

УДК 81.93.21

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Альберт Халитович Байбурин

*Профессор кафедры «Технология строительного производства»
ГОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет», г. Челябинск,
кандидат технических наук*

Андрей Евгеньевич Иванов

Директор ООО «ПроектСтройЭкспертиза», г. Челябинск

Денис Альбертович Байбурин

*Магистрант кафедры «Строительные конструкции и инженерные
сооружения» ГОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет»,
г. Челябинск*

Одним из требований экспертизы промышленной безопасности зданий и сооружений является определение остаточного ресурса несущих строительных конструкций. Порядок продления срока безопасной эксплуатации технических устройств, оборудования и сооружений запрещает дальнейшую эксплуатацию при достижении срока эксплуатации, установленного в нормативно-технической документации. Если в документации срок эксплуатации не установлен, допускается использовать данные по аналогам или определять его по согласованной с Ростехнадзором методике с учетом результатов анализа документации, условий эксплуатации и технического диагностирования (экспертного обследования).

Анализ показывает, что в настоящее время экспертные организации применяют различные методики определения остаточного ресурса зданий, сооружений и оборудования:

- 1) экстраполяция максимальных текущих значений повреждений до предельно допустимой величины, в том числе с учетом доверительной вероятности (гамма-процентный ресурс) или коэффициентов запаса по ресурсу [1, 2];
- 2) различные модели изменения во времени нагруженности, сопротивления, деформаций, других параметров технического состояния, а также соответствующих коэффициентов запаса по различным видам предельных состояний [3-5];
- 3) по изменению вероятности отказа объекта, уровня промышленного риска или риска аварии [6, 7];
- 4) по степени физического износа, выраженного в процентах [6, 8];
- 5) по нормативам сроков эксплуатации до капитального ремонта [9-13];
- 6) по срокам эксплуатации объектов-аналогов;
- 7) по нормам амортизационных отчислений на восстановление основных фондов.

Последние из указанных методов весьма условны и не учитывают особенности работы и условия эксплуатации конкретных конструкций.

Многие методические документы, указанные в списке использованных источников, либо отменены, либо носят рекомендательный характер. Вместе с тем, в некоторых документах, например, РД 09-102-95 [1], отмененном приказом Ростехнадзора от 10.08.06 №760 и замененным Порядком продления срока безопасной эксплуатации [14], приведены подробные методические указания по этапам определения ресурса, требования к содержанию соответствующих методик. Большинство принятых норм относятся к анализу ресурса устройств и оборудования и лишь небольшая часть – к зданиям и сооружениям [1, 5, 6, 17, 19 и др.]

Для некоторых видов оборудования, конструкций и сооружений методики определения остаточного ресурса имеют достаточное научное обоснование и долговременную производственную апробацию [2-4], но для строительных конструкций производственных зданий общепризнанной методики не существует. В этой связи целесообразно рассмотреть основные аспекты создания такой методики.

Наиболее простым, но в то же время приближенным методом определения остаточного ресурса является установление нормативных сроков эксплуатации конструкций, а также сроков обследования и ремонтов. Указанные сроки приведены в ОРД по технической эксплуатации железобетонных и стальных конструкций производственных зданий, РД 11-126-96 [11], МДС 13-14.2000 [10], стандарте организации СА-03-006-06 [13] и других документах. При этом используются два подхода: сроки назначаются в зависимости от условий эксплуатации для зданий и сооружений различных конструктивных систем и этажности и по отдельным видам конструкций. Очевидные недостатки этих подходов могут быть компенсированы в случае их совместного использования.

Применение методики оценки ресурса, основанной на определении степени износа в процентном отношении, имеет право на существование при достаточном обосновании [6] или для целей, напрямую несвязанных с безопасностью [8].

Метод экстраполяции текущих значений повреждений до предельно допустимой величины позволяет прогнозировать ресурс при одновременном выполнении следующих условий:

- известны параметры, определяющие техническое состояние;
- определены критерии предельных состояний;
- ведется непрерывный или периодический контроль параметров технического состояния;
- отсутствует опасность внезапных отказов.

При экстраполяции возможно применение различных зависимостей между величиной повреждения (износа, коррозии, деформации) h и

продолжительностью эксплуатации t : линейной; степенной; логарифмической; экспоненциальной и др. (табл. 1, рис. 1).

Таблица 1

Виды зависимостей при определении предельного срока эксплуатации и остаточного ресурса

Вид зависимости	Математическое выражение	Область применения
Линейная	$h(t) = h_0 + Ct$	Общая коррозия, механический износ
Степенная	$h(t) = Ct^m$	Коррозия под напряжением и при износе
Логарифмическая	$h(t) = A \ln(t + C)$	Газовая и локальная коррозия
Экспоненциальная	$h(t) = Ce^{T(t)}$	Коррозия под напряжением

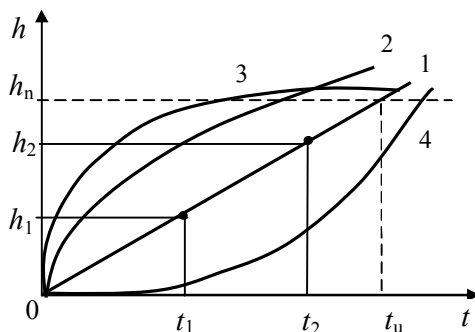


Рис. 1. Зависимости при определении предельного срока эксплуатации: 1 – линейная; 2 – степенная; 3 – логарифмическая; 4 – экспоненциальная

При выборе формы кривой и математической зависимости следует учитывать: физические закономерности накопления повреждений; критерии наилучшего описания параметрических точек $h(t_1)$, $h(t_2)$, ...; точность их определения; стабильность условий эксплуатации; необходимость запаса по остаточному ресурсу; эффективность системы эксплуатационного контроля, технического обслуживания и ремонта.

При оценке ресурса оборудования чаще всего используют линейную модель, которая по сравнению с выпуклыми кривыми обеспечивает некоторый запас по ресурсу. Для строительных конструкций вид зависимости может определяться законом деградации, прочностными и геометрическими параметрами предельных состояний. Например, при сплошной коррозии или газообразивной эрозии применяется линейная модель, в случае критерия сопротивления растяжению – степенная модель с пока-

затем $m=2$, сопротивления изгибу – степенная модель с показателем $m=3-4$.

При достаточном количестве параметрических точек $h(t_1), h(t_2), \dots$ предельный срок эксплуатации и остаточный ресурс рекомендуется определять с доверительной вероятностью (гамма-процентный ресурс $T_\gamma, \gamma=0,9-0,95$). При этом среднее значение остаточного ресурса T_u следует применять для сооружений пониженного уровня ответственности, а гарантированное значение T_γ – для ответственных конструкций и сооружений (рис. 2).

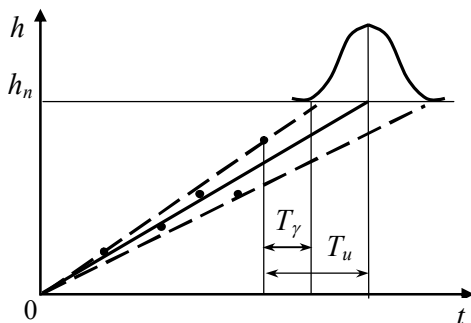


Рис. 2. Определение гамма-процентного остаточного ресурса

При получении нескольких значений $h(t_i)$ в момент эксплуатации t_i статистику можно не исследовать, так как ресурс определяется максимальным повреждением или слабейшим элементом конструкции (что, строго говоря, верно только для статически определимых конструкций). Однако если параметр технического состояния определяется выборочным методом контроля, то могут быть получены статистики в виде средних значений, отклонений и доверительных интервалов или по закону экстремальных значений. В последнем случае определяют максимальный вероятный размер дефекта или вероятность наличия максимального дефекта в генеральной совокупности (на всей поверхности, для всех конструкций).

Остаточный ресурс здания или сооружения на опасном производственном объекте устанавливается по наименьшей величине остаточного ресурса несущих конструкций и их элементов, так как авария объекта происходит, как правило, по принципу «слабого звена». Ресурс строительных конструкций обычно оценивают по результатам определения коэффициентов запаса по различным видам предельных состояний [3, 4]. Основные положения методики оценки остаточного ресурса приведены ниже. Методика основана на постепенном сужении области поиска слабого звена или потенциально опасных зон разрушения.

Остаточный ресурс здания или сооружения

$$t_r = \min \{t_{rc,i}\}, \quad (1)$$

где $t_{rc,i}$ – остаточный ресурс i -й конструкции в группе однотипных конструкций (колонн, стен, ферм, подкрановых балок, плит перекрытий и т.д.).

Остаточный ресурс конструкции

$$t_{rc} = \min \{t_{rc1}; t_{rc2}; t_{rc3}\}, \quad (2)$$

где $t_{rc1}; t_{rc2}; t_{rc3}$ – остаточные ресурсы конструкции соответственно по первому, второму предельным состояниям и по конструктивным требованиям.

Остаточный ресурс конструкции по j -му виду предельного состояния

$$t_{rc,j} = \min \{t_{rc,j,k}\}, \quad (3)$$

где $t_{rc,j,k}$ – остаточный ресурс конструкции по j -му виду предельного состояния и k -му виду расчета. Виды расчетов по предельным состояниям определяются соответствующими нормативными документами. Например, для первого предельного состояния – расчеты на прочность, устойчивость, усталостное либо хрупкое разрушение, для второго предельного состояния – расчеты на прогиб, перемещение, раскрытие трещин и т.п.

Остаточный ресурс конструкции по j -му виду предельного состояния и k -му виду расчета

$$t_{rc,j,k} = \min \{t_{rc,j,k,n}\}, \quad (4)$$

где $t_{rc,j,k,n}$ – остаточный ресурс конструкции по j -му виду предельного состояния и по n -му номеру расчетного участка (сечения).

Зависимость изменения коэффициента запаса от времени может быть описана квадратичной функцией (рис. 3)

$$t_u = t \sqrt{(k_0 - 1)/(k_0 - k)}, \quad (5)$$

где $k_0; k$ – соответственно проектный запас и запас в момент времени t ; t_u – время эксплуатации, при котором нарушается условие предельного состояния и $k = 1$.

Остаточный ресурс определяется выражением

$$t_r = t_u - t = t \left(\sqrt{(k_0 - 1)/(k_0 - k)} - 1 \right). \quad (6)$$

Зависимости (5) и (6) следует применять в случаях, когда определены значения проектного запаса k_0 и запаса в момент времени t , условия эксплуатации стабильны, отсутствуют скачкообразные изменения интенсивности износа конструкций, среда эксплуатации неагрессивная или слабоагрессивная.

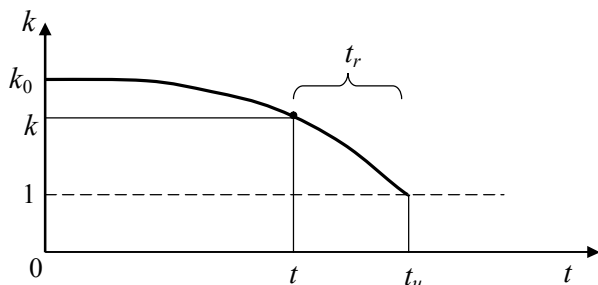


Рис. 3. Определение остаточного ресурса по изменению коэффициента запаса

В случаях, если среда эксплуатации средне- или сильноагрессивная, условия эксплуатации нестабильны и возможны скачкообразные изменения интенсивности износа конструкций, рекомендуется применять аппроксимирующие функции снижения запаса с использованием трех и более точек $k(t)$.

При недостатке данных и нестабильных условиях эксплуатации, когда возможно непрогнозируемое изменение скорости износа, или больших рисках остаточный ресурс следует устанавливать с учетом коэффициента надежности по ресурсу

$$t_m = t_r / \gamma_t, \quad (7)$$

где t_r – остаточный ресурс, определенный по формуле (6);

γ_t – коэффициент надежности по ресурсу.

Коэффициент γ_t может назначаться с учетом:

- уровня ответственности здания или сооружения;
- вида конструкции;
- изученности механизмов достижения конструкцией предельного состояния;
- изученности влияния эксплуатационных факторов на механические свойства материалов и геометрические параметры конструкций;
- точности прогнозирования развития выявленных дефектов и повреждений в последующий период эксплуатации;
- статистики причин отказов и аварий;
- принятой степени приемлемого риска аварии;
- нормативного срока эксплуатации конструкций или проектного срока службы здания;
- эффективности организации эксплуатационного контроля, технического обслуживания и ремонта.

Например, если предельный срок эксплуатации t_u , определенный по зависимости (5) или другим способом, превышает нормативный срок эксплуатации конструкции или проектный срок службы объекта, оста-

точный ресурс может быть назначен с учетом коэффициента надежности по ресурсу равным двум или более.

Подобный подход используется в рекомендациях RILEM [15], в которых модель деградации несущей способности и надежности представлена степенной функцией

$$\theta(t) = \theta_0 (1 - kt^n), \quad (8)$$

где $\theta(t), \theta_0$ – текущее в момент времени t и начальное значения запаса

безопасности (разности прочности и нагрузки);

k – постоянный коэффициент;

n – характеристика моды деградационного процесса (при линейной моде деградации $n=1$).

Предложенная модель связывает безопасность по долговечности с механической безопасностью при условии, что снижение уровня последней будет находиться в конце срока службы в границах допустимых значений. Для этого в проектирование вводится коэффициент безопасности по сроку службы γ . Методика определения указанного коэффициента основана на задании такого начального уровня безопасности по нагрузке θ_0 , при котором расчетная долговечность t_d обеспечивалась бы с определенным коэффициентом запаса γ .

Очевидно, что назначение коэффициента запаса по ресурсу всегда субъективно, так как коэффициенты запаса – есть плата за незнание объективных законов и отличие моделей от реальности. Непрерывный мониторинг параметров технического состояния оснований, конструкций и окружающей среды, применение точных методов прогнозирования позволяют не вводить в модель «коэффициенты незнания».

При наличии исполнительной документации, содержащей необходимые сведения для определения фактических коэффициентов запаса с учетом допущенных при строительстве дефектов и отклонений, остаточный ресурс следует определять, используя не проектные, а фактические значения коэффициентов запаса (рис. 4). При этом снижение k_0 может достигать 20-30%.

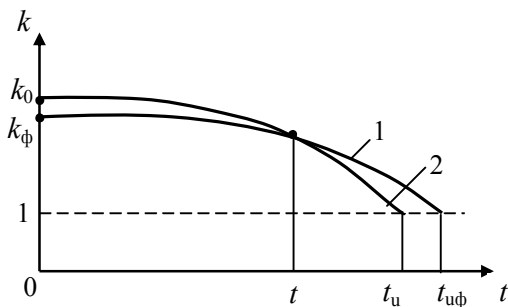


Рис. 4. Оценка ресурса без учета (1) и с учетом (2) допущенных при строительстве дефектов

Остаточный ресурс ответственных объектов должен устанавливаться с учетом приемлемого риска – риска, уровень которого допустим и обоснован, исходя из экономических и социальных соображений с учетом значимости объекта. В случае, когда ущерб не зависит от вида отказавшей конструкции, возможна оценка ресурса по функции изменения вероятности отказа (аварии) во времени. Причем риск аварии может интерпретироваться как отношение (рис. 5).

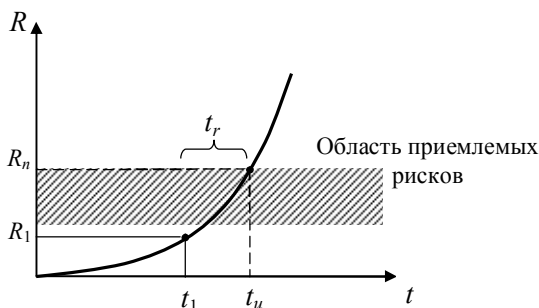


Рис. 5. Оценка остаточного ресурса по риску аварии

Причем риск аварии может интерпретироваться как отношение [7]

$$R = \frac{P_f}{P_t} = \frac{P_t + \Delta P}{P_t}, \quad (9)$$

где P_f , P_t – значение фактического и теоретического рисков аварии;

ΔP – дополнительный риск, привнесенный ошибками проектирования, строительства и эксплуатации.

В методике прогнозирования срока службы пролетных строений железобетонных мостов [6] применен подход к определению ресурса через надежность (безотказность). В качестве нормативного значения надежности принята вероятность безотказной работы 0,9986, которая сохраняется в течение некоторого срока приработки объекта t_0 (рис. 6). Затем начинается снижение надежности в результате износа. Значению безотказности $P=0,9$ соответствует продолжительность работоспособного состояния объекта, а значению $P=0,5$ – предельный срок службы t_u .

Представляется перспективным использование теории нечетких множеств (возможностей) для снижения трудоемкости определения вероятности отказа конструкций. При этом надежность может быть рассмотрена как функция распределения возможностей $\pi(t)$ [18], а вероятность – как возможность. Остаточный ресурс определяется по функции распределения возможностей с учетом интервальных и предельного значений надежности конструкций (рис. 7).

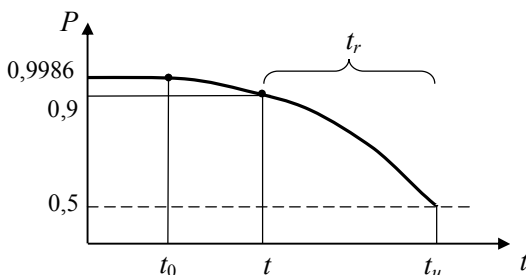


Рис. 6. Определение остаточного ресурса по изменению вероятности безотказной работы

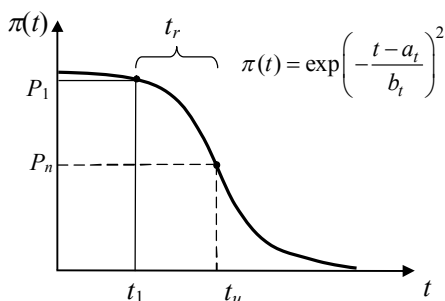


Рис. 7. Определение остаточного ресурса по функции распределения возможностей

При оценке остаточного ресурса по вероятности отказа или уровню риска основная проблема заключается в установлении соответствующего предельного значения, определяющего предельный срок эксплуатации объекта. Известные подходы к установлению таких значений основаны на экономических нормах надежности и анализе рисков, обобщении опыта проектирования и эксплуатации объектов, анализе нормативных запасов, различных расчетных методах [7, 16]. Риск ниже фонового уровня для РФ $5 \cdot 10^{-6}$ рекомендуется считать приемлемым, а свыше $5 \cdot 10^{-5}$ – недопустимым [17].

В заключении отметим, что создаваемые методики оценки остаточного ресурса конструкций зданий и сооружений, целесообразно классифицировать по уровню ответственности объектов. Для объектов повышенного уровня ответственности следует применять методики, основанные на оценке риска или вероятности аварии, для остальных объектов – на определении различных параметров технического состояния, а также соответствующих коэффициентов запаса по видам предельных состояний. При этом нормативные сроки эксплуатации конструкций могут быть использованы лишь в качестве дополнительной информации.

Библиографический список

1. РД 09-102-95 Методические указания по определению остаточного ресурса потенциально опасных объектов, поднадзорных Госгортехнадзору России (отменен).
2. РД 03-421-01 Методические указания по проведению диагностирования технического состояния и определению остаточного срока службы сосудов и аппаратов.
3. Шматков С.Б. Определение остаточного ресурса промышленных дымовых труб// Предотвращение аварий зданий и сооружений: Сб. науч. трудов. – М.: МДП, 2008. – С. 44–51.
4. Суцев С.П., Самолинов Н.А., Адаменко И.А. Остаточный ресурс конструкций (сооружений) и возможные методы его оценки// Предотвращение аварий зданий и сооружений: Сб. науч. трудов. Вып. 8. – М.: МДП, 2009. – С. 320–327.
5. СТО 22-02-02 Руководство по обследованию и определению остаточного ресурса несущих стальных конструкций покрытий зданий, выполненных из кипящих сталей.
6. Методика расчетного прогнозирования срока службы железобетонных пролетных строений автодорожных мостов. – М.: Росавтодор, 2002. – 146 с.
7. Мельчаков А.П., Чебоксаров Д.В. Прогноз, оценка и регулирование риска аварии зданий и сооружений. Теория, методология и инженерные приложения. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2009. – 111 с.
8. ВСН 53-86(р) Правила оценки физического износа жилых зданий.
9. ВСН 58-88(р) Положение об организации и проведению реконструкции, ремонта и технического обслуживания зданий, объектов коммунального и социально-культурного назначения.
10. МДС 13-14.2000 Положение о проведении планово-предупредительного ремонта производственных зданий и сооружений.
11. РД 11-126-96 Методические рекомендации по организации и осуществлению контроля за обеспечением безопасной эксплуатации зданий и сооружений на подконтрольных металлургических и коксохимических производствах.
12. Ханухов Х.М. Нормативное обеспечение безопасной эксплуатации зданий и сооружений и мониторинг их технического состояния // Предотвращение аварий зданий и сооружений: Сб. науч. трудов. Вып. 8. – М.: МДП, 2009. – С. 146–165.
13. СА-03-006-06 Методические указания по проведению технического обслуживания, ремонта, обследования, анализа промышленной безопасности производственных зданий и сооружений предприятий, эксплуатирующих взрывопожароопасные и химически опасные объекты. – М., 2008. – 236 с.

14. Порядок продления срока безопасной эксплуатации технических устройств, оборудования и сооружений (приказ №195 Минприроды РФ от 30.06.09).
15. Durability desing of concrete structures. Report of RILEM Technical Committee 130-csl. Edited by A. Sarja and E. Vesicary. E&SPON, 165pp.
16. Байбурин А.Х., Головнев С.Г. Качество и безопасность строительных технологий: Монография. – Челябинск, Изд-во ЮУрГУ, 2006. – 453 с.
17. ГОСТ Р 53778-2010 Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния.
18. Методика расчета остаточного ресурса металлоконструкций грузоподъемных кранов на основе теории возможностей / А.Л. Кузьминов, В.С. Уткин, А.В. Кожевников, Н.Г. Канев // Предотвращение аварий зданий и сооружений: Сб.науч.трудов. – М.: МДП, 2008. – С. 225-231.
19. ГОСТ Р 53006-2008 Оценка ресурса потенциально опасных объектов на основе экспресс-методов. Общие требования.