

УДК 624.076.2

Оценка рисков эксплуатации стальных конструкций в условиях исчерпания их ресурса

Колесниченко С.В.

ООО «Укринсталькон им. В.Н. Шимановского», Донбасский центр
технологической безопасности, Украина

Аннотация. Предлагается методика оценки риска, входящая в состав работ по риск-анализу возможности дальнейшей эксплуатации строительных стальных конструкций в условиях исчерпания их ресурса. Методика основана на учете как существующих дефектов и поврежденных конструкций, так и гипотетических (необнаруженных) несовершенств.

Анотація. Пропонується методика оцінювання ризиків, що входить до складу робіт із ризик-аналізу можливості подальшої експлуатації будівельних сталевих конструкцій в умовах вичерпання їх ресурсу. Методика базується на урахуванні як існуючих дефектів та пошкоджень, так і гіпотетичних (не знайдених) недосконалостей.

Abstract. Methodology of risk assessment which is a part of risk-analysis for prediction of possibility safety operation for building steel structures in the condition of project exhausted residual has suggested. Methodology based also on the analysis of defined defects and damages also as hypothetic (non-defined) imperfections.

Ключевые слова: риск, анализ риска, ресурс, стальные конструкции.

Описание проблемы. В Украине находится значительный фонд производственных зданий и сооружений, стоимость которого доходит до 60% основных фондов народного хозяйства Украины. Сохранение и поддержание этого фонда в рабочем состоянии, возможного для использования в течение всего проектного, а часто и назначенного запроектного срока эксплуатации являются важной экономической задачей. По ряду объективных и субъективных причин в последнее время количество аварий приобрело лавинообразный характер. С 1991 года и до сегодняшнего дня на предприятиях горнодобывающей, металлургической, машиностроительной отраслей и в строительстве произошли тысячи аварий, большое количество которых сопровождалось человеческими жертвами. Значительная часть аварий обусловлена процессом физического старения конструкций.

Задачей безаварийной эксплуатации строительных металлических конструкций является расчет остаточного ресурса на основе результатов, полученных во время выполнения работ по обследованию и оценке технического состояния.

Современная концепция эксплуатации сложных инженерных систем, к которым относятся здания и сооружения, предполагает переход от понятия «абсолютная безопасность» к «приемлемому риску». Для этого необходимо проведение анализа рисков и выработки системы по управлению рисками, т.е. снижению рисков до приемлемого уровня. Задачей безаварийной эксплуатации строительных металлических конструкций является расчет остаточного ресурса (ОР) на основе результатов, полученных во время выполнения работ по обследованию и оценке технического состояния.

Расчет ОР выполняется путем уточнения действующих нагрузок, расчетной схемы, свойств материала, обнаруженных дефектов и повреждений (ДиП) с учетом интенсивности их развития во времени. Однако, всегда существует вероятность того, что в процессе обследования часть ДиП не будет обнаружена, их количество, распределение и местонахождение будет неизвестно. Кроме этого, даже для прогнозируемых ДиП возможно их спонтанное неконтролируемое развитие при несанкционированном субъективном изменении проектных параметров функционирования системы «узел – конструкция – здание – нагрузка – материал – расчетная схема» в сроки между плановыми обследованиями (проектного, назначенного или остаточного ресурса).

Анализ исследований и публикаций. В связи с тем, что значительная часть эксплуатирующихся конструкций находится в условиях практически полного исчерпания их проектного ресурса, проблеме безопасной эксплуатации конструкций, зданий и сооружений в последнее время уделяется достаточно большое внимание. Особенно активно исследования безопасности стали выполняться после выхода Постановления КМУ № 1331 [6]. В рамках целевой комплексной программы НАНУ «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин» осуществляется координация работ по проблеме ресурса и безопасности как для объектов повышенной безопасности, так и для обычных промышленных зданий и сооружений [1, 8, 11].

Нерешенные проблемы, которые отражены в исследовании. Несмотря на достаточно большое количество публикаций по проблеме риск-анализа, большинство из них посвящено экономическим аспектам оценки возможного ущерба, проблеме планирования и организации работ, разработке рекомендаций по безопасной эксплуатации в условиях разработки и реализации мероприятий по уменьшению риска [2, 7, 12]. Малоизученной при оценке риска эксплуатирующихся стальных конструкциях в условиях исчерпания их ресурса для прогнозирования остаточного ресурса остается проблема анализа обнаруженных дефектов и повреждений, прогнозирования их развития, возможного учета не обнаруженных во время обследования несовершенств.

Цель публикации. В данной работе предлагается методика риск-анализа эксплуатации строительных стальных конструкций, при котором основными факторами опасности предлагается считать вероятность их разрушения при наличии как выявленных повреждений (реальный риск), так и невыявленных несовершенств, развивающихся спонтанно и хаотически, не в соответствии с расчетными прогнозными моделями (гипотетический риск).

В действующих технических нормах общепринятым для количественного анализа рисков могут считаться следующие определения: риск – это вероятностные потери, которые могут быть установлены путем умножения вероятности (относительной частоты) негативного события определенной интенсивности на величину возможного ущерба от него [7]. Определение количественного риска является достаточно сложной экономической задачей, так как требуется точное оценивание возможного ущерба в случае аварии.

С точки зрения перехода в технический аспект проблемы будем опираться на следующие определения, широко используемые в практике:

- риск, или степень риска – это сочетание частоты (или вероятности) и последствий определенного опасного события, которое может состояться в определенное время или при определенных обстоятельствах на территории объекта повышенной опасности и/или за его пределами. Понятие риска всегда включает два элемента: частоту, с которой осуществляется опасное событие, и последствия этого события [1, 3, 5];
- потенциальный риск – распределение частоты реализации негативного воздействия определенного уровня [2];
- оценка риска – общий процесс анализа риска и оценивания риска [3, 4];
- анализ риска – систематическое использование информации для определения источников и количественной оценки риска [3, 4].

С позиции регулярного надзора за состоянием стальных конструкций сложившаяся схема их эксплуатации представлена блок-схемой, представленной на рис. 1.

По результатам обследования конструкций должна быть сформирована база обнаруженных дефектов и повреждений, на её основе получены качественные и количественные показатели дальнейшей эксплуатационной пригодности объекта (параметры технического состояния – ПТС), выполнены необходимые перерасчеты и определена возможность продления ресурса.

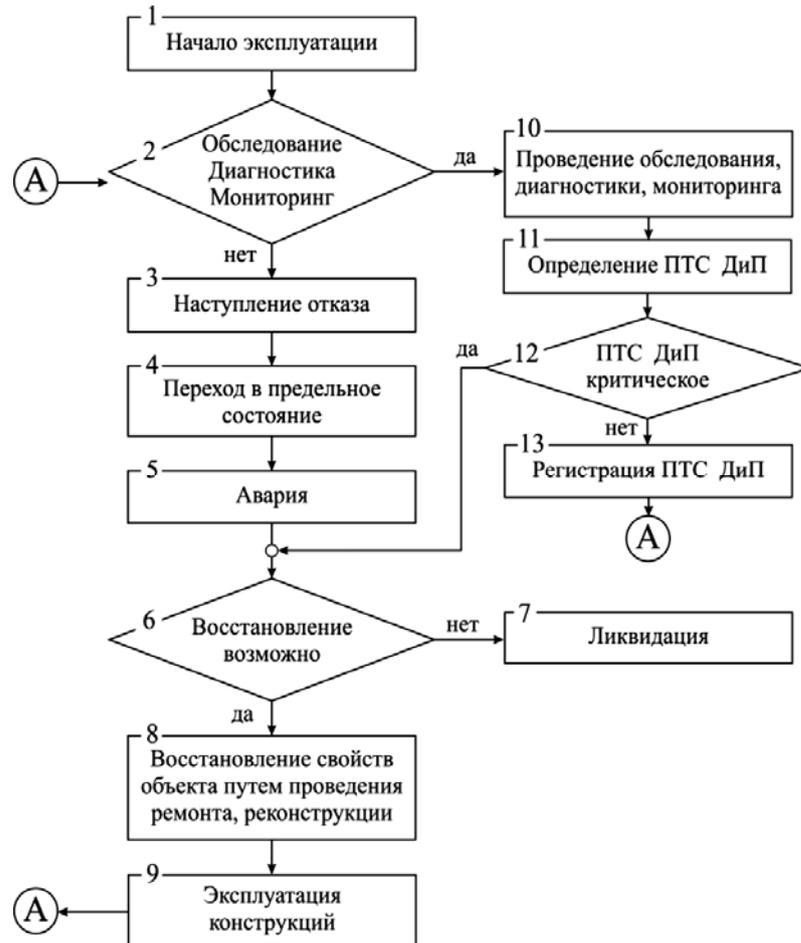


Рис. 1. Схема эксплуатации стальных конструкций производственных зданий и сооружений

Продление ресурса эксплуатирующихся строительных конструкций, в том числе металлических, всегда связано с определенным риском. Возможно несколько причин отказов:

1. Изменение (ухудшение) параметров конструктивной безопасности. Сюда относятся:

- развитие во времени обнаруженных ДиП, значения параметров технического состояния которых могут превысить допустимые и перейти в опасные;
- реализация скрытых ДиП, обнаружить которые в процессе обследования не удалось.

2. Изменение (ухудшение) организационно-технических показателей. Эти показатели связаны с регулярным выполнением процедур, направленных на безопасность технологического процесса и поддержание состояния строительных конструкций здания (сооружения) в условиях выполнения требований действующих норм.

3. Ухудшение показателей природного воздействия.

4. Влияние показателей технологии и производства на состояние строительных конструкций.

В данном исследовании анализируется конструктивная безопасность – эксплуатация конструкций с обнаруженными и не обнаруженными ДИП.

Конечной задачей обеспечения безаварийной эксплуатации конструкций является назначение их остаточного ресурса. При этом рассматривается несколько групп типовых ситуаций, характеризующихся взаимосвязью и наличием информации между прямыми и косвенными параметрами системы, результатами периодических измерений параметров, а также результатами натурного эксперимента. В зависимости от этого возможно использование соответствующих видов распределений при прогнозировании интервальной или точечной оценки ресурса. С учетом стоимости работ по техническому обслуживанию и ремонтам, определяются коэффициенты готовности и пригодности конструкции к содержанию. В зависимости от информации об объекте, остаточный ресурс которого прогнозируется, рассматриваются три группы типовых ситуаций.

Первая группа типовых ситуаций характеризуется наличием следующей информации:

- известны вид функции F , определяющий связь между прямыми и косвенными параметрами системы, все коэффициенты и дисперсии этих коэффициентов;
- имеются результаты периодических измерений каждого косвенного параметра.

Вторая группа типовых ситуаций характеризуется следующей информацией:

- вид функции F известен, коэффициенты неизвестны;
- имеются результаты периодических измерений косвенных параметров, а также результаты эксперимента, в процессе которого производится одновременное измерение прямых и косвенных ПТС.

Третья группа типовых ситуаций характеризуется следующей информацией:

- функция F монотонна и непрерывна (общий вид неизвестен);
- имеются результаты эксперимента.

Используется DM-распределение, прогнозируется интервальная или точечная оценка ресурса [14].

Для эксплуатирующихся стальных конструкций показателями надежности, рассчитываемыми в рамках ПОН, являются показатели долговечности (ресурс) и комплексный показатель – коэффициент готовности:

$$K_{\Gamma}(t) = \frac{T_0(t)}{[T_0(t) + T_B(t)]}, \quad (1)$$

где $T_0(t)$ – средняя наработка объекта между отказами; $T_B(t)$ – среднее время восстановления.

Пригодность конструкции к содержанию может быть определена как:

$$S = \frac{K_{\Gamma}}{C_{\text{ТОиР}}/T_{\text{КЛ}}} \quad (2)$$

$C_{\text{ТОиР}}$ – стоимость работ по техническому обслуживанию и ремонтам;
 $T_{\text{КЛ}}$ – расчетное календарное время эксплуатации.

Общая методология риск-анализа заключается в следующих последовательных действиях:

- планирование и организация работ;
- идентификация опасностей и реципиентов риска;
- оценка риска;
- расчет ущерба;
- разработка рекомендаций по уменьшению риска.

Остановимся подробнее на определении безопасности объекта – оценке риска – ряде логических шагов, позволяющих обеспечить систематическим образом рассмотрение факторов опасности. Основной для оценки рисков R являются функционал F , связывающий вероятность P возникновения неблагоприятного события и математическое ожидание ущерба U от этого неблагоприятного события:

$$R = F_R \{U, P\} = \sum_i [F_{R_i}(U_i, P_i)] = \int C(U)P(U)dU = \int C(P)U(P)dP, \quad (3)$$

где i – виды неблагоприятных событий, C – весовые функции, учитывающие взаимовлияние рисков.

В общем случае для качественного и количественного анализа рисков по выражению (3) на базе исследований сложных динамических нелинейных опасных процессов (возникновения повреждений, отказов, разрушений и аварий) осуществляется построение физических и математических моделей анализируемых объектов, создающих угрозы как по отдельным видам безопасности (локальные риски), так и комплексной безопасности по соответствующим сочетаниям и видам безопасности (глобальный риск).

В этих моделях и сценариях возникновения и развития неблагоприятных событий используются как заданные, так и расчетные и постулированные опасные процессы, развивающиеся во времени t . При таком подходе используются временные шкалы рисков $R(t)$.

Условие безопасности может быть записано в форме:

$$\{R, R_{F,t}\} \leq \{[R], [R_{F,t}]\}, \quad (4)$$

где $R_{F,t}$ – значения рисков для заданной точки F и времени t .

В процессе проведения обследования конструкций зданий и сооружений основной задачей является выявление ДиП с разработкой мероприятий по их устранению. Несмотря на использование методов контроля (ультразвукового, рентгеновского, др.), всегда существует вероятность необнаружения скрытых ДиП. Сюда относятся коррозионные дефекты, трещины, непровары в сварных швах и основном металле подкрановых балок и листовых конструкциях резервуаров, бункеров, силосов, трубопроводов, большепролетных покрытий. Количество этих ДиП, их распределение по толщине металла и местонахождение неизвестны. Для прогнозирования существования невыявленных несовершенств можно воспользоваться информацией об обнаруженных ДиП.

Пусть:

- $K_{oi}(t_j)$ – общее количество дефектов (повреждений) i -го наименования, распределенных по толщине металла t_j ;
- $K_{ni}(t_j)$ – количество невыявленных дефектов (повреждений) i -го наименования, распределенного по толщине металла t_j ;
- $K_{vi}(t_j)$ – количество выявленных дефектов (повреждений) i -го наименования, распределенных по толщине металла t_j .

Для трещин, несовершенств сварного шва и коррозионных дефектов вероятность обнаружения дефекта для j -й толщины металла можно описать как [9–11]:

$$I(t_j) = 1 - e^{-\mu t_j}, \quad (5)$$

μ – коэффициент, характеризующий параметры распределения.

Общее количество всех i -х дефектов, обнаруженных на j -й толщине:

$$K_{oi}(t_j) = \frac{K_{Bi}(t_j)}{I(t_j)}. \quad (6)$$

Тогда соответствующее количество невыявленных i -х дефектов, распределенных на j -й толщине:

$$K_H(t_j) = K_o(t_j)(1 - I(t_j)). \quad (7)$$

Общее количество ДиП для всех толщин:

$$K_H = \sum_j K_H(t_j). \quad (8)$$

На основании установленных в результате обследования размеров ДиП, определяется опасность каждого из них.

Вероятность разрушения из-за гипотетического (необнаруженного) ДиП определяется произведением вероятного количества таких ДиП на вероятность разрушения от единичного ДиП для t_j , которая определяется расчетным путем. Если нужно оценить вероятность разрушения по всему диапазону толщин, то вероятности суммируются.

Отдельной проблемой может стать определение критических размеров ДиП, при которых возможно разрушение всей конструкции (глобальное разрушение) или локальное разрушение. В качестве исходной информации в качестве детерминированных показателей можно использовать параметры критических значений ДиП, приведенные в ДБН 362-92. Вместе с тем, для расчета остаточного ресурса требуется использование точных временных непрерывных расчетных моделей, тогда, например, для расчета скорости коррозионного износа можно использовать зависимости, систематизированные в работе [13].

После определения критических размеров ДиП возможно дать оценку глобальному или локальному разрушению:

$$\sigma_0 > k \cdot \sigma_R, \quad (9)$$

где σ_R – предельная несущая способность конструкции; $k = f(R_y, t_j, z)$, z – критические размеры ДиП.

Количество реальных ДиП – K_f , которые могут привести к разрушениям, определяется отношением их числа к общему количеству выявленных ДиП. Отсюда можно определить и количество невыявленных ДиП, которые могут привести к разрушениям:

$$K_{\text{н}} = K_f \cdot K_{\text{н}}. \quad (10)$$

Для коррозионных ДиП, в которых на период обследования размеры не достигли критического значения, можно определить скорость их роста через T лет после их обнаружения. Считая, что скорость подчиняется нормальному (Гауссовому) распределению, плотность вероятности будет иметь вид:

$$\varphi(T, z) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(z-m)^2/2\sigma^2}, \quad (11)$$

где m – математическое ожидание; σ – среднеквадратичное отклонение.

Тогда глубина дефекта считается нормально распределенной величиной с параметрами:

$$m = d + Tv_d; \quad \sigma = \sqrt{\sigma'^2 + T^2\sigma_v^2}, \quad (12)$$

где d – измеренное значение критического параметра; v_d – скорость роста коррозионного дефекта; σ' – среднеквадратичное отклонение начального выявленного размера дефекта; σ_v – среднеквадратичное отклонение скорости роста дефекта.

Вероятность того, что через T лет обнаруженный дефект приобретет критическое значение с возможным разрушением конструкции имеет вид:

$$I_{\text{кр,в}}(T, z) = \int_{d_{\text{кр}}}^{\infty} \varphi(T, z) dz. \quad (13)$$

Для гипотетических ДиП удельная вероятность разрушения конструкции рассчитывается как:

$$I_{\text{кр,в}}(T, z) = \frac{1 - (1 - I_{\text{кр1}}(T_1 t_{\text{кр1}})) k_1(t_1) \dots (1 - I_{\text{кр}l}(T_l t_{\text{кр}l})) k_l(t_l)}{z}, \quad (14)$$

где k – поправочный весовой коэффициент отдельного ДиП; $1 \dots l$ – общее количество гипотетических ДиП.

Основываясь на (3), риск разрушения всей конструкции определяется как:

$$F_R(T, z) = U(Z) \left(\sum_1^n I_{\text{кр,в}}(T, z) + I_{\text{кр,н}}(T, z) \right). \quad (15)$$

В случае, если возможны локальные разрушения конструкций, риск их возникновения определяется как:

$$F_R^{LOC}(T, z) = U(Z_{LOC}) \left(I_{кр,В}(T+1, t_{кр}) - I_{кр,Н}(T, t_{кр}) \right), \quad (16)$$

где n – общее количество критических обнаруженных ДиП; $U(Z)$ - ущерб от разрушения, рассчитанный по экономическим критериям.

Определенный по (15) и (16) риск эксплуатации конструкций с обнаруженными и гипотетическими ДиП позволяет рассчитать их безопасную эксплуатацию при расчете остаточного ресурса. В данной ситуации появляется реальная возможность реализации системы управления рисками через механизм их переоценки после выполнения ремонтных работ и проведения регулярных работ по обследованию и паспортизации.

Выводы

Предлагаемая методика оценки риска, входящая в состав работ по риск-анализу, выполняемого в условиях исчерпания конструкциями их ресурса, позволяет получить прогнозные модели для нормальной эксплуатации объекта, предотвращения возможных аварийных ситуаций.

Литература

- [1] Методика определения рисков и их приемлемых уровней для декларирования безопасности объектов повышенной опасности. Министерство труда и социальной политики. Приказ № 637 от 04.12.2002.
- [2] РД 08-120-96. Методические указания по проведению анализа риска опасных промышленных объектов/Госгортехнадзор России. – Утверждены Госгортехнадзором России 12.07.96. Постановление № 29.
- [3] ГОСТ Р 51897-2002. Менеджмент риска. Термины и определения. Государственный стандарт РФ. – 6 с.
- [4] ДСТУ 2156-93. Безпечність промислових підприємств. Терміни та визначення.
- [5] ДСТУ-П OHSAS 18001:2006. «Системы управления безопасностью и гигиеной труда. Требования».
- [6] Постанова КМУ № 1331 від 8 жовтня 2004 р. «Про затвердження Державної науково-технічної програми «Ресурс».
- [7] Ренн О. Три десятилетия исследования риска: достижения новые горизонты // Вопросы анализа риска. – 1999. – Том 1. – № 1. – С. 80–100.

- [8] Шимановский О.В. Концептуальні основи системи технічного регулювання надійності й безпечності будівельних конструкцій./ А.В. Шимановський, В.П. Корольов// Промислове будівництво та інженерні споруди. – 2008. – № 1. – С. 3–9.
- [9] Pandey M.D. Probabilistic models for condition assessment of oil and gas pipelines. NDT&Intern. – 1998, 31. – № 5. – P. 349–358.
- [10] Yuan X., Pandey M.D. and Bickel G.A. A Probabilistic Model of Wall Thinning in CANDU Feeders due to Flow-Accelerated Corrosion. Int. J. Nuclear Engineering and Design, 2008, 238 (1), 16–24.
- [11] Ориняк І.В. Методики проведення ризик-аналізу магістральних трубопроводів з метою декларування їх безпеки та подовження терміну експлуатації./І.В. Ориняк, М.В. Бородій, А.С. Батура, С.М. Анеєв.// Зб. Наукових статей «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин». Цільова комплексна програма НАН України. Наук. керівник Б.Є. Патон. С. 22–28.
- [12] Булгаков С.Н. Снижение рисков в строительстве при чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера. / Булгаков С.Н., Тамразян А.Г., Рахман И.А., Степанов А.Ю./М.: МАКСпресс, 2004. – 304 с.
- [13] Королев В.П. Теоретические основы инженерных расчетов стальных конструкций на коррозионную стойкость и долговечность./Научные труды ДГАСА. Вып. 1–95. – Макеевка, 1995 – 110 с.
- [14] ДСТУ 2862-94. Надійність техніки. Методи расчета показателей надежности. Общие требования.

Надійшла до редколегії 28.05.2012 р.