

УДК 624.97:624.014

## **Планирование обслуживания высотных сооружений на основе стоимостных показателей**

**Губанов В.В., к.т.н.**

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, Украина

**Анотація.** У статті аналізуються вартісні характеристики ремонтів і стратегії технічного обслуговування висотних споруд в умовах корозійного зносу. Металеві ґратчасті башти і димарі розглядаються в процесі життєвого циклу з урахуванням особливостей вітрових навантажень. На конкретних прикладах приводяться вартісні характеристики ремонту протикорозійного захисту споруд.

**Аннотация.** В статье анализируются стоимостные характеристики ремонтов и стратегии технического обслуживания высотных сооружений в условиях коррозионного износа. Металлические решетчатые башни и дымовые трубы рассматриваются в процессе жизненного цикла с учетом особенностей ветровых нагрузок. На конкретных примерах приводятся стоимостные характеристики ремонта противокоррозионной защиты сооружений.

**Abstract.** Cost characteristics of repair and maintenance strategies are analysed in the paper for high-rise works under corrosion wear. Steel towers and chimneys are taken during a life cycle allowing for features of wind loads. The cost characteristics are given on repair of corrosion protection for particular high-rise steelworks.

**Ключевые слова:** высотные сооружения, техническое обслуживание, стоимостные показатели, износ.

**Введение.** Высотные сооружения являются широко распространенным классом сооружений. В работе рассматриваются основные виды сооружений с металлическим каркасом – решетчатые башни и дымовые трубы, которые работают в сложных условиях и подвергаются интенсивному износу. Поэтому техническое обслуживание и ремонт данных сооружений для обеспечения требуемой долговечности являются важной проблемой. В имеющихся документах, относящихся к высотным сооружениям, регламентация обслуживания сводится к рекомендациям по обследованию и ремонту для дымовых труб [7, 9] и для сооружений с металлическим каркасом в целом [1]. Но задача технического обслуживания состоит в планировании мероприятий по обслуживанию. Проблема выглядит таким образом: какие мероприятия проводить, в какие сроки и в каком объеме, чтобы обеспечить нахождение параметров сооружения в заданных пределах. Нерешенными остаются конструктивные мероприятия при проектировании сооружения для повышения эффективности обслуживания.

Отдельные аспекты планирования эксплуатации приведены в [3, 4] для промышленных и жилых зданий, согласно которым существует два

метода ремонтів: планово-предупредительный и по результатам обследования. Планирование имеет вид ремонтів с заданной периодичностью на основании усредненных показателей износа. Сравнение стоимостных характеристик вариантов ремонтів и выбор рациональных решений не предусмотрены в данных методах эксплуатации. В [2, 5] рассматриваются экономические аспекты эксплуатации зданий, но без увязки с начальными конструктивными решениями и запасами несущей способности.

Вопросы оптимизации стоимости зданий и методов их обслуживания кратко рассмотрены в [6] для жилых зданий с разнородными конструктивными элементами. В этой работе указывается, что оценка общих затрат на строительство и техническое обслуживание зданий является «достаточно приближенной». В новом капитальном издании [10] рассматриваются в основном организационно-экономические аспекты планирования обслуживания и отмечается, что «ремонтные работы все более становятся не формальным комплексом плановых мероприятий, а объектом управления». Практические рекомендации в упомянутых выше работах относятся к гражданским зданиям и не применимы для высотных сооружений.

В зарубежной практике имеются многочисленные работы (обзор см. в [11]), в которых исследуются вероятностные аспекты планирования обслуживания сооружений в течение жизненного цикла, преимущественно для железобетонных мостов.

Таким образом, актуальным является исследование методов планирования эксплуатации высотных сооружений в течение жизненного цикла, а также влияние начальных конструктивных параметров на стоимость работ по обслуживанию.

**Цель работы.** Формализация конструктивных и эксплуатационных параметров, разработка стоимостных моделей эксплуатации и стратегий обслуживания, а также методов выбора рациональной стратегии обслуживания высотных сооружений в условиях коррозионного износа. Решение этих задач является основой для оптимизации сооружения в течение жизненного цикла с учетом вероятностного характера влияющих факторов, а также построение системы управления обслуживанием на основании корректирующих мероприятий.

**Основная часть.** Начальной стадией для планирования обслуживания на основе стоимостных показателей является формализация основных параметров сооружений, влияющих на технические характеристики отремонтированного сооружения и на стоимостные показатели. В конструктивном отношении высотные сооружения содержат следующие основные элементы:

- стержневые элементы решетчатых несущих конструкций;
- листовые элементы фасонки, ребер, пластин;
- листовая оболочка дымовых труб и газоотводящих стволов;
- конструкции средств доступа: лестницы, площадки, ограждения.

С точки зрения планирования обслуживания нет необходимости рассматривать все возможные виды повреждений этих элементов, поскольку они сводятся к нескольким основным видам ремонта. В табл. 1 представлены основные виды работ и их параметры, необходимые для определения стоимости работ.

Таблица 1

№	Вид работ	Показатели
1.	Ремонт противокоррозионной защиты	$m_k$ – масса конструкций $a_k$ – площадь конструкций $s_k$ – количество слоев покрытия $m_{km}$ – расход материалов $k_{kp}$ – коэффициент способа очистки $k_{ks}$ – коэффициент вида конструкций $k_{kh}$ – коэффициент высоты выполнения работ
2.	Усиление существующих элементов с заменой или без	$m_{rm}$ – масса конструкций усиления $m_{cr}$ – масса конструкций для временного закрепления $k_{rs}$ – коэффициент вида усиливаемых или заменяемых элементов $k_{rh}$ – коэффициент высоты выполнения работ
3.	Устройство средств доступа	$k_{sh}$ – коэффициент вида средств доступа $m_s$ – характеристика объема средств доступа $k_{sh}$ – коэффициент высоты выполнения работ $m_{sl}$ – характеристика устанавливаемого дополнительного оборудования

Структура стоимостных показателей для высотных сооружений имеет важное значение, поскольку в стоимости ремонтных работ существенное значение имеет стоимость средств доступа. Общая стоимость сооружения в течение жизненного цикла составляет:

$$C_{общ} = C_n + C_э,$$

где  $C_n$  – стоимость строительства;  $C_э$  – стоимость обслуживания за требуемый срок службы.

В свою очередь, стоимость строительства металлоконструкций без учета технологического оборудования можно представить в виде

$$C_n = C_m + C_{изг} + C_{стр} + C_{корр} + C_{сд},$$

где  $C_m$  – стоимость материала;  $C_{изг}$  – стоимость изготовления;  $C_{стр}$  – стоимость монтажа;  $C_{корр}$  – стоимость материалов и выполнения противокоррозионной защиты;  $C_{сд}$  – стоимость средств доступа.

Стоимость обслуживания:

$$C_n = C_{осм} + C_{обсл} + C_n + C_{осн},$$

где  $C_{осм}$  – стоимость осмотров;  $C_{обсл}$  – стоимость обследований;  $C_n$  – стоимость подготовительных работ, включает в себя стоимость обустройства рабочего места – лестницы, люльки, установка отводных блоков и т.д.;  $C_{осн}$  – стоимость основных работ по ремонту.

Стоимость  $C_n$  является величиной постоянной, зависящей от параметров сооружения,  $C_9$  – случайной величиной, поскольку часть работ по ремонту можно запланировать и учесть, а часть – зависит от результатов осмотра.  $C_n$  – зависит от вида и объема ремонтных работ, участка выполнения работ (по высоте и в сечении).

Для выполнения численных исследований запишем характеристики стоимости как функции показателей, описывающих работы по обслуживанию. Стоимость работ получается произведением некоторого базового показателя, общего для всех видов сооружений, на поправочные коэффициенты, зависящие от вида сооружения и условия проведения работ. Значения коэффициентов определяются на основании анализа и обобщения сметных расчетов. Соответственно, для ремонта противокоррозионной защиты, усиления, замены и устройства средств доступа получаем:

$$C_{кор} = k_d (a_k c_k (s_k) k_{kp} k_{ks} k_{kh} + a_k m_{km} c_{km});$$

$$C_{yc} = k_d (m_{rm} c_{re} k_{rs} k_{rh} + m_{rm} (c_{rm} + c_{ru}));$$

$$C_{зам} = k_d ((m_{cm} + m_{cr}) c_{re} k_{rs} k_{rh} + m_{cr} c_{cd} k_{rs} k_{rh} + m_{cm} (c_{rm} + c_{ru}));$$

$$C_n = k_d (m_s (c_{se} + c_{sd}) k_{cs} k_{ch} + m_{sl} c_{cl}),$$

где  $c_k(s_k)$  и  $c_{km}$  – стоимость выполнения работ по противокоррозионной защите  $1 \text{ м}^2$  поверхности дымовой трубы высотой до 60 м;  $c_{km}$  – стоимость материалов противокоррозионной защиты на  $1 \text{ кг}$ ;

$c_{re}$  – стоимость монтажа элементов усиления на 1 т для высоты до 25 м;  
 $c_{se}$  – стоимость устройства средств доступа, устанавливается отдельно в зависимости от категории доступа и вида конструкций;  $c_{cd}$ ,  $c_{sd}$  – стоимости демонтажа элементов усиления и средств доступа для тех же показателей;  $c_{rm}$ ,  $k_{cs}$  – стоимость металлопроката и изготовления металлоконструкций на 1 т;  $c_{cl}$  – стоимость установки дополнительного оборудования;  $k_d$  – коэффициент перехода от прямых затрат к сметной стоимости, учитывающий общепроизводственные расходы, статьи затрат по сводному сметному расчету, а также налоги.

Стоимость изготовления средств доступа, конструкций временного закрепления и соответствующих материалов не учитывается, поскольку предполагается, что они являются инвентарными. Стоимость монтажа включает прямые затраты, за вычетом стоимости материалов.

**Стратегия эксплуатации.** Планирование эксплуатации начинается с выбора стратегии эксплуатации. Основным повреждением высотных сооружений является коррозионный износ различных видов, который приводит к уменьшению толщины элементов и снижению несущей способности. Другие виды износа – в виде накопления случайных повреждений (искривлений, погибей и др.) можно свести к снижению несущей способности, аналогичному влиянию коррозионного износа. В зависимости от допустимости износа, его предупреждения или ликвидации последствий можно определить следующие основные стратегии эксплуатации:

1. Без ремонта противокоррозионной защиты с допущением коррозионного износа.
2. Восстановление защитных покрытий для обеспечения полного отсутствия коррозии.
3. Восстановление защитных покрытий с допущением частичного коррозионного износа.
4. Восстановление защитных покрытий с допущением частичного коррозионного износа, а также возможной необходимости ремонта и усиления отдельных элементов.
5. Восстановление защитных покрытий с допущением частичного коррозионного износа, а также замены элементов.

В первой стратегии запас по несущей способности и защита конструкций от коррозии заложены в таком объеме, что обслуживание сводится к редким осмотрам для предотвращения аварийных ситуаций.

Рассмотрим предельный случай эксплуатации конструкций без защитных покрытий. Поскольку ветровая нагрузка является основной на высотные сооружения и зависит от срока службы, то с увеличением срока эксплуатации (и уменьшением остаточного срока службы) расчетная нагрузка на сооружение будет уменьшаться. Соответственно, несущая способность будет обеспечена при меньших сечениях элементов. В табл. 2 приведены минимально допустимые толщины элементов и соответствующие им скорости износа для башен и дымовых труб.

Таблица 2

Срок эксплуатации, лет	Дымовые трубы		Решетчатые башни	
	минимальная толщина	скорость коррозии, мм/год	минимальная толщина	скорость коррозии, мм/год
0	10,0	–	10,0	–
5	9,4	0,11	9,4	0,12
10	9,2	0,08	9,2	0,09
20	8,6	0,07	8,5	0,08
25	7,8	0,09	0,08	0,08
30	–	–	7,4	0,09
35	–	–	6,2	0,11
40	–	–	–	–

Значения в табл. 2 получены при следующих условиях:

- доля постоянной нагрузки в начале эксплуатации принята 15 % от полной;
- учтено увеличение доли постоянной нагрузки с увеличением срока службы;
- несущая способность стержневых элементов линейно зависит от толщины элемента; для оболочек труб, рассчитываемых на устойчивость, данная зависимость принята в запас квадратичной.

Из табл. 2 видно, что допустимыми оказываются скорости коррозионного износа, соответствующие среднеагрессивной среде. Представляет интерес зависимость допустимых скоростей износа от начальной толщины элементов (рис. 1). Из графика видно, что допустимая скорость износа увеличивается с увеличением начальной толщины элементов. Это связано с тем, что влияние спада ветровой нагрузки возрастает с увеличением толщины элементов. Поскольку начальная защита поверхности металлоконструкций должна быть выполнена, реальные скорости коррозии могут быть выше. Следует отметить, что данные скорости являются средними, в большинстве высотных сооружений имеются области, где износ выше.

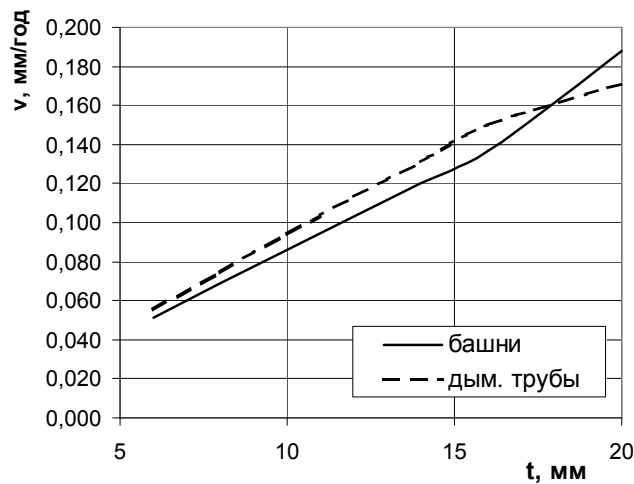


Рис. 1. Зависимость допустимых скоростей износа от начальной толщины элементов

В [8] подразумевается использование второй стратегии поскольку запас несущей способности не допускается, также не допускается увеличение толщины элементов с учетом коррозионного износа. Вместе с тем, в типовых проектах дымовых труб малых котельных заложен запас по толщине: при проектных 4...6 мм толщины оболочки оговаривается минимальная толщина 3 мм. В более явном виде этот подход использован в международных нормах проектирования металлических дымовых труб CICIND [12], где назначается запас по толщине 0...3 мм в зависимости от агрессивности среды и используемых материалов (отсутствие запаса соответствуют использованию коррозионно-стойких сталей).

Следует отметить, что в любом случае при устройстве ремонтного покрытия будет иметь место повреждение предыдущего покрытия, а следовательно и какая-то степень коррозионного износа конструкций. Поэтому осуществление этой стратегии возможно, если восстанавливать защитное покрытие до его разрушения.

В качестве примера рассмотрим дымовую трубу высотой 60 м. В табл. 3 приводится сметная стоимость восстановления для различных типов покрытий на единицу массы трубы (в ценах 2009 г.). Показатели стоимости работ определены на основе составления смет в комплексе АВК-5. Стоимости материалов приняты по отпускным ценам поставщиков. Количество восстановлений покрытий принято на основании опыта эксплуатации сооружений и данных справочной литературы для срока службы 30 лет. Общая стоимость определялась по формуле

$$C = \sum_{i=1}^n C_i (1 + \alpha)^{-t_i},$$

где  $n$  – количество восстановления покрытий;  $t_i$  – время до восстановления покрытия;  $\alpha$  – коэффициент приведения разновременных затрат (принимался 0,1).

Таблица 3

Вид окрасочных материалов	Стоимость, грн./т				Кол-во восстановлений покр.	Общая стоимость, грн./т
	Работы по окрашиванию	Материалы	Устройство средств доступа	Всего		
Акрил-стирольная	664,1	320,0	181,4	1165,5	8	3502,7
ХС-010 + 2 сл. ХВ-785	664,1	508,2	181,4	1353,8	5	2930,2
Миоцинк	664,1	658,8	181,4	1504,3	4	2686,2
ЭП-057 + ЭП773	664,1	4592,9	230,6	5487,6	2	6801,3

Из табл. 3 видно, что наиболее оптимальным является использование покрытий средней стоимости со сроком службы 6...8 лет. В этом случае стоимость обслуживания труб составляет 12...18 % процентов от первоначальной стоимости конструкций. Для башен срок службы больше и больше площадь элементов на тонну. Поэтому стоимость обслуживания составляет для тех же покрытий 5400...5650 грн./т, а процент от первоначальной стоимости 20...25 %.

Третья стратегия включает в себя комбинацию первых двух. Возможны следующие варианты стратегии при скоростях износа выше указанных в табл. 2:

- восстановление требуемое количество раз противокоррозионной защиты для достижения необходимых показателей долговечности;
- увеличение толщины элементов.

Для дымовой трубы, рассмотренной выше, при средней толщине стенки 10 мм увеличение толщины на 2 мм приводит к увеличению стоимости строительства на 20 % при максимально допустимой скорости коррозии 0,07 мм/год, характерной для среднеагрессивной среды. По стоимости это сопоставимо со стоимостью восстановления противокоррозионной защиты. Поэтому данное решение может оказаться эффективным для сооружений с толщиной элементов более 16 мм: высоких дымовых труб и решетчатых башен высотой более 100 м с решеткой из толстостенных труб.



При планировании мероприятий с использованием четвертой стратегии необходимо учесть:

- неоднородность коррозионного износа элементов сооружения в зависимости от их конструктивных особенностей и высоты;
- разную степень ремонтпригодности элементов, например, значительно труднее усилить фасонки башен и пояса, чем элементы решетки;
- особенности повреждаемости различных элементов сооружения;
- соотношение стоимости постоянных средств доступа на конструкции и устройства временных монтажных.

Пятая стратегия относится к второстепенным элементам высотных сооружений – лестницам, площадкам, ограждению, молниезащите. Из-за меньшей толщины эти элементы более чувствительны к износу, а восстановление их защитных покрытий без окрашивания всех конструкций не производится из-за высокой стоимости вспомогательных работ. Если использовать вторую стратегию, то стоимость ремонта защитных покрытий будет составлять 30...40 % от их первоначальной стоимости.

### **Выводы**

1. Проведенный анализ стоимостных показателей восстановления противокоррозионной защиты показал, что наиболее экономичным решением для высотных сооружений типа дымовых труб и решетчатых башен является использование покрытий со сроком службы 6...8 лет. При этом учет имеющихся запасов несущей способности элементов и характеристик ветровых нагрузок позволяет получить дополнительную экономию из-за уменьшения числа восстановлений защитных покрытий.
2. Предложенный подход к планированию мероприятий возможно использовать для локальных повреждений конструкций, ремонт которых включает усиление и замену отдельных элементов, а также для высотных сооружений с другими конструктивными параметрами.
3. Износ конструкций имеет вероятностную природу, поэтому для планирования мероприятий по техническому обслуживанию высотных сооружений с заданным уровнем достоверности необходимо выполнить статистический анализ экономических факторов и параметров износа и разработать соответствующие методики для принятия решений.

### **Литература**

- [1] ДБН 362–92. Оцінка технічного стану сталевих конструкцій виробничих будівель і споруд, що знаходяться в експлуатації / Держбуд України. – К.: Укрархбудінформ, 1995. – 47 с.
- [2] Колотилкин Б.М. Надежность функционирования жилых зданий. М.: Стройиздат, 1989. – 376 с.

- [3] Нормативні документи з питань обстежень, паспортизації, безпечної та надійної експлуатації виробничих будівель і споруд / Держкомітет будівництва, архітектури та житлової політики України. – Київ, 1997. – 144 с.
- [4] ОРД 00 000 89. Техническая эксплуатация стальных конструкций производственных зданий // Министерство черной металлургии СССР. – М., 1989. – 96 с.
- [5] Перельмутер А.В. Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций. / Научное издание. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2007. – 256 с.
- [6] Ройтман А.Г. Надежность конструкций эксплуатируемых зданий. – М. Стройиздат, 1985. – 175 с.
- [7] Руководство по эксплуатации промышленных дымовых и вентиляционных труб / Российский комитет по металлургии – М.: 1993. – 92 с.
- [8] СНиП II-23-81\*. Стальные конструкции / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990. – 96 с.
- [9] СП 13-101-99. Правила надзора, обследования, проведения технического обслуживания и ремонта промышленных дымовых и вентиляционных труб. – М.: Госстрой России, 1999. – 25 с.
- [10] Тарасевич Е.И. Управление эксплуатацией недвижимости. – СПб.: Издательство “МКС”, 2006. – 838 с.
- [11] Frangopol DM, Kurt Maute. Life-cycle reliability-based optimization of civil and aerospace structures. In Computers and structures No 81, 2003. – P. 397 – 410.
- [12] Model Code for Steel Chimneys. CICIND, 1999.

*Надійшла до редколегії 01.07.2009 р.*