



РОЗРАХУНКОВІ МОДЕЛІ "СТАРІННЯ" ТА ЕКОНОМІКА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ОГОРОДЖУЮЧИХ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЛИСТОВИХ КОНСТРУКЦІЙ (НА ПРИКЛАДІ СТАЛЕВИХ РЕЗЕРВУАРІВ)

Є. А. Єгоров

*Кафедра "Металеві і дерев'яні конструкції",
Придніпровська державна академія будівництва і архітектури,
вул Чернишевського, 24-А, м. Дніпропетровськ, 49000, Україна.*

Отримана 18 січня 2006; прийнята 1 лютого 2006

Анотація. На прикладі сталевих резервуарів розглянуто особливості процесу старіння і визначення довговічності огороджуючих конструктивних елементів листових конструкцій, виділяються відмови локальні (які відновлюються) та повні. Як критерій вичерпання технічного ресурсу приймається сукупність дефектів та пошкоджень, які мають місце в конструкціях. Розглянуто деякі економічні аспекти такого підходу.

Ключові слова: корозія, корозійний знос, дефекти, пошкодження, наробка на відмову, довговічність.

РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ "СТАРЕНИЯ" И ЭКОНОМИКА ЭКСПЛУАТАЦИИ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЛИСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ (НА ПРИМЕРЕ СТАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ)

Е. А. Егоров

*Кафедра "Металлические и деревянные конструкции",
Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры,
ул. Чернышевского, 24-А, г. Днепропетровск, 49000, Украина.*

Получена 18 января 2006; принята 1 февраля 2006

Аннотация. На примере стальных резервуаров рассматриваются особенности процессов старения и определения долговечности ограждающих конструктивных элементов листовых конструкций, выделяются отказы локальные (восстанавливаемые) и полные. В качестве критерия истощения технического ресурса принимается совокупность имеющихся в конструкциях дефектов и повреждений. Рассмотрены некоторые экономические аспекты такого подхода.

Ключевые слова: коррозия, коррозионный износ, дефекты, повреждения, наработка на отказ, долговечность.

ANALUTICAL MODELS OF "AGEING" AND ECONOMY OF MAINTENANCE OF SHIELDING STRUCTURAL MEMBERS LEAF OF CONSTRUCTIONS (ON AN EXAMPLE OF STEEL CONTAINERS)

Ye. A. Yegorov

*The Metal and Wood Structures Department,
Pridneprovskaya State Academy of Civil Engineering and Architecture,
Chernishevski Str., 24, Dnepropetrovsk, 49000, Ukraine.*

Received January 18, 2006; accepted February 1, 2006

Abstract. The degradation processes and definition of durability of sheet structures guarding constructions is examined by steel tanks. Local refusal that can be removal and common refusal are distinguished. Technical resources exhausting criterion is accepted the totality of defects and damages in structures. Some economic aspects of such approach are considered.

Key words: corrosion, corrosive wear, defects, damage, time to failure, durability.

Введение

Как правило, в состав листовых конструкций входят не только несущие конструктивные элементы, но и конструктивные элементы, основное назначение которых ограничивается ограждающими функциями. При этом очень часто весовая и стоимостная доли этих элементов оказываются весьма значительными и существенным образом влияют на общие технико-экономические показатели. Обычные расчетные алгоритмы, применяемые для определения долговечности, оценки технического состояния и остаточного ресурса несущих конструкций в данном случае не срабатывают, поскольку физическая природа отказов ограждающих конструкций является принципиально иной и это создает ряд нетрадиционных проблем.

2. Особенности старения ограждающих конструкций стальных резервуаров

В данной статье указанные выше аспекты рассматриваются применительно к стальным вертикальным цилиндрическим резервуарам, используемым для хранения нефти и нефтепродуктов. Центральная часть днища и настил кровли этих сооружений выполняют сугубо ограждающие функции. Удельный вес их в общей металлоемкости резервуаров доходит до 40-45% и более. Основным функциональным

требованием к таким конструкциям является обеспечение герметичности, а основным механизмом, способным нарушить это требование и привести к отказу, является коррозия. Многочисленные обследования резервуаров, используемых для хранения товарных нефтепродуктов (бензины, керосин, дизельное топливо и др.) показывают, что практически всегда в общем коррозионном износе можно выделить коррозию локальную (язвины, питтинги, борозды, пятна и т.д.) и коррозию равномерную. Анализ кинетики коррозионных повреждений показывает, что скорость локальной коррозии v_{loc}^{dn} днища, может составлять 0.20-0.50 мм/год, а скорость равномерной коррозии v^{dn} находится в пределах 0.005-0.015 мм/год. Для кровли равномерная скорость коррозии v^{kp} примерно такая же, а скорость локальной коррозии составляет $v_{loc}^{kp} = 0.15-0.30$ мм/год. Возникновение локальных повреждений однозначно определяет наступление отказа, однако устранение таких отказов, как правило, не вызывает особых затруднений и такие отказы могут считаться восстанавливаемыми и действительно восстанавливаются при проведении периодических ревизий (диагностика+ремонт) технического состояния резервуаров. Очевидно, что

равномерная коррозия должна приводить к общему старению указанных выше конструктивных элементов и определять, таким образом, их долговечность. Вместе с тем, статистические данные по срокам проведения капитальных ремонтов с полной заменой днища и кровли находятся в явном несоответствии с указанными выше скоростями $v_{дн}$ и $v_{кр}$. Так, если по приведенным выше значениям $v_{дн}$ долговечность

днища толщиной $t_0 = 4$ мм должна составлять несколько сотен лет, то в действительности полная отбраковка днища указанной толщины осуществляется в среднем через 24-32 года эксплуатации. Аналогичная ситуация имеет место и применительно к кровле. Отмеченное объясняется тем, что помимо коррозионных повреждений, причинами отбраковки рассматриваемых конструктивных элементов могут быть неравномерные осадки, нарушения геометрической формы, образование сквозных пор в сварных швах, а также различные виды дефектов изготовления и монтажа. Естественно, что все подобные факторы оказывают комплексное влияние на работоспособность. Вместе с тем очевидно также и то, что количественная оценка этого влияния связана с целым рядом неопределенностей, поскольку здесь не срабатывают такие общепринятые и универсальные критерии, как условия прочности, устойчивости или деформативности. Указанное обстоятельство привело к тому, что в соответствующих нормативных документах [1, 2, 3 и др.] условия общей отбраковки, т.е., условия, определяющие полное исчерпание технического ресурса днища или кровли, попросту отсутствуют. Все это в значительной мере затрудняет осознанное проектирование рассматриваемых ограждающих конструкций. Именно этим объясняется и тот факт, что в нормативных указаниях и типовых проектах очень часто закладываются технические параметры, весьма далекие от оптимальных.

3. Сущность и пример применения критерия отказа по совокупности имеющихся дефектов и повреждений.

В данной работе предлагается решение обозначенных здесь проблем на основе активного

использования имеющейся статистики, как по кинетике развития физического износа, так и по продолжительности безотказной эксплуатации рассматриваемых сооружений. В качестве критерия исчерпания долговечности принимается состояние, характеризующееся определенной совокупностью имеющихся дефектов и накопленных повреждений. В [4] такое состояние трактуется как третье предельное состояние для любых строительных конструкций зданий и сооружений, а в качестве количественного его критерия принимается параметр:

$$K = A_{np} / A_{\phi} \quad (1)$$

где A_{np} и A_{ϕ} — численные значения проектной и фактической работоспособности рассматриваемого объекта.

Определение указанного параметра в каждом конкретном случае не является на сегодняшний день прозрачным, и все же авторы [4] на основе физических соображений и логических предположений установили, что во всех случаях предельное значение K можно считать равным $K^* = 1.8-2.0$.

Применительно к днищу и кровле вертикальных резервуаров можно считать, что основным параметром, определяющим их работоспособность, является толщина листов. По отношению к A_{np} такое предположение полностью отвечает действительному положению дел, а A_{ϕ} может характеризоваться таким эквивалентным значением толщины $t_{\text{экв}}$, которое бы формально учитывало комплексное влияние на работоспособность всех наиболее значимых факторов. Тогда параметр K будет определяться отношением:

$$K = t_0 / t_{\text{экв}} \quad (2)$$

а значение $t_{\text{экв}}$ в предельном состоянии будет равно:

$$t_{\text{экв}}^* = t_0 / K^* = t_0 / 1.8 = 0.556 t_0. \quad (3)$$

Зная $t_{\text{экв}}^*$ и статистические оценки времени T^* наработки ограждающих элементов на отказ, можно определить скорость фактического обобщенного износа V :

$$V = (t_0 - t_{\text{экв}}) / T^* \quad (4)$$

Наиболее объективная и интегральная оценка параметра T^* может быть получена на основе соответствующих статистических данных. В данном случае автор располагал данными по 238 резервуарам, в которых были проведены капитальные ремонты с полной заменой днища или кровли. В итоге было получено, что математическое ожидание M_{T^*} для днища толщиной $t_0 = 4$ мм составляет 27 лет, а для настила кровли толщиной $t_0 = 2.5$ мм. это значение равно 40 годам.

4. Экономические аспекты проектирования ограждающих конструкций

Базируясь на приведенных выше рассуждениях и данных, можно построить расчетную модель процесса старения того или иного конструктивного элемента, выполняющего ограждающие функции. На рис. 1 приведены графические иллюстрации процесса наработки на отказ

днища стального вертикального цилиндрического резервуара объемом 20 тыс. м³, используемого для хранения товарных нефтепродуктов. Построения осуществлялись при следующих исходных данных и ограничениях: начальная толщина днища принималась равной $t_0 = 4.0$ мм и $t_0 = 6.0$ мм; ограничение по обобщенному износу принималось, ориентируясь на условие $K^* = 2$, тогда $t_{экр}^* = 3.0$ мм при $t_0 = 6.0$ мм и $t_{экр}^* = 2.0$ мм при $t_0 = 4.0$ мм; ограничения по локальному коррозионному износу в обоих случаях принимались равными $t_{лок}^* = 2.0$ мм; скорость обобщенного износа $V = 0.074$ мм/год; скорость локального коррозионного износа

$v_{loc}^{дн} = 0.35$ мм/год; требуемый срок эксплуатации резервуара $T_p = 50$ лет; период $\Delta\tau$ между очередными техническими ревизиями должен быть не менее 2 лет.

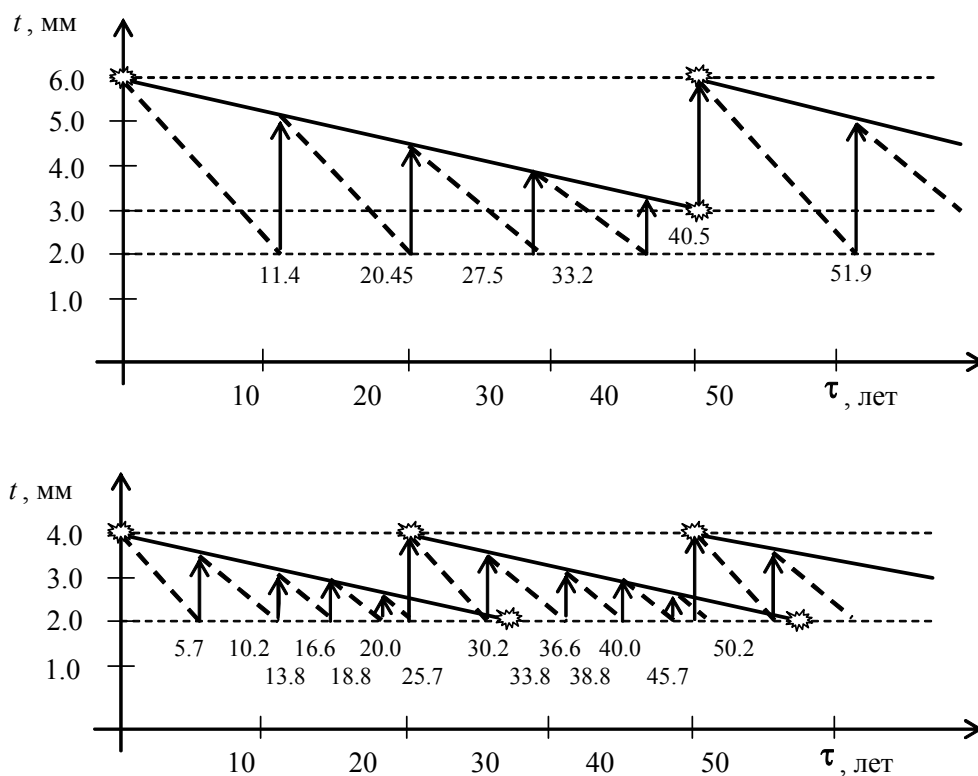


Рисунок 1. Процессы "старения" днища резервуара 20 тыс. м³: — обобщенный (невосстанавливаемый износ; - - - - - локальный восстанавливаемый износ.

Из приведенных графиков видно, что при $t_0 = 6.0$ мм первый отказ по локальному износу днища может произойти через 11.4 года после начала эксплуатации. Это означает, что и первая после начала эксплуатации ревизия должна быть проведена не позднее, чем через 11.4 лет. Второй такой же отказ может произойти через 20,45 лет эксплуатации и соответственно вторая ревизия должна быть проведена не позднее этого срока, и т.д. Полное исчерпание технического ресурса (долговечности) может произойти через 40.5 года. После указанного срока эксплуатации может потребоваться капитальный ремонт резервуара с полной заменой днища. При толщине днища $t_0 = 4.0$ мм потребуется дважды произвести полную замену днища. При этом для такой толщины днища предельное состояние (состояние отбраковки) достигается в результате того, что через 20 лет после начала эксплуатации период Δt между требуемыми очередными обследованиями становится меньше 2-х лет.

Нужно отметить, что в данном случае графики процесса "старения" строились по математическим ожиданиям всех определяющих его параметров. В действительности коррозионный износ, как и физический износ вообще, имеет ярко выраженную вероятностную природу, поэтому все такие прогнозные модели должны формулироваться в вероятностной постановке. Примером такого моделирования могут служить работы [5, 6].

Возможность построения прогнозных моделей изменений технического состояния ограждающих конструкций в процессе эксплуатации позволяет ставить задачу определения наиболее рациональных их параметров. Если рациональность определять общей стоимостью затрат на строительство и эксплуатацию, то для такой оценки может быть использована формула, которая в общем случае будет иметь следующий вид:

$$C_p = C_0^* + \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{\zeta=1}^m c_{\zeta k} x_{\zeta k} \exp[-r^*(\tau_k - \tau_0)] + \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{j=1}^n s_{jk} y_{jk} \exp[-r^*(\tau_k - \tau_0)] + \int_{\tau_0}^{\tau_p} \omega^* \exp(-r^* \tau_k) d\tau, \quad (5)$$

где C_0^* – стоимость работ по устройству днища на этапе строительства резервуара;

τ_0 – время, соответствующее началу эксплуатации;

τ_k – время соответствующее k -му временному интервалу в пределах заданной продолжительности эксплуатации $[\tau_0, T_p]$;

τ – текущее значение времени в интервале $[\tau_0, T_p]$;

$x_{\zeta k}$ – обозначение ζ -го вида диагностики, проводимого в контрольной точке k временного интервала $[\tau_0, T_p]$;

y_{jk} – обозначение j -го конструктивного элемента, подлежащего ремонту в контрольной точке k временного интервала $[\tau_0, T_p]$;

$c_{\zeta k}, s_{jk}$ – стоимости соответственно ζ -го вида диагностики и ремонта j -го конструктивного элемента в контрольной точке k временного интервала $[\tau_0, T_p]$;

m – количество рассматриваемых возможных вариантов диагностики в контрольной точке i временного интервала $[\tau_0, T_p]$;

n – количество конструктивных элементов резервуара;

N – количество контрольных точек i во временном интервале $[\tau_0, T_p]$;

ω^* – величина ущерба, который должен определяться убытками от простоев резервуара в периоды проведения ревизий технического состояния (традиционное для нефтяных резервуаров определение ω^* по гипотетическим потерям нефтепродукта, во-первых, не имеет какой-либо приемлемой оценки, во-вторых, в данном случае, концепция определения отказа по нормативным признакам практически равносильна концепции полного исключения каких-либо потерь нефтепродукта и это требование представляется вполне логичным);

r^* – параметр дисконтирования разновременных денежных затрат, вычисляемый по формуле $r^* = \ln(1 + r_0)$, где r_0 – банковская ставка.

Рассматривая (5) применительно к днищу, при всех выше принятых исходных данных и ограничениях, и руководствуясь сложившимися на данное время стоимостными показателями диагностики и ремонтных работ, можно осуществить стоимостной анализ нескольких возможных вариантов различными значениями t_0 .

Такие данные приведены в таблице 1 (без дисконтирования затрат во времени, т.е. при $r_0=0$) и в таблице 2 (с учетом банковской ставки $r_0=0.05$). Верхним индексом "*" отмечены варианты с минимальными затратами.

Из приведенных результатов видно, что при оценке общих затрат без дисконтирования их во времени наибольшая эффективность достигается в случаях, когда для более продолжительной эксплуатации резервуаров применяются днища с увеличенной толщиной стенки. Расчеты с учетом дисконта убеждают в том, что с увеличением общей продолжительности эксплуатации резервуара первоначальное значение толщины днища не имеет большого значения,

но, с другой стороны, применяя днища минимальной толщины, можно существенно уменьшить требуемую величину капиталовложений на этапе строительства, отнеся их на более поздний срок. Для сравнения и примерной оценки эффективности предложенного здесь подхода можно отметить, что в действующих на сегодняшний день ведомственных нормах [7] рекомендуется проектировать днище толщиной $t_0=6.0$ мм при нормативной долговечности резервуара $T_p=20$ лет. Как следует из таблиц, только на днище и только на одном резервуаре это приводит к перерасходу денежных средств в размере от 70 до 90 тыс. грн.

Таблица 1. Полные затраты на эксплуатацию днища резервуара объемом 20 тыс. м³ без учета дисконтирования затрат во времени, тыс. грн.

№№ п/п	Толщина t_0 , мм	Расчетный (требуемый) срок эксплуатации, лет				
		20	30	35	40	50
1	4	<u>284.8*</u> 574.1	605.25	---	<u>636.4</u> 925.7	956.9
2	5	307.3	343.0*	<u>369.9*</u> 731.4	738.8	750.1
3	6	352.6	363.3	---	<u>400.6*</u> 734.4	743.4*

Таблица 2. Полные затраты на эксплуатацию днища резервуара объемом 20 тыс. м³ с учетом дисконтирования затрат при банковской ставке 5%, тыс. грн.

№№ п/п	Толщина t_0 , мм	Расчетный (требуемый) срок эксплуатации, лет				
		20	30	35	40	50
1	4	<u>253.4*</u> 359.8	364.4	---	<u>371.2</u> 410.2	411.7
2	5	292.2	301.6*	<u>311.5*</u> 374.3	375.3	376.1*
3	6	342.4	347.2	---	<u>350.9*</u> 409.6	410.3

Заключение

Таким образом, в качестве критерия наступления предельного состояния, определяющего долговечность днища и кровли стальных вертикальных цилиндрических резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов, равно как

и большинства других видов ограждающих конструктивных элементов, может быть принята критическая совокупность имеющихся дефектов и накопленных повреждений. Время накопления конструкциями такой критической совокупности может быть определено набором

соответствующих статистических данных, а обобщенная скорость этого процесса путем сопоставления проектных (исходных) и фактических значений характерных параметров на основе зависимостей (2)-(4). Применение такого подхода позволяет получать существенную экономию стоимостных затрат, особенно на этапе строительства.

Литература

1. Правила технической эксплуатации резервуаров и инструкции по их ремонту. Госкомнефтепродукт СССР, утверждено 26.12.1986г. - М.: Недра, 1988.- 269 с.
2. Инструкция по техническому надзору, методам ревизии и отбраковке трубчатых печей, резервуаров, сосудов и аппаратов нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств.- ИТН-93. - Волгоград, 1995. - С. 189.
3. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов// Стандарт организации ЦНИИПСК им. Мельникова, ПИ Нефтеспецстройпроект, ВНИИМонтажспецстрой, Трест Коксохиммонтаж. - М., 2004.-64 с.
4. Горохов Е.В., Муцанов В.Ф., Югов А.М., Горлышкин В.Т., Шелихова Е.В. Оценка безопасности эксплуатируемых сооружений на основе понятия третьего предельного состояния//Металеві конструкції.-Макіївка: Донбаська ДАБтаА, 2002.-Т.5.-№1.-С. 97-101.
5. Егоров Е.А., Семенец С.С. Оценка периодичности технических обследований нефтяных резервуаров, находящихся в эксплуатации//Металеві конструкції.-Макіївка: Донбаська ДАБА, 2002.-Т.5.-№1.-С. 71-74.
6. Егоров Е.А., Семенец С.С. Оптимизация нефтяных резервуаров по критерию минимума полных ожидаемых затрат//Сб. Научн. трудов ПГАСА "Строительство, материаловедение, машиностроение" (Диагностика в строительстве), г. Днепропетровск.-2002.-Вып.18.-С. 74-81.
7. ВБН В 2.2-58.2-94. Резервуари вертикальні сталеві для зберігання нафти і нафтопродуктів з тиском насичених парів не вище 93.3 кПа / Державний Комітет України по нафті і газу. - Київ, 1994.-С.95.

Егоров Євген Аркадійович — завідувач лабораторії надійності резервуарних конструкцій, професор кафедри "Металеві і дерев'яні конструкції" Придніпровської державної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: продовження нормальної експлуатації найбільших резервуарів, проблеми підсилення листових конструкцій.

Егоров Евгений Аркадьевич — заведующий лаборатории надежности резервуарных конструкций, профессор кафедры "Металлические и деревянные конструкции" Приднепровской государственной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: продолжение нормальной эксплуатации наибольших резервуаров, проблемы усиления листовых конструкций.

Yegorov Yevgen Arkadiyevich — manager of laboratory of reliability of reservoir structures, Professor of Department "Metal and Wooden Structures" Pridneprovskaya State Academy of Construction and Architecture. Scientific interests: further normal maintenance of the large-sized reservoirs, problem of the amplification of sheet structures.