \cdot D_{eff} \cdot C} \times \\ \times \sqrt{t \cdot \left( \frac{t_0}{t} \right)^{\frac{(P_{sw} - T_{0W})^{hw}}{2}}}, \quad (3.48)$$

где  $\varepsilon_t$  – погрешность, обусловленная использованием ускоренного метода карбонизации;  $R_{ACC,0}^{-1}$  – обратное эффективное сопротивление карбонизации в бетоне, определенной в условиях ускоренной карбонизации;  $T_{0W}$  – время увлажнения:

$$T_{0W} = \frac{Z}{360}, \quad (3.49)$$

где  $Z$  – количество дней с осадками 2,5 мм/день атмосферной воды.

Данный метод имеет ряд серьезных *недостатков*, которые не позволяют применять его на практике:

- первый заключается в том, что на практике не всегда получается получить достоверные сведения о глубине и скорости карбонизации. Из-за этого разброс в величине срока службы бетона составляет до 50 лет;

- второй и самый главный заключается в том, что даже при начале коррозии арматуры (достижении максимальной глубины карбонизации, при которой перестает работать защитный слой бетона) остаточный ресурс ЖБК, по сути, не исчерпан.

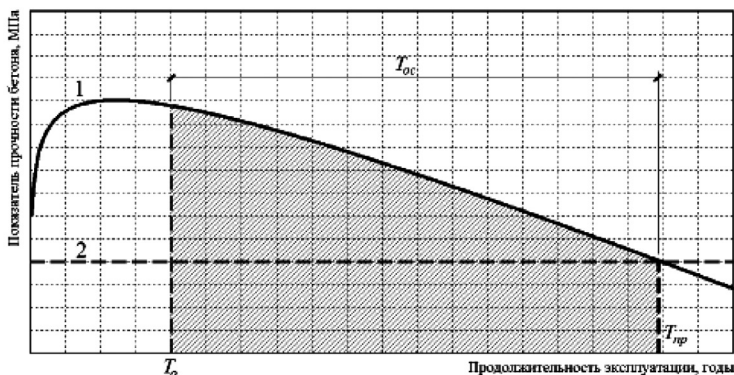
### *3.7. Метод определения остаточного ресурса по кинетике процесса...*

---

Иначе говоря, данный метод определения остаточного ресурса не соответствует самому определению понятия остаточного ресурса. Это недостаток не относится к гидротехническим сооружениям.

### 3.8. Оценка остаточного срока службы из условия появления предельно допустимых деформаций в результате изменений физико-механических характеристик бетона

Оценка остаточного срока службы железобетонных изгибаемых элементов, исходя из условия появления предельно допустимых деформаций в результате изменения прочности бетона, производится путем сопоставления деформаций (прогибы, ширина раскрытия трещин), возникающих от нормативной нагрузки в фиксируемые отрезки времени, с предельно допустимыми значениями, указанными в нормах для соответствующих конструкций. При этом рассматривается зависимость между прочностными свойствами бетона в фиксируемые отрезки времени и расчетными значениями прогибов или шириной раскрытия трещин поперечного направления (рис. 3.3).



1 – график изменения показателя прочности бетона (марка, класс) во времени;  
2 – предельно допустимое значение минимальной прочности бетона

Рис. 3.3. Оценка остаточного срока службы железобетонных конструкций по динамике изменения прочностных свойств бетона

Расчет остаточного срока службы конструкций по деформациям производится в следующем порядке.

На *первом этапе*, варьируя класс бетона от проектного до предельно допустимого значения, выполняется расчет конструкций по второй группе предельных состояний. Для каждого промежуточного значения класса бетона вычисляются величины прогибов и ширины раскрытия трещин от нормативной нагрузки.

На *втором этапе* выполняется обработка полученных результатов расчета. Посредством регрессионного анализа устанавливаются аналитические зависимости между расчетными деформациями и классом бетона вида  $f = f(B)$  и  $a_{crc} = a_{crc}(B)$ .

На *третьем этапе*, используя аналитические зависимости между прочностью бетона и сроком службы, уточненные в ходе проведения обследования конструкций, выражения вида  $f = f(B)$  и  $a_{crc} = a_{crc}(B)$  преобразуют в зависимости вида  $f = f(T)$  и  $a_{crc} = a_{crc}(T)$  соответственно.

На *заключительном этапе* прогнозируемый остаточный срок службы железобетонных изгибаемых элементов вычисляется с помощью полученных временных зависимостей или определяется графически (рис. 3.4).

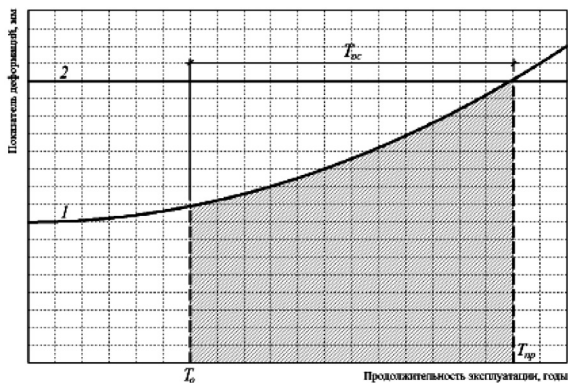
За остаточный срок службы принимается временной интервал от момента проводимого обследования до расчетного момента появления предельно допустимых деформаций.

Расчетное значение остаточного срока службы от изменений прочностных свойств бетона может быть скорректировано с учетом вероятного изменения действующей эксплуатационной нагрузки.

Величина остаточного срока службы  $T_{oc}$  характеризует окончание нормального срока эксплуатации  $T_{пр}$ , после достижения которого возможно появление деформаций, превышающих предельно допускаемые по нормам. При дальнейшем снижении



прочности бетона возможно дальнейшее развитие деформаций с последующим вероятным обрушением.



1 – график изменения деформаций (прогиб, ширина раскрытия трещины) во времени;  
2 – предельно допустимое значение деформаций (прогиб, ширина раскрытия трещины)

Рис. 3.4. Оценка остаточного срока службы железобетонных конструкций по достижению предельно допустимых деформаций

### 3.9. Оценка остаточного срока службы из условия совместности работы бетона и корродирующей арматуры

Расчетное значение остаточного срока службы из условия прекращения совместной работы бетона и арматуры предлагается определять по моменту выхода рабочей арматуры из зацепления с бетоном.

Рассматриваемый момент времени определяется из условия уменьшения высоты «риффов» в процессе коррозии на поверхности арматуры и увеличения толщины продуктов коррозии между поверхностями бетона и арматуры. Оцениваемым параметром в данном случае будет величина зацепления  $z_k$  (рис. 3.5). Значение  $z_k$  определяется разницей высоты «рифа» стальной арматуры до начала коррозии  $z$ , глубиной коррозионных повреждений  $h_k$  и толщиной продуктов коррозии  $t_{pk}$  (см. рис. 3.5).

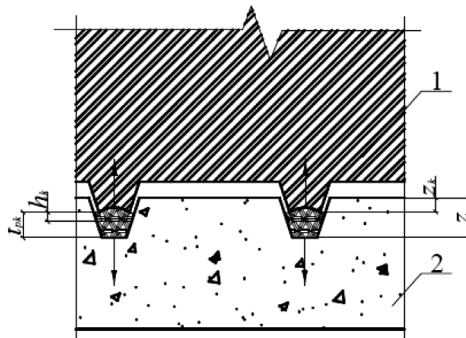


Рис. 3.5. Упрощенная схема выхода арматуры из зацепления с бетоном:  
 $1$  – арматурный стержень;  $2$  – защитный слой бетона;  $h_k$  – глубина коррозии;  $t_{pk}$  – толщина продуктов коррозии;  $z$  – величина зацепления (высота «рифа») до начала коррозии;  $z_k$  – величина зацепления в результате коррозии

Расчет прогнозируемого остаточного срока службы производится в следующем порядке.

На *первом этапе* определяется момент времени, соответствующий началу развития коррозии стальной арматуры. Основной причиной начала коррозии стальной арматуры является прекращение пассивирующего действия защитного слоя бетона в результате карбонизации или иных воздействий.

Таким образом, развитие коррозионного процесса будет начинаться после прохождения фронта карбонизации за пределы начального коррозионного очага на арматуре. Продолжительность карбонизации бетона определяется по формуле

$$\tau = \frac{0,4 \cdot x_{\text{CO}_2}^2 \cdot G_c \cdot P_{\text{CaO}} \cdot f_c}{2 \cdot D \cdot C_0}, \quad (3.50)$$

где  $x_{\text{CO}_2}$  – глубина нейтрализации бетона углекислым газом, см;  $G_c$  – количество цемента в бетоне, г/дм<sup>3</sup>;  $P_{\text{CaO}}$  – количество СаО в кальцийсодержащих соединениях цемента, в относительных величинах по массе;  $f_c$  – степень карбонизации бетона, равная отношению количества СаО, связанного в карбонат, к общему количеству СаО в цементе;  $D$  – эффективный коэффициент диффузии углекислого газа в бетон, см<sup>2</sup>/с;  $C_0$  – концентрация углекислого газа в воздухе, в относительных единицах.

На *втором этапе* оценивается скорость карбонизации бетона, которая получается путем дифференцирования формулы (3.50) по времени  $\tau$ .

На *третьем этапе* устанавливается функциональная зависимость глубины коррозии от времени и скорости ее развития по результатам проводимой оценки коррозионных повреждений стальной арматуры с учетом времени карбонизации защитного слоя бетона.

На четвертом этапе производится оценка глубины коррозионных повреждений стальной арматуры в железобетонных конструкциях, которая может производиться тремя способами:

1. На открытых участках с разрушенным защитным слоем бетона, где арматура практически полностью оголена, после тщательной механохимической очистки арматуры от продуктов коррозии, выполняются непосредственные измерения при помощи стальной измерительной линейки и штангенциркуля с нутромером.

2. На участках с продольными трещинами в защитном слое бетона глубина коррозии определяется расчетным способом путем сопоставления средней ширины раскрытия трещины, в бетоне вдоль корродирующей арматуры – средней глубине коррозии.

При этом ширина раскрытия трещины зависит от толщины защитного слоя бетона, диаметра арматуры, а также количества рядом расположенных арматурных стержней. Для одиночного стержня в бетоне (при расстоянии до соседнего стержня 250–300 мм и более) средняя глубина коррозии может быть определена по формуле

$$h_k = 0,3 \frac{\delta(2 \cdot a + d)}{a + 0,146 \cdot d}, \quad (3.51)$$

где  $\delta$  – среднее значение ширины раскрытия трещины вдоль корродирующего арматурного стержня, мм;  $a$  – толщина защитного слоя бетона, мм;  $d$  – начальный диаметр арматурного стержня, мм.

3. Глубина коррозии определяется исходя из усредненной скорости коррозии для сред с различной степенью агрессивности согласно данным.

Третий способ рекомендуется использовать для приближенной предварительной оценки глубины коррозии, которая

в дальнейшем уточняется в ходе проведения обследований конструкций с использованием способов 1 или 2.

Для установления функциональной зависимости между глубиной коррозионных повреждений во времени используется формула толщины пленки продуктов коррозии  $t_{pk}$ :

$$t_{pk} = \sqrt{2 \cdot C \cdot D \cdot \tau}, \quad (3.52)$$

где  $D$  – коэффициент диффузии кислорода в сталь, мм<sup>2</sup>/с;  $C$  – концентрация кислорода на поверхности арматуры в относительных единицах;  $\tau$  – продолжительность развития процесса, с.

Для упрощения расчетов толщины пленки продуктов коррозии  $t_{pk}$  предлагаются следующие допущения:

- произведение  $D \cdot C$  за все время развития коррозии считается постоянным и находится из выражения с учетом измеренной или вычисленной глубины коррозии на момент обследования;
- момент начала коррозии определяется по сроку полной карбонизации защитного слоя бетона.

Соотношение толщины продуктов коррозии и средней глубины коррозии оценивается по выражению

$$h_k = 0,6 \cdot t_{pk}, \quad (3.53)$$

где  $h_k$  – средняя глубина коррозии, мм;  $t_{pk}$  – средняя толщина продуктов коррозии, мм.

На *пятом этапе* скорость развития коррозионного процесса определяется из выражения

$$v_k = \frac{\sqrt{0,18 \cdot C \cdot D \cdot \tau}}{\tau}. \quad (3.54)$$

*Шестым шагом* вычисляется величина зацепления «рифов» арматуры за бетон, которая будет определяться следующей зависимостью:

$$z_k = z - \sqrt{2 \cdot C \cdot D \cdot \tau}, \quad (3.55)$$

где все обозначения в формуле соответствуют обозначениям на рис. 3.5 и в вышеприведенных формулах.

*На последнем этапе* оценивается прогнозируемый остаточный срок службы железобетонной конструкции. Оценка выполняется из условия обеспечения совместной работы арматуры и бетона, может определяться аналитически из последнего выражения при условии, что коррозия арматуры начинается после карбонизации защитного слоя бетона, а также графически (рис. 3.6). За остаточный срок службы принимается отрезок времени от момента проводимого обследования до момента времени, в который величина зацепления будет равна нулю (см. рис. 3.6).

Прекращение зацепления арматуры в бетоне может привести к обрушению конструкции. Таким образом, в момент времени  $T_{пр}$  с определенной долей вероятности можно говорить о прекращении эксплуатации конструкции из-за большой вероятности ее обрушения. На рис. 3.6  $T_k$  – время карбонизации защитного слоя бетона.

Расчет прогнозируемого остаточного срока службы строительной конструкции производится в следующем порядке.

1. На основании анализа проводимых исследований по оценке технического состояния железобетонных конструкций производится выбор расчетных моделей развития коррозионного процесса.

2. Варьируя глубину коррозионных повреждений от нуля до критического значения, производят расчет по второй группе

пределных состояний с учетом выбранной расчетной модели коррозии. Для соответствующей глубины коррозии вычисляются значения прогибов и ширины раскрытия трещин от нормативной нагрузки.

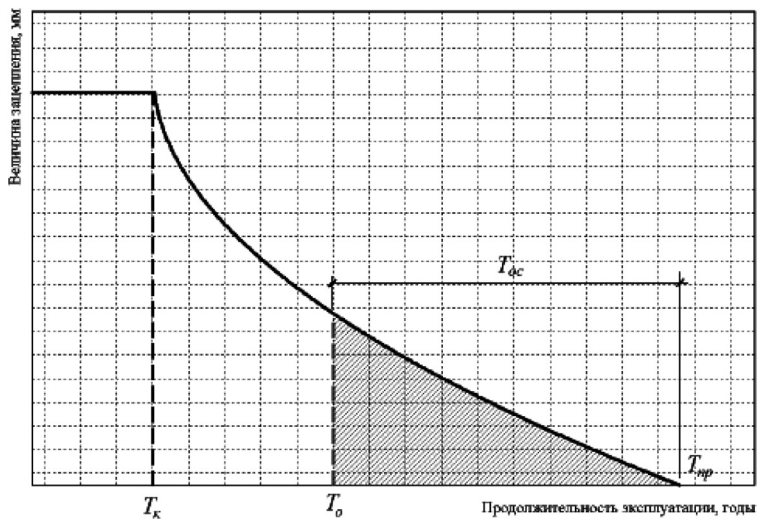


Рис. 3.6. Оценка остаточного срока службы железобетонных конструкций по условию выхода арматуры из зацепления с бетоном

3. Производится обработка полученных результатов. Посредством регрессионного анализа устанавливаются аналитические зависимости между расчетными деформациями и глубиной коррозии вида  $f = f(h_k)$  и  $a_{crc} = a_{crc}(h_k)$ .

Выражения вида  $f = f(h_k)$  и  $a_{crc} = a_{crc}(h_k)$  преобразовываются в зависимости вида  $f = f(T)$  и  $a_{crc} = a_{crc}(T)$  — соответственно.

Прогнозируемый остаточный срок службы железобетонных изгибаемых элементов вычисляется с помощью полученных временных зависимостей или определяется графически (рис. 3.7)

с учетом того, что коррозия арматуры начинается после полного завершения карбонизации защитного слоя бетона.

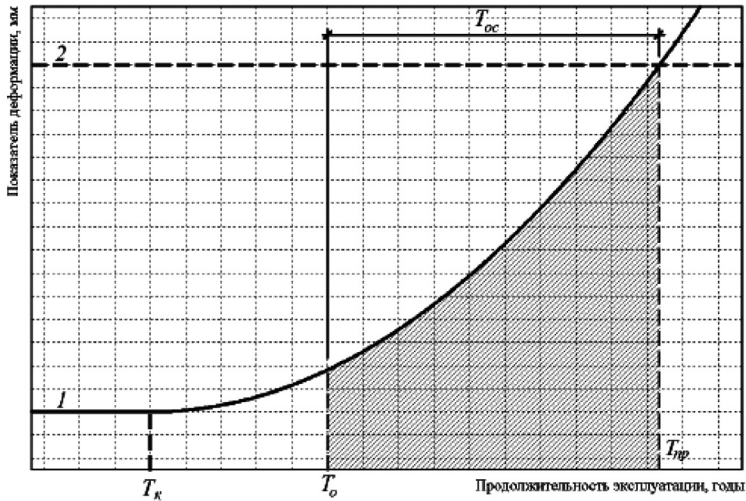


Рис. 3.7. Оценка остаточного срока службы железобетонных конструкций по достижению предельно допустимых деформаций: 1 – график изменения деформаций (прогиб, ширина раскрытия трещины) во времени; 2 – предельно допустимое значение деформаций (прогиб, ширина раскрытия трещины)

За остаточный срок службы принимается временной интервал от момента проводимого обследования до момента времени  $T_{пр}$ , когда расчетные значения деформаций достигают предельно допустимых значений (см. рис. 3.7).

Расчетное значение остаточного срока службы из условия появления предельно допустимых деформаций в результате коррозии арматуры может быть скорректировано с учетом вероятного изменения нагрузки.



### 3.10. Оценка остаточного ресурса с применением кинетической теории прочности твердых тел

Данный метод основан на кинетической теории прочности твердых тел, выдвинутой С. Н. Журковым.

Уравнение имеет вид

$$T = \tau_0 \cdot \exp \left[ \frac{U_0 - \gamma \cdot \sigma}{R \cdot T} \right], \quad (3.56)$$

где  $t$  – время до разрушения, с;  $\tau_0$  – период тепловых колебаний атомов, равный  $10^{-13}$  с;  $U_0$  – начальная энергия активации процесса разрушения, равная потенциальному барьеру разрыва химических связей твердых тел, кДж;  $R$  – газовая постоянная, равная  $8,314 \cdot 10^{-3}$  кДж/(моль·К);  $T$  – температура, К;  $\sigma$  – напряжение, МПа;  $\gamma$  – структурно-чувствительный коэффициент, кДж/(моль·МПа).

Представленная формула является простейшей, предложенная еще в 1950-х гг. В дальнейшем сделано множество обобщений данной формулы с целью улучшения согласия экспериментальных данных с теорией.

Для адгезионных соединений была предложена следующая формула:

$$T = \tau_0 \cdot \exp \left[ \frac{U_0 - \gamma(\sigma + \sigma_m)}{R \cdot T} \right], \quad (3.57)$$

где  $\sigma_m$  – внутреннее напряжение в адгезионном соединении, которое зависит от предыстории образца, температуры проведения испытаний и т. п.

Наиболее полное обобщение классической формулы долговечности (3.56) на полимерные материалы сделано С. Б. Ратнером. К формуле, аналогичной (3.58), пришел также Г. М. Бартнев, исходя из фононной концепции разрушения, опирающейся на динамическую теорию устойчивости кристаллических решеток:

$$T = \tau_m \cdot \exp \left[ \frac{U_0 - \gamma \cdot \sigma}{k \cdot T} \cdot \left( 1 - \frac{T}{T_m} \right) \right], \quad (3.58)$$

где  $T_m$  – предельная температура материала, соответствующая его минимальной долговечности  $\tau_m$ ;  $k$  – постоянная Больцмана;  $\tau_m$  – минимальная долговечность.

При постоянной температуре уравнение (3.56) приобретает более простой вид:

$$T = A \cdot e^{-\alpha \cdot \sigma}, \quad (3.59)$$

где  $A$  и  $\alpha$  – константы, определяемые из опыта,  $A$  и  $\alpha$  – константы при постоянной температуре:  $\lg A = 17,1$  (при одноосном сжатии, растяжении и скалывании вдоль волокон и поперечном изгибе),  $\lg A = 10,2$  (при растяжении поперек волокон) и  $\alpha = 0,166$ .

Остаточный ресурс будет равен (3.11):

$$T_{\text{ост}} = T - t_{\text{фак}} \cdot$$

Достоинством данного метода является его универсальность. Он может быть применен к любым строительным конструкциям. Возможность его применения была доказана в многочисленных экспериментах с различными материалами.

В то же время следует отметить, что ряд экспериментальных данных противоречит этим формулам, что говорит о том, что в ряде случаев (для ряда материалов) они неприменимы.

Также не всегда имеется достаточное количество информации о значениях начальной энергии активации процесса разрушения и структурно-чувствительного коэффициента, что требует проведения сложных испытаний, которые могут позволить себе не все организации, проводящие обследования.

Следует отметить, что разнообразие вариаций классической формулы (3.56) говорит о том, что она не окончательная, а значит, может претерпеть изменения в будущем на основе новых научных данных.

### 3.11. Оценка остаточного ресурса деревянных конструкций

Данный подход основан на методе определения длительной прочности древесины, предложенном Ф. П. Белянкиным:

$$\sigma = \sigma_{\text{п}} + (\sigma_{\text{ар}} - \sigma_{\text{п}}) \cdot e^{-b \cdot t}, \quad (3.60)$$

где  $\sigma$  – напряжение, МПа;  $\sigma_{\text{п}}$  – предел длительного сопротивления, МПа;  $\sigma_{\text{ар}}$  – прочность при стандартных испытаниях, МПа;  $b$  – постоянная;  $t$  – время, сут.

Приняв, что конструкция достигла своего предельного состояния в момент времени  $T$ , получим

$$T = -\frac{1}{b} \cdot \ln \frac{\sigma - \sigma_{\text{п}}}{(\sigma_{\text{ар}} - \sigma_{\text{п}})}. \quad (3.61)$$

Отсюда остаточный ресурс по формуле (3.11) будет равен

$$T_{\text{ост}} = T - t_{\text{фак}}.$$

*Недостатки данного метода:* введенное в уравнении (3.60) понятие «предел длительного сопротивления» не совсем корректно, поскольку противоречит не только современным представлениям о прочности твердых тел, но и результатам экспериментальных исследований [61], которые проводились на образцах со значительно большей продолжительностью действия постоянной нагрузки, чем в работе [62]. Это же касается и условного коэффициента длительного сопротивления, значение которого не является константой, а зависит от продолжительности действия нагрузки (предполагаемого срока эксплуатации конструкций), вида напряженного состояния [63–65] и сочетания нагрузок.

## **Глава 4. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ. НАЗНАЧЕНИЕ ОКОНЧАТЕЛЬНОЙ ВЕЛИЧИНЫ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА**

В настоящее время для оценки остаточного ресурса строительных конструкций зданий и сооружений разработано достаточно много методов расчета. Каждый из этих методов основан на определенной зависимости, которая позволяет получить оставшееся время службы конструкций.

В практике расчета обычно используется какой-либо один метод расчета и редко когда больше. Если используется какой-то один метод, то велика вероятность того, что полученный результат может быть неправильным. Это связано не только с ошибкой при расчете, но и с тем, что нет возможности проверить результат, сравнив с другой величиной, полученной по другому методу, потому что не всегда выбранный метод расчета подходит под данные условия (тип материала, условия эксплуатации и т. д.).

В случаях, когда производится оценка остаточного ресурса по нескольким методам расчета, но не производится оценка достоверности полученных результатов, это может привести к неправильному результату при назначении окончательного срока остаточного ресурса конструкции. Связано это с тем, что

не анализировался разброс полученных значений, что позволяло бы оценить правильность применения того или иного метода, а также выявить причины такого расхождения.

Для того чтобы повысить точность и достоверность определения остаточного ресурса, предлагается проводить оценку полученных результатов по алгоритму, представленному далее. Данный алгоритм основан на использовании аппарата математической статистики.

При этом следует сразу оговориться, что анализ полученных значений следует производить по данному алгоритму только в том случае, если использовалось не менее трех различных методов расчета остаточного ресурса строительных конструкций.

### ***Алгоритм оценки результатов расчета остаточного ресурса строительных конструкций***

1. Произвести выборку полученной совокупности значений. Если какое-либо значение значительно отличается от остальных, то необходимо определить причину такого расхождения. В зависимости от причины возможны следующие варианты.

1.1. Если причиной расхождения стала ошибка при расчете, необходимо заново пересчитать по данному методу.

1.2. Если причиной расхождения стало то, что данный метод считает остаточный ресурс для иной категории технического состояния, чем остальные, то необходимо заново произвести расчет остаточного ресурса по данному методу, но для той категории технического состояния, для которой считалось по остальным методам.

Примером такого рода ошибки можно считать расчет остаточного ресурса по методу длительной прочности бетона и по экспоненциальному распределению до капитального ремонта

зданий и сооружений. В первом случае считается остаточный ресурс для категории аварийного состояния, во втором – при ограниченно-работоспособном.

1.3. Если причиной расхождения стало то, что использован метод, который не подходит для данных условий, то его необходимо исключить из рассмотрения.

Примером такого рода ошибки может служить метод по длительной прочности бетона. Он может применяться тогда, когда есть неблагоприятные условия эксплуатации. Но, как показывает практика, его часто применяют, когда условия эксплуатации являются нормальными, что является ошибкой.

2. Сравнить полученные значения остаточного ресурса с имеющимися экспериментальными значениями. Если полученное значение превышает уже известное некое максимальное значение, то необходимо выяснить причину такого расхождения. Здесь возможны следующие варианты.

2.1. Имеются результаты исследования, которые подтверждают, что предельный срок эксплуатации рассматриваемого элемента строительных конструкций выше, чем у его аналогов. В этом случае пересмотр полученных значений не производится.

2.2. Если нет каких-либо научных исследований, которые подтверждали бы, что предельный срок эксплуатации выше, чем у рассматриваемых аналогичных элементов строительных конструкций, то в этом случае необходимо еще раз проверить полученные результаты и отбросить те из них, которые превышают указанное предельное значение.

Наглядным примером того, о чем идет речь, являются сроки службы строительных конструкций до капитального ремонта. Эти данные были получены в результате испытаний и наблюдений за строительными конструкциями в течение многих лет институтом им. К. Д. Памфилова.

3. Определить среднее полученное значение по формуле

$$T_{\text{пред. сред}} = \frac{T_{\text{пред } 1} + \dots + T_{\text{пред } i}}{i}, \quad (4.1)$$

где  $T_{\text{пред } i}$  – значение остаточного ресурса, определенное по  $i$ -му методу расчета;  $i$  – количество используемых методов расчета остаточного ресурса.

Выбор среднего значения, относительно которого производится оценка разброса величин остаточного ресурса, объясняется тем, что в теории математической статистики оно считается наиболее близким к истинному значению.

4. Оценить разброс значений относительно среднего по формуле

$$\Delta = \frac{T_{\text{пред } i} - T_{\text{пред. сред}}}{T_{\text{пред. сред}}} 100 \%. \quad (4.2)$$

5. Оценить полученные расхождения.

5.1 Если расхождения между всеми значениями относительно среднего превышает 20 %, то необходимо заново провести оценку остаточного ресурса.

5.2 Если расхождения между всеми значениями относительно среднего отличаются от 10 до 20 %, то за окончательную величину принимаем минимальное из полученных значений.

5.3 Если расхождения между всеми значениями относительно среднего отличаются не более чем на 10 %, то за окончательную величину принимаем среднее значение, полученное по формуле (4.1).

*Вывод.* Разработанный алгоритм оценки результатов расчета остаточного ресурса строительных конструкций позволяет



снизить влияние субъективности при принятии решения о дополнительном сроке службы зданий и сооружений. Также применение совместно нескольких методов позволяет устранить те недостатки, которые имеются у каждого метода в отдельности. Благодаря этому удастся лучше оценить и надежность зданий и сооружений, которая связана с величиной остаточного ресурса. Также это позволяет лучше оценить техническое состояние объектов капитального строительства и организовать мониторинг строительных конструкций.

## **Глава 5. ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНЫХ СРОКОВ СЛУЖБЫ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

Экспертная система прогнозирования остаточных сроков службы строительных конструкций эксплуатируемых зданий и инженерных сооружений представляет собой статическую экспертную систему, предназначенную для решения задач прогнозирования аналитическими методами с использованием нечетко определенных знаний. В соответствии с имеющейся классификацией и терминологией экспертных систем, статическая экспертная система не учитывает внешних изменений, происходящих в процессе ее работы с объектом и окружающей средой. Решаемая экспертной системой задача прогнозирования подразумевает генерирование возможных ситуаций развития с использованием имеющихся входных (исходных) данных. Использование аналитических методов решения поставленных перед экспертной системой задач подразумевает выбор ею из множества альтернатив полученных решений. Под нечетко определенными знаниями для экспертных систем следует понимать их отсутствие, неточность или качественную оценку вместо количественной.

Логическая структура экспертной системы прогнозирования остаточных сроков службы строительных конструкций представлена

на рис. 5.1. В соответствии с ней работа экспертной системы выглядит следующим образом.

Оператор (пользователь) вводит в экспертную систему запрашиваемые исходные данные. При этом часть исходных данных, запрашиваемых экспертной системой, может быть пропущена (не введена). В этом случае экспертная система при построении прогноза будет использовать только те данные, которые ей представил пользователь, и проигнорирует пропущенные данные.

На втором этапе в «Блоке обработки исходных данных» экспертная система проводит анализ поступивших от пользователя исходных данных, группирует их и передает в «Блок выбора прогнозирующих методов и функций». Исходные данные о количестве строительных конструкции данного типа и их параметрах поступают в блок «Генератор случайных чисел».

«Блок выбора прогнозирующих методов и функций» при поступлении в него исходных данных устанавливает связь с «Базой прогнозирующих методов и функций», откуда в основную ветвь программы поступают необходимые вычислительные алгоритмы, требуемые для той или иной группы исходных данных [49, 50].

Структура «Базы прогнозирующих методов и функций» приведена на рис. 5.2.

В базу включены: экспертные методы и функции; параметрические методы и функции, разделенные на отдельные виды конструкций по материалам (деревянные, каменные и армокаменные, бетонные и железобетонные, стальные, полимерные); точные методы расчетов, также разделенные по видам конструкций. Под точными методами расчета прогнозов следует понимать расчеты по двум группам предельных состояний, предусмотренные системой действующих нормативно-технических документов в строительстве, выполняемые с учетом изменения ключевых параметров конструкций во времени [49, 50].

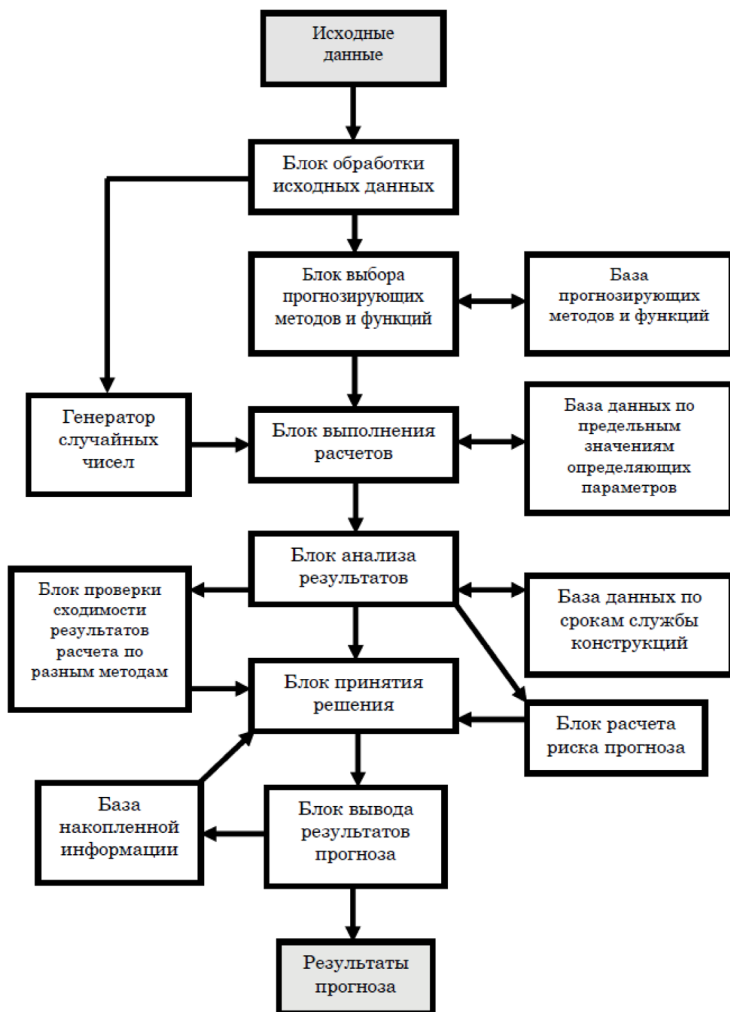


Рис. 5.1. Логическая схема увязки отдельных блоков и баз данных экспертной системы прогнозирования остаточного срока службы строительных конструкций зданий и инженерных сооружений [49, 50]

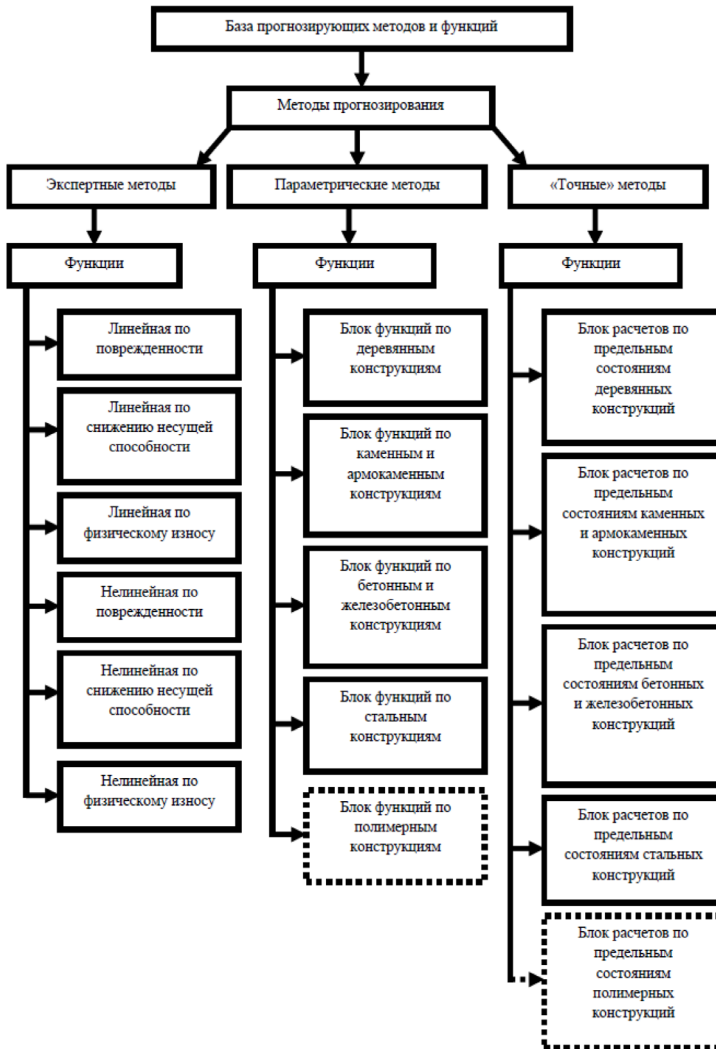


Рис. 5.2. Структурная схема базы прогнозирующих методов и функций [49, 50]

«Генератор случайных чисел» при поступлении в него сведений о количестве однотипных конструкций и границах распределения параметров производит генерацию случайных чисел для каждого параметра, включенного в расчет, в пределах заданных минимального и максимального значений параметра в количестве, соответствующем реальному количеству конструкций данного типа на объекте [49, 50].

Сгенерированные массивы чисел вместе с исходными данными и выбранными под них прогнозирующими методами и функциями поступают в «Блок выполнения расчетов». При выполнении расчетов выполняется связь «Блока выполнения расчетов» с «Базой данных по предельным значениям определяющих параметров», откуда поступают данные о граничных условиях для окончания соответствующих групп расчетов [49, 50].

После выполнения вычислений по каждой прогнозирующей функции каждого метода получается массив чисел, характеризующих полный срок службы рассматриваемой группы строительных конструкций, который может быть рассмотрен как распределение срока службы конструкций выбранного типа [49, 50].

Далее массивы чисел поступают в «Блок анализа результатов расчета». При выполнении анализа производится сравнение полученных результатов с данными по средним срокам службы конструкций выбранного типа [49, 50].

Результаты анализа поступают одновременно в три блока: «Блок проверки сходимости результатов расчета по разным методам», «Блок расчета риска прогноза» и «Блок принятия решения».

В «Блоке проверки сходимости результатов расчета по разным методам» производится проверка полученных по разным моделям и функциям массивов чисел на предмет сходимости и возможности объединения полученных массивов в единый массив, характеризующий общий срок службы рассмотренной

группы строительных конструкций. Для обеспечения большей достоверности прогноза предложено проверку сходимости выполнять с использованием трех независимых критериев [49, 50].

В «Блоке расчета риска прогноза» выполняется проверка риска ошибки выполненного прогноза по оценке срока службы группы однотипных конструкций с учетом всех результатов по всем методам и функциям прогноза. Результаты проверки сходимости различных методов прогноза и расчета риска ошибки прогноза поступают далее, в «Блок принятия решения», где на основании всех полученных данных происходит процесс принятия решения об ограничении прогнозируемого коридора значений срока службы рассматриваемого типа конструкций. Здесь же с учетом реального срока эксплуатации назначается нижняя граница остаточного срока службы группы исследуемых конструкций [49, 50].

Далее полученная информация поступает из «Блока принятия решений» в «Блок вывода результатов прогноза», где формируется готовый отчет по результатам прогнозирования и последующей обработки результатов с графиками по каждому методу и функции прогнозирования, а также пояснениями по наложенным ограничениям на полученные в ходе расчетов массивы чисел.

В «Блоке вывода результатов прогноза» пользователю представляется возможность выбора вывода результатов на экран, в файл или на печать. Кроме того, полученные результаты прогноза направляются в «Базу накопленной информации», которая в последующем используется для сравнения результатов расчета с ранее выполненными результатами по аналогичным видам конструкций [49, 50].

*Содержание «Базы прогнозирующих методов и функций».* Структурная схема «Базы прогнозирующих методов и функций» представлена на рис. 5.2. Как видно из рис. 5.2, для выполнения

прогноза в экспертной системе используются три группы методов: экспертные, параметрические и точные. В каждой группе методов идет разбивка на используемые функции. Прогнозирующие функции экспертных методов на рис. 5.2 для общего представления описаны достаточно подробно. Прогнозирующие функции параметрических и точных методов требуют дополнительного пояснения.

Поскольку параметрические методы основаны на наблюдении за изменениями отдельных параметров, было предложено выделить определяющие параметры, на основании которых в дальнейшем и должно выполняться прогнозирование. Далее приведены определяющие параметры для различных строительных конструкций, в зависимости от их материала.

Определяющие параметры для деревянных конструкций:

- уменьшение размеров поперечного сечения (в результате механических и химических воздействий);

- наличие и степень биологических повреждений;
- расхождение и расшатанность узлов конструкций;
- искривление элементов в случае потери устойчивости;
- наличие непроектных дополнительных промежуточных

опор;

- отклонение от вертикали (крены);
- несущая способность (по всем расчетным сечениям);
- прогибы.

Определяющие параметры для каменных и армокаменных конструкций:

- наличие, длина и ширина раскрытия трещин;
- смещение опор;
- уменьшение размеров поперечного сечения элемента;
- выпучивание из плоскости стены;
- величина действующей нагрузки;



- местные силовые разрушения (раздробление, смятие, скалывание и т. п.);

- прочность камня;

- прочность раствора;

- площадь поперечного сечения арматуры (для армированной кладки);

- отклонения от вертикали (крены);

- несущая способность (по всем расчетным сечениям).

Определяющие параметры для бетонных и железобетонных конструкций:

- смещение опор;

- уменьшение размеров поперечного сечения элемента;

- величина действующей нагрузки;

- местные силовые разрушения (раздробление, смятие, скалывание и т. п.);

- прочность бетона при сжатии;

- прочность арматуры на растяжение (при выявлении воздействий на арматуру температур 300 °С и более);

- площадь поперечного сечения арматуры;

- отклонения от вертикали (крены);

- прогибы;

- несущая способность (по всем расчетным сечениям);

- образование и ширина раскрытия трещин (нормальных и наклонных);

- сцепление арматуры с бетоном.

Определяющие параметры для стальных конструкций:

- длина и ширина раскрытия трещин в сварных швах;

- потеря устойчивости элементов (стрелка выгиба);

- глубина коррозионного повреждения;

- уменьшение размеров поперечного сечения элемента;

- величина действующей нагрузки;

- отклонения от вертикали (крены);
- несущая способность (по всем расчетным сечениям);
- прогибы.

Определяющие параметры для полимерных конструкций пока не определены, поскольку сами такие конструкции пока не получили широкого распространения в строительстве.

В зависимости от количества наблюдений (обследований) конструкций используются линейные или нелинейные модели прогнозирующих функций для каждого определяющего параметра.

При выполнении расчетов по точным методам прогнозирования вместо определяющих параметров подставляются их математические зависимости, полученные в ходе построения моделей прогноза параметрическими методами.

*Содержание «Базы данных по предельным значениям определяющих параметров».* Каждый прогнозирующий параметр, приведенный в «Базе прогнозирующих методов и функций» как для параметрических, так для точных и экспертных методов, должен иметь предельно допустимое значение. Для большей части параметров такие значения приведены в соответствующих строительных нормах и правилах (СНиПы, СП и др.). Для экспертных методов предельные значения параметров определены на основании анализа научной, методической и справочной литературы по расчету и обследованию строительных конструкций.

*Использование генератора случайных чисел.* Использование в структуре экспертной системы генератора случайных чисел позволяет провести имитацию недостающих значений определяющих параметров (метод Монте-Карло). При задании количества как бы воссоздаваемых результатов измерений возможна генерация любого количества пропущенных значений на заранее определенном интервале. Интервал значений любого параметра должен быть определен в ходе проведения обследования

строительных конструкций объекта. Возможно задание различных способов распределения генерируемых значений (нормальное, равномерно распределенное и т. д.).

*Содержание «Базы данных по срокам службы конструкций».* Введение в структуру экспертной системы блока «База данных по срокам службы конструкций» позволит экспертной системе минимизировать возможные отклонения, полученные в расчетах от средних значений сроков службы конструкций, предусмотренных нормами. В качестве средних значений сроков службы в базу внесены значения по нормам ВСН 58–88(р). Положение об организации и проведении реконструкции, ремонта и технического обслуживания зданий, объектов коммунального и культурно-бытового назначения. Нормы проектирования).

*Использование «Блока проверки сходимости результатов расчетов по разным методам».* Проверка сходимости результатов выполняется по трем независимым методикам оценки. Использование трех методик оценки сходимости независимых выборок позволяет свести к минимуму неточности и ошибки каждой из методик. При получении от двух методик подтверждения о сходимости сравниваемых выборок выборки объединяются. При получении от двух методик отрицания сходимости выборок они рассматриваются как независимые результаты. После проведения всех парных сравнений всех выборок принимается решение об объединении выборок или отбрасывании части выборок, как ошибочных (случайная ошибка).

*Применение «Блока расчета риска прогноза».* Введение в программу «Блока расчета прогноза» обосновано необходимостью повышения достоверности принимаемого результата и в качестве дополнительного обосновывающего фактора для принятия окончательного решения как в теле самой программы, так и с точки зрения пользователя. При оценке риска может

быть дополнительно учтена экономическая составляющая риска. При оценке риска предполагается использовать следующие методы: метод минимального риска, метод минимального числа ошибок, метод Неймана – Пирсона, метод наибольшего правдоподобия и (или) метод минимакса. Использование нескольких методов оценки риска также позволяет значительно снизить уровень случайных ошибок.

## Заключение

1. Разработанные методики (методика определения остаточного ресурса с применением нормального распределения (распределения Гаусса); определение остаточного ресурса по модифицированной методике с применением экспоненциального распределения; методика определения остаточного ресурса по хронологическому или фактическому сроку эксплуатации; методика определения остаточного ресурса с использованием уравнений регрессии) расчета остаточного ресурса являются универсальными и могут применяться к любым строительным конструкциям и при любых условиях эксплуатации.

2. Модифицированная методика с применением экспоненциального распределения и методика определения остаточного ресурса по хронологическому или фактическому сроку эксплуатации используют единый методический подход (последовательность) расчета остаточного ресурса, что позволяет проконтролировать порядок проведения расчета и уменьшить начальный объем исходных данных. Это существенно сокращает время расчета при совместном использовании данных методик.

3. Разработанные методики имеют один и тот же недостаток – субъективность при назначении некоторых исходных данных. Данный недостаток можно исправить (или хотя бы снизить его влияние) двумя способами:

- привлечением большого числа специалистов (не менее пяти) для выбора исходных данных. Данный подход позволя-

ет вычислить наиболее достоверное значение всех субъективно назначаемых исходных данных (среднее или, по-другому, математическое ожидание) и провести оценку полученных значений, т. е. вычислить дисперсию и среднеквадратическое отклонение. Недостатком такого подхода является высокая стоимость обследования. Поэтому данный подход рекомендуется при расчете остаточного ресурса уникальных или особо важных объектов капитального строительства;

- накоплением статистических данных по значениям субъективно назначаемых исходных величин в результате практического применения в процессе обследования. Это позволит определить для каждого типа конструкции и для определенных условий эксплуатации доверительные интервалы данных величин и составить справочники, которые значительно облегчат работу специалистов, проводящих расчет остаточного ресурса.

4. В разработанных методиках учитывают так называемые отказы по общим причинам, однако делается это пока чисто эмпирически. В связи с этим необходимо провести исследование отказов по общим причинам с целью их классификации по видам, выявления причин их возникновения и аналитического описания.

5. Разработанный алгоритм предполагает совместное использование сразу нескольких методов расчета остаточного ресурса. При дальнейших теоретических исследованиях на основе данного алгоритма и выработанного подхода автора возможно разработать единую методологию расчета остаточного ресурса строительных конструкций, где все существующие методы расчета будут использоваться совместно и будет прописан порядок оценки получившихся значений остаточного ресурса с использованием различных методов.

## Библиографический список

1. НП-024–2000. Требования к обоснованию возможности продления назначенного срока эксплуатации объектов использования атомной энергии.
2. *Корольков Д. И.* Обследование зданий и сооружений объектов использования атомной энергии при продлении срока их эксплуатации / Д. И. Корольков // Обследование зданий и сооружений: проблемы и пути их решения: материалы VIII междунар. науч.-практич. конф.; 13 октября 2017 г. – СПб.: СПбПГУ, 2017. – С. 98–108.
3. *Корольков Д. И.* Расчет остаточного ресурса строительных конструкций зданий и сооружений / Д. И. Корольков // Выпускная квалификационная работа магистра. – URL: <https://elib.spbstu.ru/dl/3/2019/vr/vr19-981.pdf/download/vr19-981.pdf>
4. МДС 13-14.2000. Положение о проведении планово-предупредительного ремонта производственных зданий и сооружений.
5. Рекомендации по оценке надежности строительных конструкций зданий и сооружений по внешним признакам. – М.: ЦНИИПромзданий, 2001.
6. ГОСТ 27751–2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения.
7. ВСН 53-86(р). Правила оценки физического износа жилых зданий.
8. *Гаврильев И. М.* Модифицированная методика расчета остаточного ресурса с использованием экспоненциального распределения / И. М. Гаврильев, Д. И. Корольков, М. В. Гравит // Вестник Евразийской науки. – URL: <https://esj.today/PDF/49SAVN219.pdf> (дата обращения: 01.03.2020).
9. *Корольков Д. И.* Выявление закономерности и описание зависимости величины остаточного ресурса от хронологического (фактического) возраста строительных конструкций / Д. И. Корольков, Д. Д. Корольков // Вестник Евразийской науки. – URL: <https://esj.today/PDF/17SAVN219.pdf> (дата обращения: 01.03.2020).

10. *Корольков Д. И.* Методика расчета остаточного ресурса строительных конструкций по их возрасту (фактическому или хронологическому) / Д. И. Корольков, Д. Д. Корольков // Вестник Евразийской науки. – URL: <https://esj.today/PDF/19SAVN319.pdf> (дата обращения: 01.03.2020).
11. РД 03-421–01. Методические указания по проведению диагностирования технического состояния и определения остаточного срока службы сосудов и аппаратов.
12. СТ ЦКБА 024–2006. Арматура трубопроводная. Определение остаточного ресурса и показателей надежности арматуры.
13. *Пермяков М. Б.* Расчет и оценка остаточного ресурса зданий / М. Б. Пермяков // Современные строительные технологии, конструкции и материалы: сб. науч. трудов; под ред. М. Б. Пермякова. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова, 2011. – С. 17–22.
14. *Суцев С. П.* Остаточный ресурс конструкций здания (сооружения) и возможные методы его оценки / С. П. Суцев, И. А. Адаменко, Н. А. Самолинов // Предотвращение аварий зданий и сооружений. – URL: <http://www.raamag.ru/prensa/ostatokkresurs> (дата обращения: 01.03.2020).
15. *Беляев С. М.* Расчет остаточного ресурса зданий с учетом запаса несущей способности конструкций / С. М. Беляев // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. – 2013. – № 3 (11). – С. 22–25.
16. СТО 1.1.1.02.009.1548–2018. Обоснование срока службы строительных конструкций зданий и сооружений атомных станций (взамен РД ЭО 0462–03. Методика по обоснованию срока службы строительных конструкций, зданий и сооружений атомных станций).
17. ГОСТ 31937–2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния.
18. РД ЭО 0447–03. Методика оценки состояния и остаточного ресурса железобетонных конструкций АЭС, важных для безопасности.
19. *Псюк В. В.* Оценка технического состояния и расчет остаточного ресурса строительных конструкций / В. В. Псюк, А. И. Голоднов, И. А. Никишина, М. Ю. Псюк // Сб. науч. трудов Донбасского государственного технического университета. – 2015. – № 45. – С. 67–73.
20. *Ганиев И. Г.* Расчет безопасного времени работы пролетных строений по величине накопленного износа / И. Г. Ганиев // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. – 2008. – № 21. – С. 105–106.



21. Шматков С. Б. Расчет остаточного ресурса строительных конструкций зданий и сооружений / С. Б. Шматков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. – 2007. – № 22 (94). – С. 56–57.

22. Шмелев Г. Д. Экспертный метод прогнозирования остаточного срока службы строительных конструкций по их физическому износу / Г. Д. Шмелев // Строительство и реконструкция. – 2014. – № 3. – С. 31–39.

23. Горшков А. С. Модель физического износа строительных конструкций / А. С. Горшков // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2014. – № 12 (191). – С. 34–37.

24. Соколов В. А. Оценка технического состояния и физического износа строительных конструкций с использованием вероятностных методов технической диагностики / В. А. Соколов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2014. – № 1 (661). – С. 94–100.

25. Белых А. В. Методика определения величины физического износа нежилых зданий для целей массовой оценки / А. В. Белых // Журнал правовых и экономических исследований. – 2013. – № 2. – С. 78–86.

26. Хайруллин В. А. Учет величины физического износа объекта технической эксплуатации при оценке действительной стоимости здания / В. А. Хайруллин, А. С. Салов, Л. А. Яковлева, В. В. Валишина // Наукovedenie. – URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/219TVN515.pdf> (дата обращения: 01.03.2020).

27. Мищенко В. Я. Прогнозирование темпов износа жилого фонда на основе мониторинга дефектов строительных конструкций / В. Я. Мищенко, П. А. Головинский, Д. А. Драпалюк // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2009. – № 4 (16). – С. 111–117.

28. Алексеева Е. Л. Изучение закономерностей физического износа несущих конструкций зданий энергетической и химической отраслей / Е. Л. Алексеева, А. Ю. Хлёткин // Наука и безопасность. – 2014. – № 4 (13). – С. 43–47.

29. Васильев А. А. Анализ существующей оценки физического износа конструкций зданий и сооружений / А. А. Васильев // Сб. статей VIII Междунар. науч.-практич. конф. OPEN INNOVATION. – Пенза, 2019. – С. 36–38.

30. Корольков Д. И. Применение двухпараметрических распределений для оценки остаточного ресурса строительных конструкций /

Д. И. Корольков, Д. Д. Корольков, С. Е. Орехов // Материалы междунар. науч.-практич. конф. молодых ученых и обучающихся «Роль молодых ученых и исследователей в решении актуальных задач АПК», СПбГАУ; СПб., 2019. – С. 288–291.

31. *Корольков Д. И.* Расчет остаточного ресурса вероятностным методом инженерных систем зданий и сооружений при техническом обследовании / Д. И. Корольков // Обследование зданий и сооружений: проблемы и пути их решения: материалы IX науч.-практич. конф.; 11–12 октября 2018 г. – СПб.: Изд-во СПбПГУ, 2018. – С. 114–120.

32. *Тарарушкин Е. В.* Применение нечеткой логики для оценки физического износа несущих конструкций зданий / Е. В. Тарарушкин // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2016. – № 10. – С. 77–82.

33. *Гордеева О. Г.* Расчетно-экспериментальные методы экспресс-оценки физического износа и остаточного ресурса зданий и сооружений: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.02, 05.23.01 / О. Г. Гордеева. – Новогорск, 2002.

34. *Акопьян В. А.* Некоторые подходы к оценке остаточного ресурса строительных ферменных конструкций / В. А. Акопьян, А. Н. Кабельков, А. В. Черпаков // Известия высших учебных заведений. – Серия: Технические науки. – 2009. – № 5 (153). – С. 89–94.

35. *Хлыстунов М. С.* Метод и алгоритм оценки снижения остаточного ресурса надежности элементов строительных конструкций зданий и сооружений / М. С. Хлыстунов, Ж. Г. Могилюк // Вестник МГСУ. – 2011. – № 2–2. – С. 196.

36. *Шмелев Г. Д.* Прогнозирование надежности и остаточного ресурса строительных конструкций с использованием метода линеаризации в условиях ограниченной статической информации / Г. Д. Шмелев, Н. В. Головина // Сб. науч. трудов SWorld. – 2012. – Т. 6. – № 4. – С. 100–107.

37. *Шмелев Г. Д.* Метод интервального экспертного прогнозирования остаточного ресурса строительных конструкций с экстраполяцией контролируемых параметров поврежденности, физического износа и снижения несущей способности / Г. Д. Шмелев, Н. В. Головина // Сб. науч. трудов SWorld. – 2013. – Т. 8. – № 4. – С. 89–94.

38. *Козлов В. А.* Обоснование интервального метода прогнозирования и оценки остаточного ресурса строительных конструкций зданий и инженерных сооружений / В. А. Козлов, Г. Д. Шмелев // Научный вестник

Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2013. – № 4 (32). – С. 11–18.

39. *Савицкий А. Н.* Использование метода пробной нагрузки для оценки остаточного ресурса строительных конструкций / А. Н. Савицкий // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2013. – № 1–2. – С. 50–54.

40. *Мамин А. М.* Методология оценки остаточного ресурса строительных конструкций / А. М. Мамин, А. Ю. Тринкинец, Л. В. Муравьева // Синергия Наук. – 2016. – № 6. – С. 477–489.

41. *Соколов В. А.* Остаточный ресурс строительных конструкций эксплуатируемых зданий / В. А. Соколов // Сб. статей «Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники»; III Всероссийская науч.-практич. конф.; СПб, 2016. – С. 431–435.

42. *Соколов В. А.* О прогнозировании остаточного ресурса строительных конструкций / В. А. Соколов // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б. Е. Веденеева. – 2017. – Т. 284. – С. 19–23.

43. *Шмелев Г. Д.* Случайные функции и интервальный метод прогнозирования остаточного ресурса строительных конструкций / Г. Д. Шмелев, М. И. Федотова, Н. В. Головина // Вестник МГСУ. – 2017. – Т. 12. – № 11 (110). – С. 1261–1268.

44. *Гайнанов Д. Г.* Определение остаточного ресурса зданий и сооружений из металлических конструкций / Д. Г. Гайнанов, А. Г. Сизов, Ю. Н. Филиппов // Экспертиза промышленной безопасности и диагностика опасных производственных объектов. – 2015. – № 4. – С. 54–56.

45. *Картопольцев В. М.* Оценка остаточного ресурса конструкций металлических мостов по критерию трещиностойкости / В. М. Картопольцев, А. Г. Боровиков, А. В. Картопольцев // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2015. – № 2 (49). – С. 176–183.

46. *Шмелев Г. Д.* Систематизация определяющих параметров для прогноза остаточного срока службы строительных конструкций / Г. Д. Шмелев // Вестник МГСУ. – 2013. – № 8. – С. 89–96.

47. *Шмелев Г. Д.* Параметрические методы прогнозирования остаточных сроков службы железобетонных строительных конструкций / Г. Д. Шмелев, И. В. Николайчев // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. – Серия:

Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения. – 2013. – № 7. – С. 167–175.

48. Шмелев Г. Д. Использование случайных функций и процессов в комбинированной интегральной методике прогнозирования остаточных сроков службы строительных конструкций / Г. Д. Шмелев, М. И. Федотова // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2017. – № 1 (39). – С. 128–137.

49. Шмелев Г. Д. Логическая структура экспертной системы прогнозирования остаточных сроков службы строительных конструкций / Г. Д. Шмелев // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. – 2017. – № 1–2. – С. 9–17.

50. Шмелев Г. Д. Экспертная система прогнозирования остаточных сроков службы строительных конструкций зданий и инженерных сооружений / Г. Д. Шмелев // Сб. статей «Механика разрушения бетона, железобетона и других строительных материалов»; материалы 7-й междунар. науч. конф.: в 2 т. – Воронеж, 2013. – С. 206–214.

51. Ганиев И. Г. Расчет безопасного времени работы пролетных строений по величине накопленного износа / И. Г. Ганиев // Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта им. академика В. Лазаряна. – 2008. – № 21. – С. 105–106.

52. Шмелев Г. Д. Прогнозирование остаточного ресурса изгибаемых железобетонных конструкций, эксплуатируемых в неагрессивных средах: монография / Г. Д. Шмелев, А. Н. Ишков. – Ростов н/Д.: РГСУ, 2007.

53. Дегтярь А. Н. Остаточный ресурс конструкций зданий и сооружений / А. Н. Дегтярь, И. Р. Серых, Л. А. Панченко, Е. В. Чернышева // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2017. – № 10. – С. 94–97.

54. 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.

55. Манапов А. З. Расчет остаточного ресурса стальной конструкции с использованием регрессионных математических моделей / А. З. Манапов, И. Ю. Майстренко // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2006. – № 2 (6). – С. 52–58.

56. Лазовский Д. Н. Оценка параметров теоретических распределений случайных величин в расчете надежности строительных конструкций /

Д. Н. Лазовский, Д. О. Глухов // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F: Строительство. Прикладные науки. – 2008. – № 6. – С. 2–12.

57. РД 26.260.004–91. Методические указания. Прогнозирование остаточного ресурса оборудования по изменению параметров его технического состояния при эксплуатации.

58. *Ерофеев В. Т.* Оценка изменения прочности древесины в условиях повышенной влажности / В. Т. Ерофеев, О. В. Старцев, В. Д. Антошкин [и др.] // Фундаментальные исследования. – № 9 (Ч. 12) – С. 2630–2638.

59. *Корольков Д. И.* Расчет остаточного ресурса железобетонных конструкций по длительной прочности бетона / Д. И. Корольков, С. Е. Орехов // Материалы междунар. науч.-практич. конф. молодых ученых и обучающихся «Роль молодых ученых и исследователей в решении актуальных задач АПК» / СПбГАУ. – СПб., 2019. – С. 280–283.

60. *Корольков Д. И.* Определение скорости коррозии металлических строительных конструкций / Д. И. Корольков, А. А. Джуматаева, С. Е. Орехов // Материалы междунар. науч.-практич. конф. молодых ученых и обучающихся «Роль молодых ученых и исследователей в решении актуальных задач АПК» / СПбГАУ. – СПб., 2019. – С. 285–288.

61. *Белянкин Ф. П.* Деформативность и сопротивляемость древесины / Ф. П. Белянкин, В. Ф. Яценко. – Киев: Изд-во АН УССР, 1957. – 86 с.

62. *Леонтьев Н. Л.* Длительное сопротивление древесины / Н. Л. Леонтьев. – М.; Л.: Гослесбумиздат, 1957. – 132 с.

63. *Журков С. Н.* Проблема прочности твердых тел / С. Н. Журков // Вестник АН СССР. – 1957. – Вып. 11. – С. 78–82.

64. *Loebjinski W.* Rug and H. Pasternak Approaches for an optimization of partial safety factors for historic timber structures / W. Loebjinski // Сб. статей «Безопасность, надежность, риск, долговечность и сохранность конструкций и инфраструктур»; 12-я Междунар. конф. по безопасности и надежности конструкций; Vienna, Austria, Aug. 6–10, 2017. – PP. 683–692.

65. *Иванов Ю. М.* Длительная прочность древесины / Ю. М. Иванов // Лесной журнал. – 1972. – № 4. – С. 76–82.

66. ГОСТ 27.002–2015. Надежность в технике. Термины и определения.

67. СТО 22-05–04. Руководство по определению индивидуального ресурса стальных подкрановых балок с усталостными трещинами в стенках для допущения их временной эксплуатации. – Ч. 1. Основные положения.

*Библиографический список*

---

68. РБ 027–04. Состав и содержание отчета по результатам комплексного обследования блока атомной станции для продления срока его эксплуатации.

69. РБ 029–04. Состав и содержание материалов по обоснованию остаточного ресурса элементов блока атомной станции для продления срока его эксплуатации.

# Оглавление

Введение .....	3
<b>Глава 1. Вероятностные методы расчета остаточного ресурса .....</b>	<b>6</b>
1.1. Оценка остаточного ресурса с применением нормального распределения (распределения Гаусса).....	6
1.2. Оценка остаточного ресурса с применением экспоненциального распределения.....	17
1.3. Оценка остаточного ресурса по модифицированной методике с применением экспоненциального распределения.....	20
1.4. Оценка остаточного ресурса по хронологическому или фактическому сроку эксплуатации .....	29
1.5. Метод оценки остаточного ресурса в зависимости от накопленного износа .....	39
1.6. Экспертный метод прогнозирования остаточного ресурса по нелинейной модели развития физического износа .....	41
1.7. Применение двухпараметрических распределений для оценки остаточного ресурса строительных конструкций .....	43
<b>Глава 2. Вероятностно-инструментальные методы расчета остаточного ресурса .....</b>	<b>54</b>
2.1. Оценка остаточного ресурса по модифицированному методу с применением экспоненциального распределения.....	54
2.2. Вероятностный расчет гамма-процентного остаточного ресурса металлических строительных конструкций .....	57
2.3. Определение остаточного ресурса металлических конструкций по числу циклов нагружения .....	65
2.4. Оценка остаточного ресурса по критерию коррозионной стойкости .....	68
2.5. Оценка остаточного ресурса металлических конструкций с использованием уравнений регрессии для определения скорости коррозии.....	74

2.6. Оценка остаточного ресурса с использованием уравнений регрессии. . . . .	77
2.7. Метод оценки остаточного ресурса по коэффициенту запаса. . . . .	95
2.8. Интервальный метод оценки остаточного ресурса . . . . .	97
<b>Глава 3. Инструментальные методы расчета остаточного ресурса . . . . .</b>	<b>101</b>
3.1. Оценка остаточного ресурса по прочности строительных конструкций . . . . .	101
3.2. Оценка остаточного ресурса железобетонных конструкций при температурно-влажностном воздействии. . . . .	103
3.3. Оценка остаточного ресурса железобетонных конструкций по длительной прочности бетона . . . . .	107
3.4. Оценка остаточного ресурса по циклической нагрузке . . . . .	112
3.5. Оценка остаточного ресурса металлических конструкций по скорости коррозии . . . . .	113
3.6. Метод оценки остаточного ресурса по несущей способности . . . . .	117
3.7. Метод определения остаточного ресурса по кинетике процесса карбонизации бетона . . . . .	119
3.8. Оценка остаточного срока службы из условия появления предельно допустимых деформаций в результате изменений физико-механических характеристик бетона . . . . .	126
3.9. Оценка остаточного срока службы из условия совместности работы бетона и корродирующей арматуры . . . . .	129
3.10. Оценка остаточного ресурса с применением кинетической теории прочности твердых тел . . . . .	136
3.11. Оценка остаточного ресурса деревянных конструкций. . . . .	139
<b>Глава 4. Анализ полученных значений. Назначение окончательной величины остаточного ресурса . . . . .</b>	<b>140</b>
<b>Глава 5. Экспертная система прогнозирования остаточных сроков службы строительных конструкций . . . . .</b>	<b>145</b>
Заключение . . . . .	156
Библиографический список . . . . .	158



Научное издание

**Корольков** Дмитрий Игоревич

**ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА  
СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

Монография

Редактор и корректор *Т. В. Середова*  
Компьютерная верстка *В. С. Весниной*

Подписано к печати 28.12.2020. Формат 60×84  $\frac{1}{16}$ . Бумага офсетная.  
Усл. печ. л. 10,0. Тираж 500 экз. Заказ 164. «С» 117.  
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.  
190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.  
Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А.