

УДК 624.95:620.193

**С. Б. ПЧЕЛЬНИКОВ, Е. А. КРИВЕНКО, Р. Б. НИКИТИН**

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры

## **ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОРРОЗИОННОГО ИЗНОСА НА СРОК ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕЗЕРВУАРОВ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ НЕФТЕПРОДУКТОВ**

В данной статье рассматривается взаимосвязь степени и скорости коррозионного износа элементов резервуара на срок его службы путем оценки изменения НДС во времени. Определяются зависимости, описывающие изменение НДС от величины коррозионного износа и от остаточной толщины стенки. Представленный в работе подход позволяет прогнозировать срок эксплуатации резервуара в соответствии с приведенной стратегией обслуживания.

**резервуар, напряжения, НДС, эксплуатация, коррозионный износ**

### **ВВЕДЕНИЕ**

Интенсивное расширение резервуарного парка Украины происходило в период с 1960 по 1990 г.г. Но в последующие годы темпы строительства в значительной мере снизились. На сегодняшний день около 74 % стальных резервуаров находится в эксплуатации более 20 лет (это нормативный срок службы), около 40 % более 30 лет. Вопрос обслуживания таких объектов выходит на первое место при обеспечении их надежной эксплуатации, т. к. старение резервуарного парка приводит к увеличению эксплуатационных затрат и к снижению общего уровня надежности.

В процессе эксплуатации в стальных резервуарах, используемых для хранения нефти и нефтепродуктов, накапливаются повреждения, которые снижают надежность резервуара. Интенсивность и характер физического износа нефтяных резервуаров зависит, прежде всего, от следующих факторов:

- коррозионная активность хранимого продукта;
- частота заполнений резервуара нефтепродуктом;
- температура окружающей среды (в основном, влияние оказывают низкие зимние температуры);
- грунтовые условия.

Наиболее распространенным видом износа нефтяных резервуаров является коррозия. Скорость и характер коррозии может изменяться в широком диапазоне в зависимости от вида хранимого продукта, условий контакта поверхностей конструктивных элементов с коррозионной средой, частотой нагружений резервуара и др. В данной работе рассматривается лишь равномерный коррозионный износ цилиндрической стенки резервуара.

Для определения мероприятий по обслуживанию и эксплуатации резервуаров необходимо знать законы изменения основных характеристик напряженно-деформированного состояния в зависимости от коррозионного износа резервуара, как наиболее распространенного и опасного фактора физического износа, и их граничные значения. Зная эти величины, можно прогнозировать как время и состав мероприятий, так и возможные риски вследствие отсутствия проведения мероприятий.

### **ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ**

Для решения задачи был выбран типовой стальной вертикальный цилиндрический резервуар объемом 1 000 м<sup>3</sup>, выполненный из малоуглеродистой стали с расчетным сопротивлением 240 МПа. Высота данного резервуара составляет 12 м, диаметр – 10,4 м. Исследуемая цилиндрическая стенка состоит из шести поясов шириной по 2 м каждый.

Основными эксплуатационными нагрузками являются гидростатическое давление хранимого нефтепродукта и избыточное давление паров в газовом пространстве резервуара. Указанные нагрузки приводят к возникновению в большей части стенки растягивающих напряжений. Способность восприятия рассмотренных нагрузок обеспечивается прочностью поясов цилиндрической стенки.

При отсутствии в резервуаре нефтепродукта опасными для стенки становятся нагрузки, вызывающие возникновение в ней напряжений сжатия. В меридиональном направлении это нагрузки от собственного веса конструкций и оборудования, установленного на крыше, снеговая нагрузка и вакуум, который может образоваться в газовом пространстве резервуара. В радиальном направлении это ветровая нагрузка и тот же вакуум. Сопrotивляемость указанным нагрузкам обеспечивается устойчивостью цилиндрической стенки.

Был произведен расчет толщины стенки, на вышеизложенные комбинации нагрузок, по прочности и по устойчивости. Также были учтены конструктивные требования норм, предъявляемые к данному резервуару. Данные расчетов и требования норм приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Определение толщины стенки

Критерий	Нормативные требования	Значение	Ед. изм.
Обеспечение прочности	$t \geq \frac{n_1 H \gamma + n_2 P}{\gamma_c R_{\text{дуп}}} \cdot r$	2,9	мм
Обеспечение устойчивости	$\frac{\sigma_1}{\sigma_{\text{кр1}}} + \frac{\sigma_2}{\sigma_{\text{кр2}}} \leq \gamma_c$	3,8	мм
Конструктивные требования	Табл. 5 [1] при $D \leq 15$ м	5	мм

Так как наиболее распространенным видом износа является коррозия, скорость и характер которой меняется в зависимости от хранимого продукта, условий контакта поверхностей конструктивных элементов с коррозионной средой, частотой нагружений резервуара, проводилось зонирование с учетом коррозионного воздействия (рис. 1).

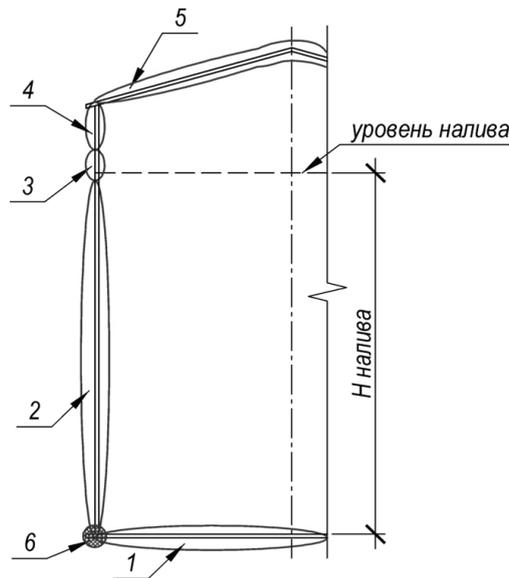


Рисунок 1 – Зонирование с учетом коррозионного воздействия: 1 – зона коррозии дна при взаимодействии с хранимым продуктом, осадком от хранимого продукта, осевшими продуктами коррозии от расположенных выше конструкций; 2 – зона коррозии стенки при взаимодействии с хранимым продуктом; 3 – зона коррозии стенки с периодичным смачиванием; 4 – зона коррозии стенки в паровоздушной среде; 5 – зона коррозии элементов крыши в паровоздушной среде; 6 – зона уторного узла.

Расчет должен производиться с учетом различных скоростей коррозии по отдельным зонам, что значительно усложняет моделирование процесса коррозионного износа. Как один из вариантов решения данной проблемы, можно моделировать лишь равномерный коррозионный износ, а различные скорости развития данного процесса по зонам учитывать поправочными коэффициентами.

Для определения показателей НДС стенки резервуара производилось моделирование данного резервуара в проектно-вычислительном комплексе SCAD (рис. 3а) и в расчетном комплексе Lira (рис. 3б). Расчетная схема представлена на рисунке 2.

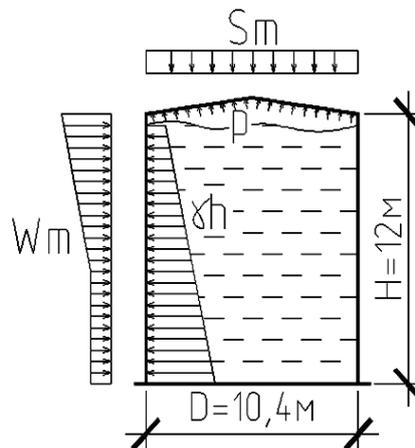


Рисунок 2 – Расчетная схема резервуара.

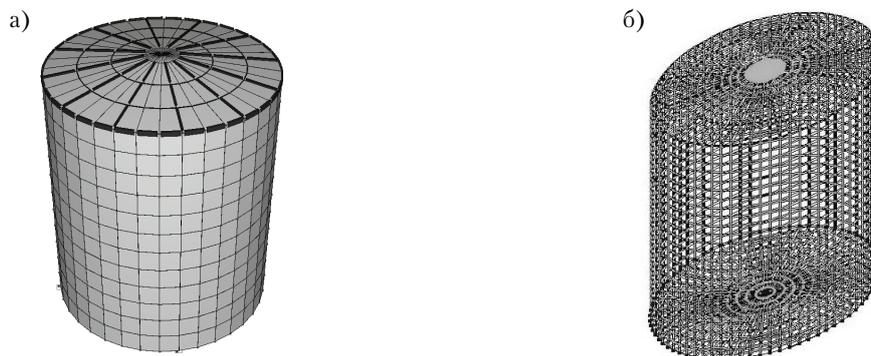


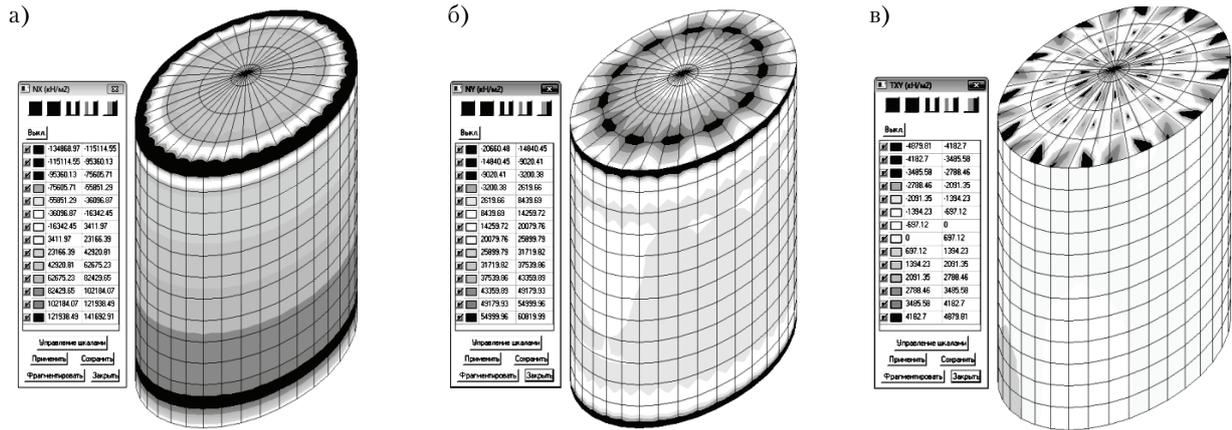
Рисунок 3 – Расчетные модели резервуаров: а – расчетная модель резервуара в среде SCAD; б – расчетная модель резервуара в среде Lira.

Учитывалось, что при равномерном коррозионном износе цилиндрической стенки происходит потеря определенной части толщины стенки ( $\Delta t$ , мм). Был построен ряд моделей в SCADe и Lira с разной толщиной стенки с учетом равномерного коррозионного износа всей стенки, т. е. без перепада значений по различным поясам для одной модели.

В результате расчета были получены поля напряжений (меридиональных, кольцевых и касательных) в элементах стенки (рис. 4), которые в дальнейшем были использованы при определении характера зависимости напряженно-деформированного состояния резервуара от величины коррозионного износа оценкой по приведенным напряжениям:

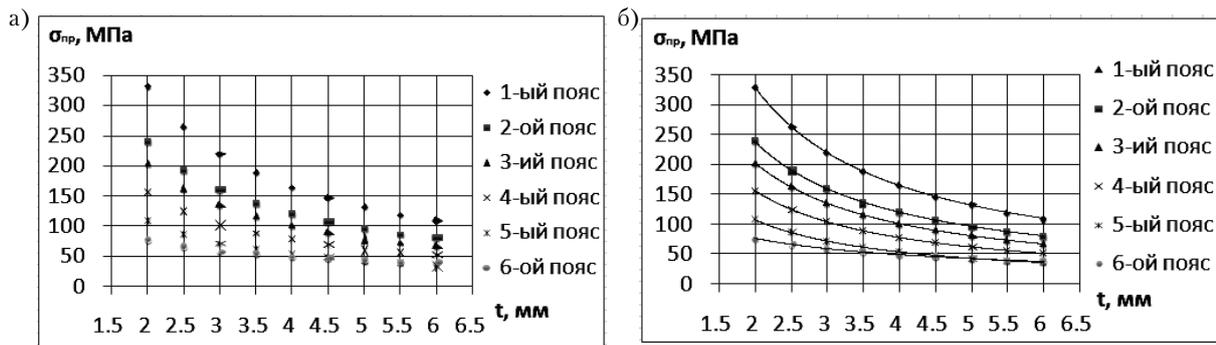
$$\sigma_{np} = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2 + 3\tau^2}, \quad (1)$$

где  $\sigma_1$  – меридиональные напряжения;  
 $\sigma_2$  – кольцевые напряжения;  
 $\tau$  – касательные напряжения.



**Рисунок 4** – Поля напряжений от расчетного сочетания нагрузок: а – кольцевые напряжения; б – меридиональные напряжения; в – касательные напряжения.

На рисунке 5 представлен график зависимости приведенных напряжений  $\sigma_{np}$  от остаточной толщины стенки  $t$  для всех поясов рассматриваемого резервуара.



**Рисунок 5** – Значения приведенных напряжений в поясах разных моделей: а – значения, полученные в результате численного эксперимента; б – график аппроксимации заданного коррозионного процесса степенной функцией.

Данную зависимость с достаточно высокой степенью корреляции отображает степенная функция. Данные аппроксимации зависимости приведенных напряжений в стенке резервуара от остаточной толщины стенки приведены в таблице 2.

**Таблица 2** – Данные аппроксимации зависимости  $\sigma_{np}$  от  $t$

№ пояса	Вид зависимости	Достоверность аппроксимации, $R^2$
1	$\sigma_{np} = 662,8 \cdot t^{-1}$	$R^2 = 1$
2	$\sigma_{np} = 478,7 \cdot t^{-0,99}$	$R^2 = 1$
3	$\sigma_{np} = 406,3 \cdot t^{-0,99}$	$R^2 = 1$
4	$\sigma_{np} = 312,2 \cdot t^{-0,99}$	$R^2 = 1$
5	$\sigma_{np} = 217,9 \cdot t^{-1}$	$R^2 = 1$
6	$\sigma_{np} = 116,7 \cdot t^{-0,61}$	$R^2 = 0,999$

Учитывая, что показатель степени равен «-1» (или очень близок к этому значению), то данную зависимость можно представить в виде простого отношения некоего эмпирического коэффициента  $k$  к толщине стенки:

$$\sigma_{np} = \frac{k}{t} \quad (2)$$

Из таблицы 2 видно, что зависимость (2) справедлива для 5-ти поясов из 6-ти. Для шестого пояса отличие вида зависимости от (2) может быть вызвано всплеском напряжений (так называемый краевой эффект), вызванном резким изменением геометрии оболочки в месте примыкания крыши, однако этот момент требует дополнительного изучения.

Определение значений коэффициента  $k$  требует дополнительных исследований. Однако, исследовав структуру приведенных напряжений, для данного случая было определено, что 85–97 % от приведенных составляют кольцевые напряжения и лишь 3–15 % меридиональные. Таким образом, в первоначальных приближениях в качестве определяющих для таких резервуаров можно учитывать только кольцевые напряжения. В этом случае коэффициент  $k$  может быть определен на основании [8].

На основании данных изменения приведенных напряжений в стенке от остаточной толщины (рис. 5) строим график изменения приведенных напряжений при равномерном коррозионном износе (рис. 6), отталкиваясь от начальной толщины  $t_0 = 6$  мм для того, чтобы иметь возможность проследить за «хвостами» зависимости.

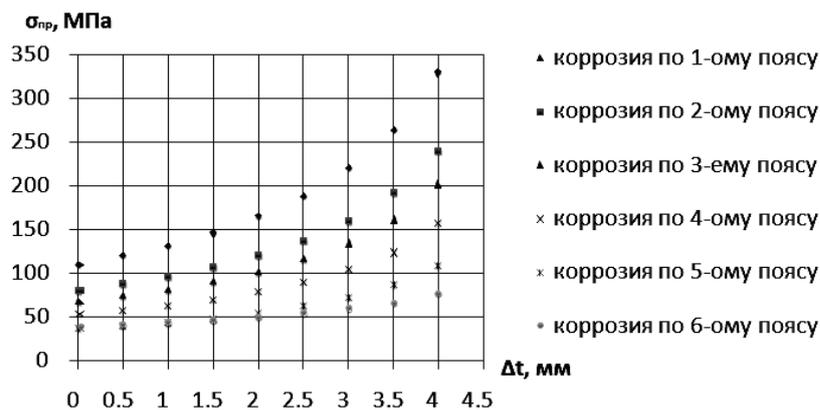


Рисунок 6 – Значения приведенных напряжений в поясах стенки при соответствующих величинах коррозионного износа.

Т. к. в данном случае наиболее точно аппроксимирует коррозионный износ стенки резервуара обратно квадратичная функция ( $\sigma_{np} = 1/(a + bt + ct^2)$ ), где коэффициент корреляции  $r = 0,999995$  и среднеквадратичная ошибка  $S = 0,268$ , то строим график изменения напряженного состояния стенки резервуара от коррозионного износа (рис. 7), используя данную функцию.

В дальнейшем наглядно будет рассматриваться только первый пояс, как наиболее нагруженный. Анализируя кривую изменения напряженного состояния стенки от коррозионного износа, можно выделить скорость изменения напряжений от величины коррозионного износа  $V = \Delta\sigma_i / \Delta t_i$  (рис. 8), критерием которой является тангенс угла наклона касательной обратно квадратичной функции, что

есть первая производная данной функции  $tg\alpha = \frac{-1 \cdot (b + 2cx)}{(a + bx + cx^2)^2}$ .

Полагаясь на принятую функцию и используя данные табл. 1, можно выделить область работы стенки (область допустимого коррозионного износа из условий прочности и устойчивости (табл. 1)) и построить график зависимости скорости роста напряжений от коррозионного износа (рис. 9).

На основании анализа такого рода графиков возможно выделение различных подходов к эксплуатации резервуара (стратегии эксплуатации). В первом приближении можно выделить три стратегии, которые характеризуют «минимальную», «среднюю» и «максимальную» скорости роста напряжений (рис. 10) (количество стратегий может определяться собственником).

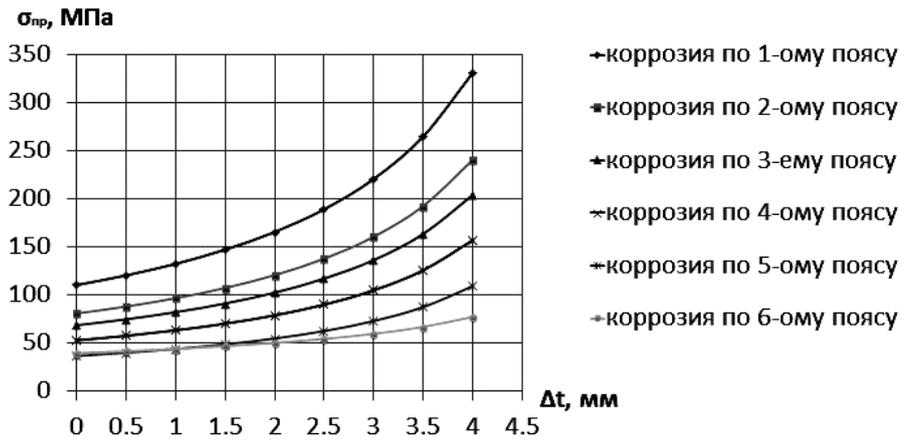


Рисунок 7 – График изменения напряженного состояния стенки резервуара от коррозионного износа.

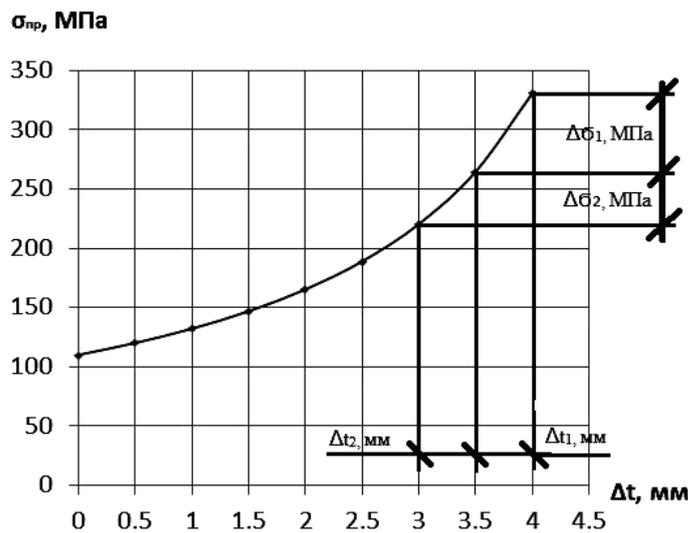


Рисунок 8 – Зависимость скорости изменения напряжений от коррозии.

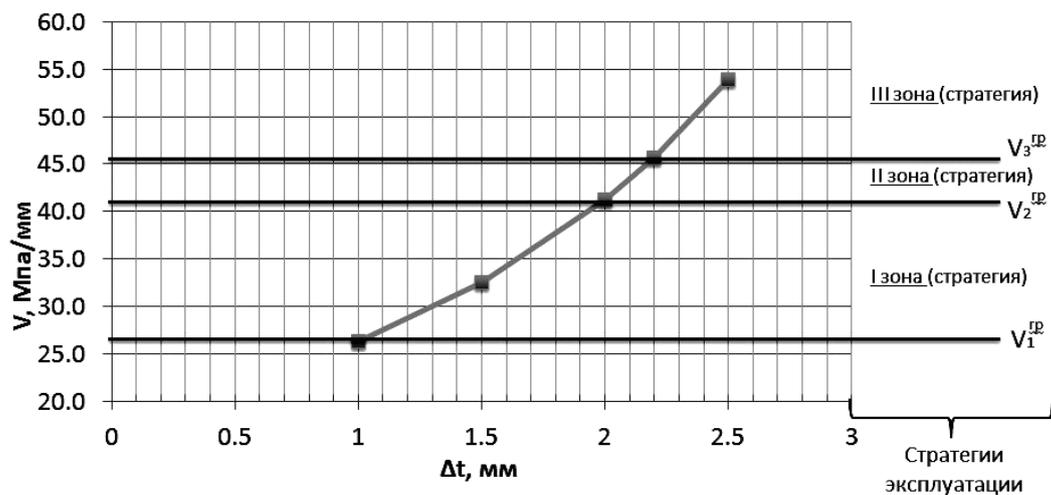
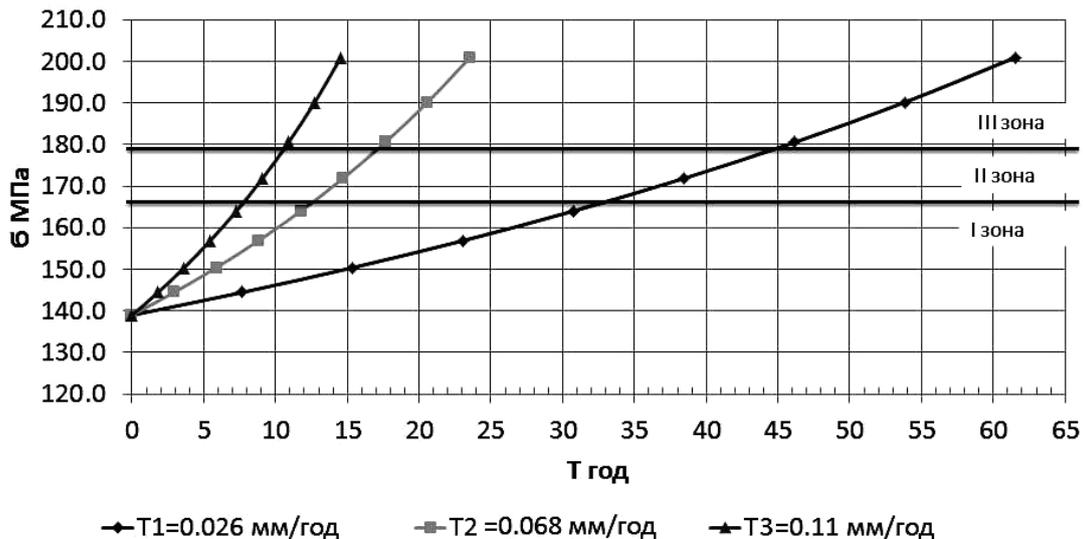


Рисунок 9 – Зависимость скорости роста напряжений от коррозионного износа.



**Рисунок 10** — Зависимость изменения напряжений от скорости коррозии: I зона — ответная эксплуатация; II зона — плановая эксплуатация; III зона — предупредительная эксплуатация.

По графику зависимости изменения напряжений от скорости коррозии определяется используемая стратегия. Стратегия эксплуатации зависит от скорости коррозии, которую можно регулировать проведением защитных мероприятий (один из примеров — окрашивание резервуара).

### ВЫВОДЫ

1. Систематизированы основные причины, влияющие на напряженно-деформированное состояние (НДС) стенки вертикального цилиндрического резервуара.
2. На примере рассмотрения равномерного коррозионного износа изучено изменение НДС для вертикальных цилиндрических резервуаров с постоянной толщиной стенки.
3. Предложены зависимости, описывающие изменение НДС от величины коррозионного износа и от остаточной толщины стенки.
4. Используемые подходы позволяют оценить эксплуатационную надежность стенки с учетом прочности и устойчивости.
5. Использование представленного в работе подхода для учета основных повреждений резервуаров позволяет прогнозировать необходимость и частоту проведения ремонтов, оценивать риски при отсутствии проведения эксплуатационных мероприятий и оценивать сроки их эксплуатации.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ВБН В.2.2-58.2-94. Резервуары вертикальные стальные для хранения нефти и нефтепродуктов с давлением насыщенных паров не выше 93,3 кПа [Текст]. — Введ. 1994-10-01. — Киев : Госкомнефтегаз, 1994. — 98 с.
2. ДБН В.1.2-2:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування [Текст]. — Замість СНиП 2.01.07-85 ; надано чинності 2007-01-01. — К. : Мінбуд України, 2006. — 61 с.
3. Лессиг, Е. Н. Листовые металлические конструкции [Текст] / Е. Н. Лессиг, А. Ф. Лилеев, А. Г. Соколов. — М. : Стройиздат, 1970. — 488 с.
4. Мельников, Н. П. Металлические конструкции: Современное состояние и перспективы развития [Текст] / Н. П. Мельников. — М. : Стройиздат, 1983. — 541 с.
5. Металлические конструкции. Общий курс [Текст] : Учебник для вузов / Е. И. Беленя, В. А. Балдин, Г. С. Ведеников и др.; Под общ. ред. Е. И. Беленя. — М. : Стройиздат, 1986. — 560 с.
6. Сафарян, М. К. Металлические резервуары и газгольдеры [Текст] / М. К. Сафарян. — М. : Недра, 1987. — 200 с.
7. Displacement and stresses in oil storage tanks caused by differential settlement [Текст] / [Ed. by Н. Камуаб and others]. — London : [s. n.], 1987. — 256 p.

8. ДБН В.2.6-163:2010. Конструкції будівель і споруд. Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу [Текст]. – На заміну СНиП II-23-81\* окрім розділів 15\*–19, СНиП III-18-75 окрім розділів 3–8, СНиП 3.03.01-87 у частині, що стосується сталевих конструкцій окрім п.п. 4.78–4.134 ; чинні від 2011-12-01. – Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. – 127 с.

Получено 04.10.2012

С. Б. ПЧЕЛЬНИКОВ, Є. А. КРИВЕНКО, Р. Б. НИКІТИН  
ОЦІНКА ВПЛИВУ КОРОЗІЙНОГО ЗНОСУ НА ТЕРМІН ЕКСПЛУАТАЦІЇ  
РЕЗЕРВУАРІВ ДЛЯ ЗБЕРІГАННЯ НАФТОПРОДУКТІВ  
Донбаська національна академія будівництва і архітектури

У цій статті розглядається взаємозв'язок ступеня і швидкості корозійного зносу елементів резервуара на термін його служби шляхом оцінки зміни НДС у часі. Визначаються залежності, що відображають зміну НДС від величини корозійного зносу і від залишкової товщини стінки. Наданий у роботі підхід дозволяє прогнозувати термін експлуатації резервуара згідно з наведеною стратегією обслуговування.  
**резервуар, напруження, НДС, експлуатація, корозійний знос**

SERGEY PCHELNIKOV, EVGEN KRIVENKO, RUSLAN NIKITIN  
AN ASSESSMENT OF CORROSIVE WEAR INFLUENCE ON LIFE TIME OF OIL  
TANKS  
Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

In this article the interrelation between rate and speed of corrosive wear of elements of tank and life time of tank by an assessment of change of mode of deformation in time is considered. The dependences of changing of mode of deformation from corrosive wear rate and residual thickness of a wall are defined. This technique allows prognosticating life time of the tank as provided by the defined strategy of maintenance.  
**tank, tension, mode of deformation, maintenance, corrosive wear**

**Пчельников Сергій Борисович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри теоретичної і прикладної механіки Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: забезпечення експлуатаційної надійності будівельних конструкцій; імовірнісні методи розрахунку будівельних конструкцій; планування експлуатаційного процесу будівель і споруд.

**Кривенко Євген Олександрович** – магістрант кафедри теоретичної і прикладної механіки Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: забезпечення експлуатаційної надійності будівельних конструкцій.

**Нікітин Руслан Борисович** – магістрант кафедри теоретичної і прикладної механіки Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: експлуатаційна надійність будівельних конструкцій.

**Пчельников Сергей Борисович** – кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и прикладной механики Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: обеспечение эксплуатационной надежности строительных конструкций; вероятностные методы расчета строительных конструкций; планирование эксплуатационного процесса зданий и сооружений.

**Кривенко Евгений Александрович** – магистрант кафедры теоретической и прикладной механики Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: обеспечение эксплуатационной надежности строительных конструкций.

**Никитин Руслан Борисович** – магистрант кафедры теоретической и прикладной механики Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: эксплуатационная надежность строительных конструкций.

**Sergey Pchelnikov** – PhD (Eng.), an Associate Professor of the Theoretical and Applied Mechanics Department of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Research interests: a support of in-service reliability of building structures; probabilistic design of building structures; a maintenance of building and structures.

**Evgen Krivenko** – graduate student, Theoretical and Applied Mechanics Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Research interests: in-service reliability of building structures.

**Ruslan Nikitin** – graduate student, Theoretical and Applied Mechanics Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Research interests: in-service reliability of building structures.