

ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС

УДК 624.012.45.004.6

А. А. ВАСИЛЬЕВ, кандидат технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

Представлен метод расчета остаточного ресурса несущих конструкций на основании базового подхода, сформированного на принципе безопасной эксплуатации конструкций по техническому состоянию. Приведена методика расчета остаточного ресурса несущих конструкций, предложены значения постоянных износа для железобетонных элементов, эксплуатирующихся в различных атмосферных средах.

Введение. Оценка остаточного ресурса (ОР) зданий и сооружений (их отдельных элементов) в настоящее время в Республике Беларусь является одной из самых актуальных задач. Ее острота усиливается тем, что на сегодняшний день в стране значительная часть зданий и сооружений эксплуатируется длительные сроки (зачастую превышающие нормативные), с пропущенными либо выполненными некачественно и не в полном объеме, капитальными ремонтами [1].

Основными подходами к оценке ОР являются вероятностный и детерминированный [2].

Детерминированная модель оценки ОР на данный момент имеет наибольшее распространение. Это объясняется её относительно небольшой трудоемкостью при удовлетворительном качестве.

Принципы методов на основе детерминированных расчетов:

- к данным методам относятся методы исследования, в которых зависимость между рассматриваемыми признаками строго задана или детерминирована, поэтому исследование приводит к однозначным выводам;

- имеется достоверная информация о техническом состоянии конструкции;

- многочлен слишком низкой степени даёт грубое описание эмпирического материала, а многочлен высокой степени не будет сглаживать шумы эксперимента;

- выбор оптимальной степени многочлена основывается на допущении, что искомая функциональная зависимость с достаточным приближением может быть представлена многочленом некоторой степени n и что измеренные значения содержат только случайные ошибки;

- при накоплении достаточного экспериментального материала более перспективно в смысле достижения объективной оценки величины остаточного ресурса использование случайных функций.

При использовании данного подхода ОР рассчитывается по следующим признакам:

- изменению параметров несущей способности конструкции;

- изменению параметров технического состояния;

- степени физического износа;

- нормативам сроков эксплуатации до капитального ремонта;

- определению коэффициента запаса по видам предельных состояний.

Основная часть. В качестве базового при оценке ОР несущих конструкций принят подход, основанный на принципе безопасной эксплуатации по техническому состоянию (ТС). В соответствии с ним оценку ТС конструкций осуществляют по параметрам, обеспечиваю-

щим их надежную и безопасную эксплуатацию в соответствии с действующей НД, а ОР – по определяющим параметрам ТС [2].

В общем случае для оценки ОР в качестве определяющих параметров ТС приняты такие, изменение которых (в отдельности или в совокупности) может привести конструкцию в неработоспособное или предельное состояние.

Параметрами ТС конструкций, в зависимости от выбранных критериев предельного состояния и условий эксплуатации, служат:

- характеристики материалов (механические, химический состав, характеристики микроструктуры и т. д.);

- несущая способность (с учетом граничных условий, нагрузок и возможных типов разрушений);

- характеристики нагрузок и воздействий (температура, давление, динамика и т. д.).

В качестве основного параметра технического состояния конструкций для оценки их остаточного ресурса, как правило, принимают несущую способность, которую определяют в зависимости от вида их материала согласно требованиям действующей НД.

Оценку параметров ТС и выбор определяющих параметров осуществляют по результатам анализа технической документации, экспертного обследования, данных мониторинга (при наличии).

Прогнозирование ОР в общем случае осуществляется согласно закономерностям изменения определяющих параметров, полученным при анализе механизмов развития повреждений и (или) по результатам измерения функциональных показателей. На основании полученных оценок принимается решение о дальнейшей эксплуатации конструкций.

Расчетный подход к оценке остаточного ресурса.

При эксплуатации несущей конструкции рассматривают три этапа: первый – период приработки конструкции; второй – время работоспособной работы конструкции; третий – достижение предельного срока службы конструкции (рисунок 1).

На первом этапе возведенная конструкция эксплуатируется некоторое время без снижения надежности (период приработки). За этот период протекают основные длительные деформации конструкций (например, ползучесть), возрастает прочность бетона, нормально функционируют системы водоотведения и гидроизоляция и т. п. На данном этапе вероятность безотказной работы конструкции сохраняется на высоком уровне: $P(t) = 0,9986$. В течение данного временного промежутка осуществляются мероприятия по содержанию конструкций, проводимые в соответствии с [2].

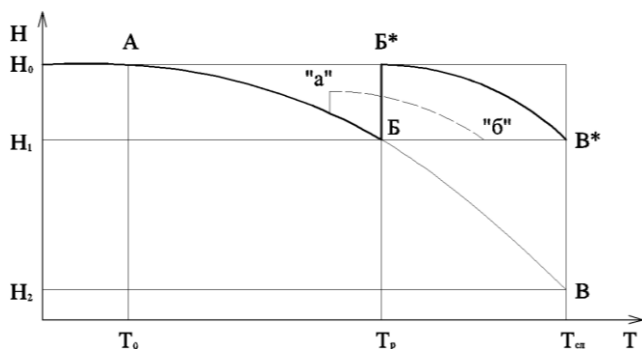


Рисунок 1 – График снижения надежности (Н) конструкции:
 T_0 – период приработки; T_p – работоспособность;
 $T_{сл}$ – предельный срок службы

Продолжительность этого периода зависит от качества изготовления и монтажа конструкций (см. рисунок 1, точка А). Второй этап эксплуатации характеризуется появлением и развитием дефектов, изменением свойств материалов конструкций, возможностью появления и развития коррозионных процессов различной степени интенсивности. Появляются отказы в элементах с меньшим расчетным сроком службы (покрытия, деформационные швы, изоляция и т. п.). Дефекты и отказы влияют на несущую способность конструкций. Конструкции продолжают эксплуатироваться в прежнем режиме (без ограничений), хотя их надежность постепенно снижается (см. рисунок 1, линия А–Б). Продолжительность второго этапа определяется временем, за которое вероятность безотказной работы конструкций снижается с 0,9986 до 0,9000. В этот период за ними ведется уход и проводятся плановые профилактические работы, а также локальный ремонт в рамках работ по содержанию. Продление этапа возможно при проведении ППР (см. рисунок 1, линия «а»–«б»).

Снижение вероятности безотказной работы конструкций в течение второго этапа (см. рисунок 1, точка Б) означает, что дальнейшая эксплуатация конструкций по первоначальной схеме невозможна и они подлежат ремонту. В случае если выполнение ремонта задерживается или перенесено на более поздний срок, то допускается дальнейшая временная эксплуатация конструкций (до проведения ремонта) при обязательном изменении условий ее нагружения (т. е. при введении ограничений по временной нагрузке).

Третий этап эксплуатации конструкций характеризуется двумя факторами: наличием дефектов, снижающих их несущую способность, введением ограничений по нагрузкам и воздействиям на конструкции, и периодическим последующим снижением их величин с целью обеспечения требуемой надежности.

Продолжительность третьего этапа (см. рисунок 1, участок Б–В) определяется временем, необходимым для достижения конструкциями такого состояния, когда, при максимально возможных ограничениях по временной нагрузке, вероятность их безотказной работы снова достигает $P = 0,9$. На третьем этапе эксплуатации конструкций обязательно должен быть выполнен их ремонт, не дожидаясь наступления момента В (см. рисунок 1), или предпринята серия ремонтных мероприятий (определяется экономическими расчетами), включая планово-предупредительные работы, цель которых переместить момент времени ремонта конструкций в том числе за счет изменения темпов деградации материалов.

Уровни надежности в общем случае определяются основными принципами подхода к расчету по оценке остаточного ресурса несущих конструкций. В данной методике рассматриваются два основных уровня надежности – N_1 и N_2 (рисунок 1). Уровень N_1 характеризуется достаточным значением вероятности безотказной работы конструкций ($P = 0,9$) в условиях действия проектных нагрузок. Этому уровню соответствует временной отрезок T_p , называемый работоспособным периодом (условно – работоспособностью) и определяемый для проектируемых, строящихся или недавно построенных сооружений. При достижении уровня N_1 снижается несущая способность конструкций или выполняется их ремонт. Уровень N_2 характеризуется пониженным значением вероятности безотказной работы в условиях действия проектных нагрузок. Этому уровню соответствует предельный износ конструкций, а их дальнейшая эксплуатация недопустима даже при пониженной эксплуатационной нагрузке. Первое снижение допустимой нагрузки происходит в возрасте конструкций до T_p .

Последующие снижения нагрузки возможны на участке Б–В (Б*–В*) (см. рисунок 1), что может продлить период эксплуатации до достижения уровня N_2 .

Критерием невозможности эксплуатации несущих конструкций преимущественно принимают истощение ими несущей способности.

Уровни надежности N_1 и N_2 также могут быть характеризованы соответствующей величиной индекса надежности β , являющейся аргументом функции (Φ) вероятности наступления отказа. Величины индекса надежности β принимают в общем случае с учетом уровня ответственности здания или сооружения, в котором находятся рассматриваемые конструкции, расчетной ситуации и других факторов. Допускается назначать индексы надежности β согласно таблице 1.

Таблица 1 – Рекомендуемые минимальные значения индекса надежности β для предельных состояний по несущей способности

Класс сложности здания (сооружения)	Минимальные значения β при базовом периоде	
	1 год	50 лет
К 3–5	5,2	4,3
К-2	4,7	3,8
К-1	4,2	3,3

Остаточный ресурс эксплуатируемых конструкций определяется периодом эксплуатации до достижения предельного износа. Момент наступления предельного износа определяют обычно на основании графика снижения несущей способности, построенного по результатам перерасчета.

При перерасчете конструкций учитывают:

- деградацию материалов конструкций;
- прогнозируемые изменения характеристик материалов конструкции на момент t_i (прогноз изменения прочности на сжатие, растяжение, сдвиг и т. п., изменения площади поперечного сечения, включая коррозионные процессы);
- изменение граничных условий и жесткости конструкций;
- иные факторы, которые могут оказать влияние на величину ОР конструкций.

Деградация свойств материалов конструкций вызывается неблагоприятной комбинацией воздействий статиче-

ски и динамически действующих внешних сил и внутренних самоуравновешивающихся полей напряжений. Она зависит главным образом от комбинации силовых полей в конструкциях. С учетом этого принятая в действующих НД методика оценки надежности в форме сопоставления комбинации суммарных напряжений с предельными значениями прочности, изменяющейся во времени, может быть использована и в оценке ОР конструкций. При этом учитывают, что величины напряжений, как и надежность, изменяются во времени вследствие деструктивных процессов в материалах конструкций, изменений деформативных свойств и др.

При оценке ОР рассматривают различные возможные модели отказов (износа). Отказы возникают в различных комбинациях и сочетаниях. Вероятность их реализации в разных конструкциях различна. Основная часть предсказуемых износов относится к категориям медленно протекающих, постепенных отказов. Они могут быть своевременно обнаружены и приостановлены или устранены в результате ремонта.

Методика оценки остаточного ресурса несущих конструкций. Основными этапами определения ОР несущих конструкций являются:

- анализ исходной технической документации;
- оценка ТС;
- анализ результатов оценки ТС (включая установление критериев предельных состояний и выбор определяющих параметров ТС);
- определение ОР.

В рамках анализа исходной технической документации устанавливают номенклатуру технических параметров конструкций, устанавливают предельные состояния, выявляют наиболее вероятные отказы и повреждения, которые могут привести к их отказу. Особое внимание должно быть уделено анализу критериев, причин, последствий и критичности отказов, выявлению возможных постепенных, деградационных и зависимых отказов, подтверждению отсутствия возможности внезапных отказов.

Аналізу подлежат: нормативно-техническая, конструкторская (проектная) и эксплуатационная, в том числе монтажная и ремонтная, документация. Кроме того, следует проанализировать базу данных по техническим параметрам конструкции или составленные ранее аналогичные технические заключения по результатам анализа технического состояния конструкции или его мониторинга при их наличии. Также в процессе анализа может быть рассмотрена иная научно-техническая информация по отказам и повреждениям по аналогичным конструкциям.

По результатам анализа исходной технической документации составляют:

- перечень проанализированной документации;
- схему конструкции с указанием элементов и участков, которые в результате особенностей их конструкторской или технологической реализации и (или) условий функционирования и нагруженности представляются наиболее предрасположенными к появлению повреждений и (или) отказам (в особенности скрытым, зависимым и внезапным);
- перечень технических параметров конструкции;
- программу оценки ТС конструкции.

В качестве исходных данных для приближенной оценки ОР несущих конструкций используют результаты визуального осмотра, выполняемого согласно [3, 4].

В общем случае оценку ТС конструкций выполняют согласно [3]. В рамках оценки ТС конструкций получают информацию о реальном ТС конструкций, наличии в них повреждений, выявлении причин и механизмов их возникновения и развития.

Оценку ТС выполняют в соответствии с программой, разработанной на основании анализа технической документации. Программой, как правило, предусматривают:

- визуальный контроль;
- измерения геометрических параметров, включая толщинометрию;
- замеры твердости и определение механических характеристик материалов, металлографические исследования, определение химического состава металла, дефектоскопический контроль, вид и объем которого устанавливается с учетом требований полноты и достаточности выявления дефектов и повреждений рассматриваемой конструкции;
- испытания на прочность (с испытанием контрольных образцов, с применением неразрушающих методов, методов тензочувствительных покрытий, тензометрии, акустической эмиссии, термографии и др.).

Анализ результатов оценки ТС конструкций должен включать:

- оценку фактической нагруженности конструкций, выполненную расчетным методом по действующим НД с учетом всех режимов нагружения и действующих нагрузок (включая температурные воздействия), фактической геометрии конструкций, фактических толщин несущих элементов, имеющихся и выявленных концентраторов напряжений и экспериментальных результатов исследований НДС, полученных при их обследовании;
- установление механизмов образования и роста обнаруженных дефектов и повреждений, возможных отказов (постепенных, деградационных, внезапных, включая их категории, последствия и критичность) вследствие развития дефектов и повреждений, при этом особое внимание должно быть уделено подтверждению отсутствия возможности внезапных отказов, при которых нельзя прогнозировать остаточный ресурс;
- оценку параметров ТС объекта, их соответствие требованиям действующих НД и конструкторской документации;
- установление при необходимости уточненной по сравнению с указанной в действующей НД системы предельных состояний и их критериев (например, уровень прогрессирующего формоизменения, возникновение предельно допустимых трещин, уровень течи перед разрушением и т. д.);
- заключение о необходимости дальнейших уточненных расчетов и экспериментальных исследований НДС конструкций и характеристик материалов;
- заключение о возможности дальнейшей эксплуатации конструкций с установлением назначенного ресурса (до проведения уточненных расчетов и экспериментальных исследований НДС, характеристик материалов и оценки остаточного ресурса) в случае отсутствия повреждений, влияющих на параметры ТС объекта.

Результаты анализа оценки ТС оформляют в виде технического заключения с решением о продолжении дальнейших исследований НДС конструкций и характеристик материалов или возможности дальнейшей эксплуатации с указанием назначенного ресурса. Также в рамках анализа результатов оценки ТС конструкций могут быть выполнены уточненные расчеты и исследования НДС и характеристик материалов.

В рамках выполнения уточненных расчетов и экспериментальных исследований НДС конструкций и характеристик материалов получают дополнительную (а также отсутствующую в технической документации) информацию о номинальных и местных напряжениях и деформациях с учетом фактических свойств материалов, необходимую для установления механизмов повреждений и (или) расчетов остаточного ресурса.

Уточненные расчеты проводят с учетом всех режимов и действующих нагрузок за период эксплуатации (включая температурные воздействия и взаимодействие с внешней средой), а также возможным изменением характеристик материалов.

Результаты расчетов НДС конструкций, выполненные по действующим нормативным документам, не регламентированным непосредственно для обследуемой конструкции, должны быть проверены экспериментальными методами (тензометрии, тензочувствительных покрытий, термометрии, акустической эмиссии и т. д.), которые в отдельных случаях (например, при отсутствии достаточно точных или апробированных на практике методов для сложных расчетов) могут использоваться самостоятельно. При этом могут применяться (при достаточном теоретическом и экспериментальном обосновании) методы моделирования и ускоренные методы испытания.

Определение уточненных характеристик материалов должно проводиться с учетом необходимой точности и объемов контроля неразрушающими методами или на образцах, вырезанных из конструкций в соответствии с программами исследований, составленными с учетом обнаруженных повреждений и условий эксплуатации конструкции. Перечень характеристик материала должен быть расширен и включать кроме стандартных прочностных свойств в зависимости от условий эксплуатации характеристики малоциклового и многоциклового усталости, длительной прочности, трещиностойкости, сопротивления коррозии и коррозионному растрескиванию и др.

Испытания образцов и определение характеристик материалов должны осуществляться в соответствии с действующими НД.

По результатам уточненных расчетов и исследования НДС конструкций и характеристик материалов должны быть уточнены механизмы повреждений, параметры технического состояния, установлены определяющие параметры технического состояния и критерии предельных состояний.

Категории технического состояния (КТС) в общем случае принимают согласно [3]. КТС и соответствующие относительные надежности конструкции приведены в таблице 2 [5].

ОР конструкции необходимо устанавливать на основе совокупности имеющейся информации прогнозированием

его технического состояния по определяющим параметрам до достижения предельного состояния.

Таблица 2 – Соотношение категорий технического состояния и средней относительной надежности

Категория технического состояния (СН 1.04.01-2020)	Средняя относительная надежность u_{cp}
I – Исправное (хорошее) техническое состояние	1,00
II – Работоспособное (удовлетворительное) техническое состояние	0,95
III – Ограниченно работоспособное (не вполне удовлетворительное) техническое состояние	0,85
IV – Неработоспособное (неудовлетворительное) техническое состояние	0,75
V – Предельное (предаварийное) техническое состояние	0,65

На первой стадии прогнозирования ОР должно быть установлено, что в результате проведенных обследований и анализов ТС выполнены одновременно следующие условия:

- известны параметры ТС объекта, в частности, определяющие параметры ТС, изменяющиеся соответственно выявленному механизму повреждения элементов объекта;
- установлены критерии предельных состояний объекта, достижение которых возможно при развитии выявленных повреждений.

Прогнозирование ОР может быть выполнено упрощенными или точными методами. Выбор способа прогнозирования ОР зависит от периодичности контроля за конструкциями.

При непрерывном (или дискретном) контроле за параметрами ТС могут допускаться упрощенные методы, при которых прогнозирование осуществляют по одному параметру ТС.

Упрощенные методы прогнозирования могут использоваться, например, при прогнозировании ОР:

- конструкций, работающих в условиях статического нагружения и коррозионной среды, несущая способность которых снижается вследствие уменьшения площади поперечного сечения (когда основной повреждающий фактор – общая коррозия);
- конструкций, работающих в условиях циклического нагружения при отсутствии коррозионной среды, несущая способность которых снижается вследствие малоциклового усталости;
- конструкций по функциональным параметрам, когда имеется объем информации по параметрам за период эксплуатации, достаточный для экстраполяции этих значений на последующий период эксплуатации, при выполнении условий безопасной эксплуатации данных конструкций.

В общем случае выбор метода должен обосновываться точностью и достоверностью полученных данных, а также требованиями точности и достоверности прогнозируемого остаточного ресурса конструкций и риска, связанного с их дальнейшей эксплуатацией, наличия и точности системы контроля за их ТС.

В качестве основного показателя ОР в результате прогноза определяют наработку до отказа T , при заданной вероятности безотказной работы $P(t)$ или по индексу надежности β , в виде функции вероятности безотказной работы в течение этой наработки.

Величину вероятности $P(t)$ выбирают в зависимости от назначения, степени ответственности и режима использования конструкций. Если переход конструкций в предельное состояние (ресурсный отказ) связан с опасностью для жизни и здоровья людей, со значительными экологическими последствиями, с отсутствием непрерывного контроля за техническими параметрами, то продолжительность эксплуатации следует нормировать заданным назначенным ресурсом, опираясь при этом на полученные показатели ОР.

ОР несущей конструкции (годы) определяют по формуле

$$T_p = \frac{k}{\lambda}, \quad (1)$$

где T_p – остаточный ресурс, годы; k – коэффициент, принимаемый 0,16 – при определении остаточного ресурса до капитального ремонта; 0,22 – при определении остаточного ресурса до аварийного состояния; λ – постоянная износа, определяемая по данным обследования на основании изменения несущей способности на момент обследования,

$$\lambda = \frac{-\ln \gamma_{cp}}{t_i}, \quad (2)$$

где γ_{cp} – средняя относительная надежность; t_i – срок службы в годах, на момент проведения обследования.

Необходимо отметить, что большой вопрос вызывают значения постоянной износа и ее применение. Так, в [6] приведено, что для железобетона, в период нормальной эксплуатации $\lambda = 0,003...0,005$. С течением времени, по данным [7], она увеличивается в конце срока эксплуатации примерно в три раза и возрастает с 0,003 до 0,01.

Авторские исследования физического износа железобетонных элементов, эксплуатировавшихся различные длительные сроки в разных атмосферных условиях показывают, что в условиях открытой атмосферы, в зонах нормальной эксплуатации, значения постоянной износа близки к предлагаемым, значительно увеличиваясь к концу нормативного срока эксплуатации ($\lambda = 0,0145...0,0290$); в условиях зданий сельскохозяйственного назначения – выше (коровники – $\lambda = 0,0063...0,0100$; свинарники – $\lambda = 0,0125...0,0145$) и тем более значительно выше в конце эксплуатационных сроков в зонах неудовлетворительного и предаварийного технических состояний (λ до 0,0490), что необходимо учитывать при расчете сроков наступления неудовлетворительного (предаварийного) технического состояния (капитального ремонта) [8, 9].

На основании данных по оценке ТС конструкций и ОР должно приниматься обоснованное решение о возможности дальнейшей их эксплуатации в соответствии

с остаточным или назначенным ресурсом или их ремонте, снижении рабочих параметров, демонтаже. Решение принимается организацией, проводившей техническое диагностирование и оценку ОР.

Заключение. Методика расчета ОР несущих конструкций позволяет выполнить расчетный прогноз их остаточного ресурса как на стадии проектирования, так и на стадии эксплуатации.

Использование предлагаемого метода позволяет повысить не только качество оценки ОР, но и объективность составления и планирования бюджетов на обслуживание и капитальный ремонт несущих конструкций зданий и сооружений.

Список литературы

- 1 К вопросу оценки остаточного ресурса зданий и сооружений / А. А. Васильев [и др.] // «OPEN INNOVATION»: сб. статей VIII Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза : Наука и Просвещение. – 2019. – С. 46–49.
- 2 Методика оценки остаточного ресурса несущих конструкций зданий и сооружений. – М. : Федеральный центр нормирования, стандартизации и оценки соответствия в строительстве, 2018. – 50 с.
- 3 СН 1.04.01–2020. Техническое состояние зданий и сооружений. – Введ. 2020-10-27. – Минск : М-во архит. и стр-ва Респ. Беларусь, 2021. – 68 с.
- 4 СП 1.04.02–2022. Общие положения по обследованию строительных конструкций зданий и сооружений. – Введ. 2022-05-05. – Минск : М-во архит. и стр-ва Респ. Беларусь, 2022. – 78 с.
- 5 Васильев, А. А. Оценка граничных значений характеристик надежности для различных категорий технического состояния железобетонных конструкций / А. А. Васильев, В. М. Швед, В. О. Бондаренко // «WORLD SCIENCE: PROBLEMS AND INNOVATIONS»: сб. статей XL Междунар. науч.-практ. конф. – Пенза : Наука и Просвещение. – 2020. – С. 28–30.
- 6 Пухонго, Л. М. Долговечность железобетонных конструкций инженерных сооружений (силосов, бункеров, резервуаров, водонапорных башен, подпорных стен) / Л. М. Пухонго. – М. : АСВ, 2004. – 424 с.
- 7 Бойко, М. Д. Диагностика повреждений и методы восстановления эксплуатационных качеств зданий / М. Д. Бойко. – М. : Стройиздат, 1975. – 334 с.
- 8 Васильев, А. А. Оценка и прогнозирование физического износа строительных конструкций, зданий и сооружений : [монография] / А. А. Васильев. – Гомель : БелГУТ, 2021. – 189 с.
- 9 Оценка постоянной физического износа железобетонных элементов и конструкций для различной агрессивности эксплуатационной среды / А. А. Васильев [и др.] // Наука, общество, образование в эпоху цифровизации и глобальных изменений : [монография] / М. Н. Алешина [и др.] ; под общ. ред. Г. Ю. Гуляева. – Пенза : Наука и Просвещение, 2022. – Разд. II. Гл. 7. – С. 94–108.

Получено 05.10.2022

A. A. Vasilyev. Assessment of the remaining life of load-bearing structures.

A method for calculating the residual resource of load-bearing structures is presented, based on a basic approach formed on the principle of safe operation of structures according to technical condition. The method of calculating the residual life of load-bearing structures is given, the values of constant wear for reinforced concrete elements operating in various atmospheric environments are proposed.