

**Черепанов Анатолий Петрович,**  
д.т.н., профессор, Ангарский государственный технический университет,  
e-mail: boning89@mail.

**Ляпустин Павел Константинович,**  
к.т.н., доцент, Ангарский государственный технический университет,  
e-mail: lpk62@mail.ru.

## МЕТОД ЭКСПЕРТНЫХ ОЦЕНОК ЧИСЛЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ КОРРОЗИИ И КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ МЕТАЛЛОВ

Cherepanov A.P., Lyapustin P.K.

## METHOD OF EXPERT ESTIMATES OF NUMERICAL VALUES OF CORROSION AND CORROSION RESISTANCE OF METALS

**Аннотация.** В статье приведён анализ коррозии и коррозионной стойкости металла, определяемой в заданных условиях, учитывая их зависимость от химического состава и структуры металла, состава среды, температуры, гидро- и аэродинамических условий, вида и величины механических напряжений. Предложен коэффициент коррозии, который может быть задан методом экспертных оценок с последующим назначением численного значения коэффициента коррозии.

**Ключевые слова:** коррозионная стойкость, ресурс технических устройств, жизненный цикл, износ.

**Abstract.** In the article the analysis of corrosion and corrosion resistance of the metal determined in the given conditions, given their dependence on chemical composition and metal structure, medium composition, temperature, hydro - and aerodynamic conditions, the type and magnitude of mechanical stress. Set a factor of corrosion, which can be specified by means of expert evaluations, followed by the appointment of the numerical values of the coefficient of corrosion.

**Keywords:** safety, wear and tear, corrosion, resource, risk, technical device.

**Введение.** Показатели коррозии и коррозионную стойкость металла определяют в заданных условиях, учитывая их зависимость от химического состава и структуры металла, состава среды, температуры, гидродинамических и аэродинамических условий, вида и величины механических напряжений, а также назначение технических устройств (ТУ) нефтехимического оборудования [1].

В работе [2] отмечалось, что изображения поверхности прокорродированного металла нерегулярны и невозпроизводимы, поэтому морфология и изображения поверхности, подвергшейся коррозионному разрушению, не могут быть совершенно идентичными даже в случае использования одного материала и одинаковой коррозионной среды. Анализ коррозии с помощью визуальных методов затрудняет как качественную, так и количественную оценку коррозии. Например, в зависимости от коррозионной среды и характера взаимодействия металла с внешней средой, возможны различные виды коррозионного разрушения, в том числе кавитационная и питтинговая коррозия, коррозионное растрескивание под напряжением. Следовательно, критерии анализа на основе изображений для данных процессов будут кардинально отличаться. Там же пред-

ложено количественное описание коррозионных процессов на основе обработки изображений прокорродировавшей поверхности, что, по мнению авторов, даст возможность использования методов визуального контроля и более глубокого понимания механизмов реакций на межфазных границах, но субъективность и человеческий фактор являются неизбежными в таких исследованиях. Авторы также считают, что на основе предложенной ими классификации коррозии металлов, такую модель можно создать системой компьютерного зрения. Процесс исследования местной коррозии металлов с применением цифровой обработки изображений был использован в описании и оценке точечной коррозии металла. Делались фотографии образцов оптической камерой, степень коррозии определялась отношением площади коррозионных ямок к общей площади изображения [3] по формуле:

$$P = AP / AT, \quad (1)$$

где  $P$  – степень коррозии;

$AP$  – площадь коррозионной ямки;

$AT$  – общая площадь изображения.

Анализ изображений с точечной коррозией, коррозией в виде редких трещин и их классификация с помощью метода вейвлет-анализа показаны в работе [4]. Метод идентификации коррозионного разрушения металла по минимуму расстояния с точностью идентификации до 93,75% представлен в работе [5]. Источники погрешностей определения параметров несплошностей в реальных условиях контроля приведены в [5]. Металлы реагируют с различными средами при отличающихся экспериментальных условиях, но коррозия металлов имеет схожий характер. Идентификация характера коррозионного разрушения с помощью цифровой обработки изображений, по мнению авторов [4], является одним из направлений исследования коррозии, но в то же время этот метод не даёт представления о количественных значениях скорости коррозии. Поэтому анализ изображений, идентифицирующих коррозию, не позволяет применять их в математической обработке результатов технического состояния ТУ при прогнозировании ресурса, предложенной, например, в работе [6], что и послужило предметом обсуждения в предлагаемой статье.

Теоретическая часть. Рассмотрим процесс определения показателей коррозии и коррозионной стойкости [1]. Для обобщения этих показателей в работе [7] предложено условие:

$$q_{ki} = f(\Delta m_i; \Delta S_{ki}; v_i; \Delta L; G; L; \tau_{mi}; \tau_i). \quad (2)$$

где  $\Delta m_i$  - потеря массы на единицу площади за  $i$  – й интервал времени испытания образца;

$\Delta L$  – изменение размеров по потере массы с учетом геометрии образца;

$G$  – степень поражения поверхности металла коррозией пятнами;

$L$  – суммарная длина торцов с трещинами для каждого образца;

$\tau_{mi}$  – время до уменьшения массы образца на единицу площади на допустимую величину за  $i$  – й интервал времени  $\Delta m_i$ ;

$\tau_i$  – время проникновения коррозии на допустимую (заданную) глубину ( $\Delta S_{ki}$ ) за  $i$  – й интервал времени;

$\Delta S_{ki}$  – коррозионный износ стенки на момент  $k$ -го технического диагностирования (ТД).

В случае равномерной коррозии скорость, которую обычно выражают в г/(м<sup>2</sup>·ч) или мг/(см<sup>2</sup>·сут), может быть определена по формуле:

$$v_i = \frac{\Delta m}{F \cdot t}, \quad (3)$$

где:  $v_i$  — скорость коррозии образца;

$\Delta m$  — убыль (увеличение) массы образца;

$F$  — площадь поверхности образца;

$t$  — время испытания образца;

При нелинейной зависимости коррозионного эффекта от времени, скоростной показатель коррозии находят как первую производную по времени графическим или аналитическим способом.

На рисунке 1 показано графическое дифференцирование истинного скоростного показателя коррозии металла

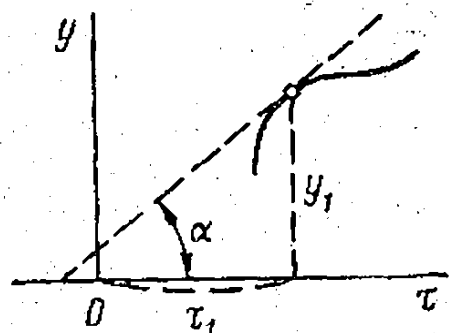


Рисунок 1 - Графическое дифференцирование истинного скоростного показателя коррозии

[6]. Истинная скорость коррозии металла может быть определена графическим дифференцированием по тангенсу угла наклона касательной к кривой  $y=f(\tau)$  в точке с координатами  $\tau_1$  и  $y_1$ . Это следует из того, что, как известно из [6],

$$\frac{df(\tau)}{d\tau} = \frac{dy}{d\tau} = \operatorname{tg}\alpha. \quad (4)$$

Для количественного выражения скорости коррозии металлов приняты показатели коррозии: глубинный, гравиметрический, объемный, механический

и другие, которые являются средней скоростью процесса за время  $\tau$ , т.е.  $\Delta y/\Delta \tau$ . Количественные показатели для конкретных условий эксплуатации в соответствии со стандартом [1] возможно определять путем исследования образцов при коррозионных испытаниях в лабораторных условиях, например, глубинный показатель коррозии (проникновение коррозии) в (мм/год):

$$K_h = \frac{\Delta h}{t}, \quad (5)$$

где  $\Delta h$  - изменение толщины стенки вследствие коррозии в единицу времени  $t$ .

Сплошная коррозия определяется потерей массы на единицу площади поверхности, которую вычисляют по формуле:

$$\Delta m = \frac{m_0 - m_1}{F}, \quad (6)$$

где  $m_0$  - масса образца до испытаний;

$m_1$  - масса образца после испытаний и удаления продуктов коррозии.

Изменение объёма образца вычисляют по формуле:

$$\Delta V_{ki} = \frac{\Delta m}{\rho}, \quad (7)$$

где  $\rho$  - плотность металла.

Степень поражения поверхности металла коррозией пятнами в процентах вычисляют по формуле:

$$G = \frac{\sum_{i=1}^n F_i}{F} \cdot 100, \quad (8)$$

где  $F_i$  - площадь  $i$ -того пятна;

$n$  - количество пятен.

Максимальную глубину проникновения питтинговой коррозии определяют измерением механическим индикатором заданной толщины последовательно удаляемого слоя металла с поверхности дефекта.

При коррозионном растрескивании и коррозионной усталости трещины выявляют визуально, например, с применением оптических или других дефектоскопических средств контроля. Степень поражения поверхности при расслаивающей коррозии выражают долей в процентах площади с отслаиваниями на каждой поверхности образца.

Показатели коррозионной стойкости определяют из временной зависимости соответствующего интегрального показателя коррозии графическим способом или аналитически из его эмпирической временной зависимости  $y=f(t)$ . Допустимые показатели коррозии и коррозионной стойкости устанавливают в нормативно-технической документации на материал или ТУ.

Однако, далее выяснилось, что разделение условия (2) на две составляющие наиболее полно отражает суть коррозионных процессов и может быть идентифицировано не только с помощью цифровой обработки изображений, но и численными значениями, поэтому дальнейшее их рассмотрение следует провести отдельно.

В этом случае показатели коррозии предложено определять условием:

$$q_{ik} = f(\Delta m; \Delta S_k; \Delta L; G; \tau_i), \quad (9)$$

Показатель коррозионной стойкости может быть выражен условием [7]:

$$q_k = f(\tau_m; \tau_i) \quad (10)$$

В частности, при сплошной коррозии, протекающей с постоянной скоростью, показатели коррозионной стойкости [1] определяют по формулам:

$$\tau_m = \frac{\Delta m}{V_m}; \quad \tau_i = \frac{\Delta S_{ki}}{V_i}, \quad (11)$$

где  $V_m$  - скорость убыли массы;

$\tau_m$  - время до уменьшения массы на единицу площади на допустимую величину  $\Delta m$ ;

$V_i$  - линейная скорость коррозии за  $i$  – й интервал времени.

В то же время известно, что одним из препятствий для широкого применения количественных методов исследования коррозии (массовый, объемный, электрохимический, магнитометрический и другие методы) [1], является изготовление лабораторных образцов путем вырезки их из материала оборудования, находящегося в условиях эксплуатации. Таким образом, качественные методы испытания, а также их визуальная идентификация приведенными выше методами, не дают полной характеристики коррозии и коррозионной стойкости металлов, и не позволяют установить характер и интенсивность коррозионного процесса. Возможно, для снижения необходимости изготовления образцов из корпусных элементов сосудов и аппаратов и вставки вместо вырезанных участков фрагментов из другого металла с применением сварки, методическими рекомендациями по проведению технического диагностирования технического состояния и определению остаточного срока службы сосудов и аппаратов [8], было предложено скорость равномерной коррозии  $i$ -го элемента единицы оборудования при техническом диагностировании определять выражением:

$$V_i = \frac{\Delta S_i}{T_{\text{э}} \cdot K_{Si}}, \text{ мм/год}, \quad (12)$$

где  $\Delta S_i$  – снижение толщины стенки  $i$ -го элемента;

$K_{Si}$  – коэффициент перепада толщины стенки  $i$ -го элемента;

$T_{\text{э}}$  – время эксплуатации  $i$ -го элемента до ТД, лет.

Принятые в методике [8] коэффициенты отличия от средней ожидаемой или от гарантированной скорости коррозии (эрозии) и погрешность ее определения по линейному закону задана в широких пределах коэффициентами ( $K_{1f}=0,5-0,75$ ,  $K_{2f}=0,75-1,0$ ), выбор которых недостаточно обоснован. Как известно, на любом отрезке жизненного цикла ТУ его несущие элементы при статической нагрузке должны иметь запасы прочности  $n_H \geq 1,5$ , и соответственно, запасы толщины стенок  $n_H^s \geq 1,5$ , которые должны быть не ниже запасов прочности, установленных для статических условий нагружения.

Проведя всесторонний анализ показателей коррозии и коррозионной стойкости, очевидно, что необходим такой показатель, который имел бы одну размерность, или, что еще желательнее, был безразмерным, но применим к различным видам коррозии и пригоден к использованию в формулах для оценки ресурса ТУ, например, как это предложено в работе [7]. При этом предполагалось, что условие (9) совместно может описывать как показатели коррозии, так и показатели коррозионной стойкости металлов [1]. При линейной зависимости коррозионного эффекта от времени соответствующий скоростной показатель находят отношением изменения коррозионного эффекта за интервалы

времени  $t_1, t_2 \dots t_i$  между первым, вторым и  $i$ -м техническим диагностированием при  $k=1 \dots i$  к величине этого интервала, как показано в работе [6].

Далее предложено показатели коррозии и коррозионной стойкости металлов определять безразмерной величиной, представляющей произведение коэффициента коррозии материала и показателя распределения коррозии:

$$q_{кр} = q_{kk} \cdot q_{ks}, \quad (13)$$

где  $q_{kk}$  - коэффициент коррозии металла на момент критического технического состояния ТУ;

$q_{ks}$  - показатель распределения коррозии по поверхности стенки ТУ.

Коэффициент коррозии может быть задан методом экспертных оценок с последующим назначением его численного значения.

Аналогично приведенным в ГОСТ 9.908–85 [1] показателям коррозии, в качестве примера в таблице 1 показаны численные значения коэффициентов коррозии для отдельных типов коррозии, характеристик формы коррозионного поражения и схем их типичного вида.

Таблица 1

Коэффициенты коррозии для различных типов коррозии, характеристик формы коррозионного поражения и схем их типичного вида

Тип коррозии	Характеристика формы коррозионного поражения	Схема коррозионного поражения	Коэффициент коррозии, $q_{kk}$
Коррозионная язва	Коррозионное поражение глубиной приблизительно равной ширине		0,9
Питтинговая коррозия	Коррозионное поражение глубиной значительно больше ширины		0,85
Межкристаллитная коррозия	Коррозионное поражение вдоль границ зерен металла		0,7

Показатель распределения коррозии по поверхности стенки ТУ будет зависеть от характеристик распределения коррозионных поражений для каждой схемы типового распределения коррозионного поражения, заданных в соответствии с [1].

Величины отдельных показателей распределения коррозии приведены в таблице 2 в качестве примера.

С учетом безразмерного коэффициента коррозии металла (13), может быть определен критический запас толщины стенки на момент предаварийного

технического состояния ТУ, когда его эксплуатация должна быть прекращена [6]:

$$n_{кр}^S = q_{кр} \frac{S_k}{S_{min}}, \quad (14)$$

где  $S_k$  – текущая толщина стенки;

$S_{min}$  – минимально допустимая толщина стенки.

Результаты и обсуждение. Исследование коррозии и классификация коррозии металлов техническим диагностированием способствует повышению эффективности предупреждения возникновения аварийных ситуаций и позволяет на ранних стадиях проводить оценку его работоспособности, предупреждать возникновение аварийных ситуаций и продлевать сроки эксплуатации объектов.

Скорость износа в общетехническом понятии – это функция изменения толщины стенки в единицу времени, то есть за срок эксплуатации. Нормативы на скорости износа в целом и на скорости коррозии в частности не приняты на уровне методических рекомендаций.

Таблица 2

Величины показателя распределения коррозии

Распределение	Характеристика распределения	Схема коррозионного поражения	Показатель распределения коррозии, $q_{ks}$
Коррозионное поражение в виде скоплений	-		0,9
	Корродируют обе структуры		0,85
Коррозионное поражение на границе структур	Корродирует одна структура		0,8
	Корродирует узкая зона вдоль границы структур		0,7

На рисунке 2 показана зависимость запаса толщины стенки при ее уменьшении и с учетом безразмерного коэффициента коррозии.

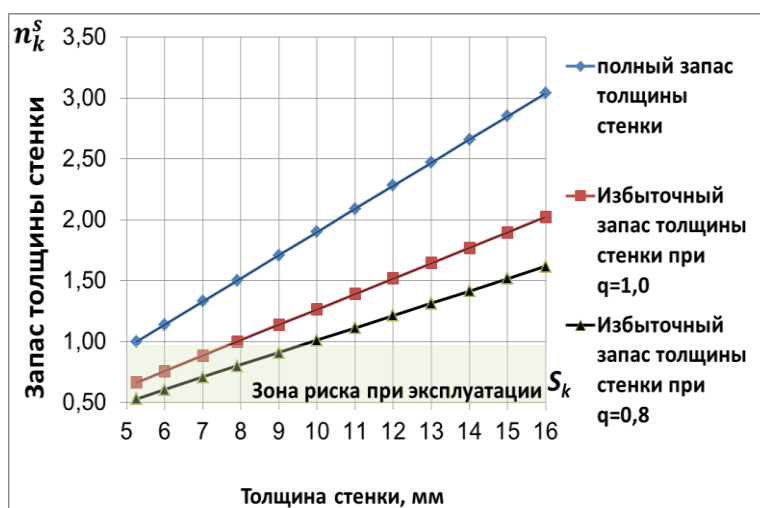


Рисунок 2 – Зависимость запаса толщины стенки при ее уменьшении с учетом безразмерного коэффициента коррозии

стенки достаточны для продолжения эксплуатации ТУ. На рисунке 2 видно, что по мере износа стенки до ее расчетной толщины  $S_k=S_p=7,9$  мм, когда фактический запас толщины стенки достигнет величины 1,0, эксплуатация ТУ должна быть прекращена.

На основе закономерности перехода исходного к предельному техническому состоянию по степени коррозионного износа, дефектности, степени опасности разрушения, объемов ТД в работе [6] предусматривается возможность оценки ресурса ТУ при снижении от исходной  $S_{и}$  до текущей толщины  $S_{ki}$  стенки в процессе эксплуатации по формуле:

$$T_{ki}^s = \sqrt{W_{ki} \cdot \beta_{ki} \cdot \left( q_{кр} \cdot \frac{S_{ki}}{S_{и} - S_{ki}} \right)^\xi} \quad (15)$$

По приведенной формуле рассчитывается ресурс отдельных элементов и ТУ в целом в зависимости от группы опасности  $\xi$ , текущих значений запаса толщины, степени дефектности  $\beta_{ki}$ , эффективного объема ТД  $W_{ki}$  и безразмерного коэффициента коррозии  $q_{кр}$ . Для безопасной эксплуатации необходимо оценивать ресурс по наибольшему количеству элементов, а также по наибольшему количеству факторов, вызывающих износ ТУ, как рекомендовано в работах [1, 8].

## Выводы

1. Безразмерный коэффициент коррозии учитывает изменение показателей коррозии и коррозионной стойкости в материале при деградиационных процессах, появляющихся под воздействием агрессивных сред, перепадов температуры и давления на любом отрезке жизненного цикла технического устройства.

График показывает, что, например, по мере износа стенки при  $q=1$ , когда ее запас толщины достигает величины запаса прочности  $n_{ki}^s = 1,5$ , дальнейшая эксплуатация ТУ

может быть продолжена. При исходной толщине стенки  $S_{и}=16,0$  мм, исходный запас толщины стенки равен  $n_{и}^s=2,03$ . Таким образом, при значениях  $n_k^s \geq 1$ , запасы толщины



2. Принятие безразмерного коэффициента коррозии и распределения коррозии в качестве дополнения к показателям коррозии и коррозионной стойкости в материале и их визуализации повышает достоверность прогнозирования ресурса и назначения сроков безопасной эксплуатации технических устройств опасных производств.

3. Коэффициент коррозии дает возможность в новых методических рекомендациях по прогнозированию ресурса технических устройств опасных производств наиболее полно учитывать коррозионное состояние технических устройств опасных производств.

## ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 9.908–85. Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости. М.: Изд-во стандартов, 1986.

2. Еникеев М.Р., Малеева М.А., Губайдуллин И.М. Исследование механизма развития коррозионных поражений с использованием компьютерного зрения // Журнал Средневолжского математического общества. 2013. Т. 15. № 3. С. 70-75. Суперкомпьютерные дни в России 2015 // Russian Supercomputing Days 2015 // RussianSCDays.org. Электронный ресурс. Дата обращения 27.04.2017.

3. Воробьева Г.Я. Коррозионная стойкость материалов в агрессивных средах химических производств. М.: Химия, 1975. 816 с.

4. Stefan Sabine, R. W. David. Aluminum surface corrosion and the mechanism of inhibitors using pH and metal ion selective imaging fiber bundles [J]. Analytical Chemistry, 2002. 74(4). P. 886-894.

5. Yan Yun hui, Gao Jin he, Liu Yong, Lei Shi chao. Recognition and classification of metal fracture surface models based on wavelet transform [J]. Actametallurgicasinica, 2002. P. 309-314.

6. Черепанов А.П. Прогнозирование ресурса технических устройств нефтехимических производств: монография. – Ангарск: Изд-во АНГТУ, 2017. – 224 с.

7. Жук Н.П. Курс теории коррозии и защиты металлов. М: Металлургия, 1976. 472 с.

8. РД 03–421–01. Методические указания по проведению технического диагностирования технического состояния и определению остаточного срока службы сосудов и аппаратов. М.: ГУП НТЦ «Промышленная безопасность», 2002. 136 с.

9. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Управление ресурсом эксплуатации высокорисковых объектов / Под общ. ред. Махутова Н.А. – М.: МГОФ «Знание», 2015. 600 с.