

Метод прогнозирования эксплуатационной надежности оборудования нефтехимических производств

Е.Н. ОКЛАДНИКОВА, Е.В. СУГАК

*Сибирский государственный аэрокосмический университет
имени академика М.Ф.Решетнева, Красноярск*

e-mail: ketrin_nii@mail.ru

The method of calculation the intension of refusal and residual resource of safe exploitation of technical object (the equipment of petrochemical manufactures) taking into account casual factors. Results of calculations allow to define probability of object refusal and to minimize risk of accident occurrence at the decision of problems optimization systems of technical service, and to provide optimum control of safety at exploitation of potentially dangerous objects.

При длительной эксплуатации оборудования нефтехимических производств неизбежно возникают повреждения или нарушения работоспособности его элементов даже при отсутствии дефектов изготовления и соблюдении правил эксплуатации. Это обусловлено особенностями нефтехимических производств: высокой коррозионной активностью технологических сред, высокими температурой, давлением и скоростью технологических потоков, наличием переменных температурных деформаций и сложного напряженного состояния металла оборудования. Кроме того, даже при соблюдении технологической дисциплины при эксплуатации оборудования неизбежны колебания состава сырья и реагентов, в том числе содержания в них агрессивных компонентов; колебания регулируемых параметров (температуры, давления, расхода и др.), обусловленные запаздыванием регулирования; колебания внешних воздействий (напряжения электропитания, температуры и давления технологического пара, охлаждающей воды и др.). Воздействие указанных факторов в течение длительного времени вызывает повреждение металла, развитие микродефектов на поверхностях нагруженных элементов оборудования или отложение на них осадков, препятствующих протеканию технологического процесса. В некоторые моменты функционирования оборудования могут возникать такие сочетания параметров, которые нарушают его работоспособность, т.е. вызывают отказы [1].

Отказы нефтехимического оборудования обусловлены множеством причин. Для удобства анализа отказы можно разделить на три вида: механические (вызванные нарушением механической работоспособности оборудования вследствие изнашивания, коррозии, поломок деталей, нарушения формы элементов оборудования, возникновения недопустимых сопутствующих процессов - утечки технологической среды и др.), технологические (вызванные нарушением хода технологического процесса, выполняемого на данном оборудовании - загрязнение фильтров и разделительных элементов в аппаратах мембранного разделения, загрязнение катализатора в реакционных аппаратах, отложение на стенках и подвижных элементах машин [2] и др.) и обусловленные ошибками (нарушениями) при эксплуатации, изготовлении или разработке оборудования (уровень технологической дисциплины и культуры производства).

Большая часть механических и технологических отказов (около 90%) проявляется постепенно в изменении одного или нескольких выходных параметров. Контролируемыми параметрами могут быть как непосредственно измеряемые величины повреждений (глубина коррозии стенок, износ детали), так и выходные параметры оборудования (производительность, коэффициент полезного действия) и другие количественные показатели качества продукта, величина утечки среды через уплотнения и т. д.

Контроль изменения этих параметров по мере приближения их значений к предельно допустимым позволяет прогнозировать момент наступления отказа. Оценка надежности в данном случае осуществляется путем проведения периодических обследований оборудования, измерения глубин разрушения его поверхностей, статистической обработки результатов измерений и последующего расчета показателей надежности.

Однако при измерениях часто наблюдается неравномерность коррозионного разрушения поверхностей металлов в различных точках при одинаковых внешних условиях, которая обусловлена неоднородностью физико-химических свойств реальных металлов и сплавов, проявляющаяся в их электрохимической гетерогенности [3,4]. Поэтому оценка надежности многих видов химического и нефтяного оборудования осуществляется индивидуально для каждого экземпляра оборудования по результатам периодических обследований. К такому оборудованию относятся сосуды, работающие под давлением, резервуары, колонная и теплообменная аппаратура, различные реакторы, аппараты с перемешивающими устройствами и тому подобное оборудование.

Совершенствование методов расчетов требует, в частности, учета стохастической изменчивости свойств и структуры системы, а также изменчивости других случайных факторов. Необходимым этапом развития статистического подхода должна стать разработка в рамках существующих детерминированных схем расчета методики оценки надежности с учетом изменчивости свойств материала и значительной неопределенности исходных данных. В таких схемах предполагается, что данный материал имеет одинаковые значения физико-механических характеристик во всех точках "активной зоны". Однако, расчет должен вестись с использованием математических ожиданий этих показателей. Ввиду ограниченности доступного объема информации о свойствах и сложности их учета, практически невозможно достоверно определить набор известных математических ожиданий характеристик. Приходится пользоваться их оценками, которые асимптотически сходятся к соответствующим истинным значениям, но фактически являются случайными величинами и имеют распределения. Надежность системы в рассматриваемом случае определяется как вероятность не наступления ни одного из возможных предельных состояний в течение заданного срока эксплуатации.

Вероятностно-статистическая оценка [5,6,7,8] позволяет не только более точно обосновать назначение полного или остаточного ресурсов объекта, но и дает исходные данные для анализа рисков безопасной эксплуатации («риск-анализа»).

В качестве примера выполнен расчет надежности с учетом случайных факторов по материалам экспертизы технического состояния отгонной колонны (замеры толщины стенки обечайки в 149 точках), находящейся в эксплуатации 29 лет. Технические характеристики: рабочее давление – 0,6 кгс/мм² или вакуум; рабочая среда – латекс; объем – 29650 м³; температура +30...+65 С°; фактическая толщина металла обечайки сосуда – 12 мм, с учетом поля допуска 12 ± 0,2 мм [9].

Среднее квадратическое отклонение находится, исходя из правила трех сигм:

$$\sigma_{исх} = \frac{S_{max} - S_{min}}{6} = \frac{12,2 - 11,8}{6} = 0,067 \text{ мм} \quad (1)$$

математическое ожидание $\mu_{исх}$ приравнивается среднему значению $S_{ср} = 12$ мм.

По результатам замеров через $t = 29$ лет эксплуатации определяется максимальная и минимальная толщина стенки обечайки, среднее значение $\mu_{эксн} = S_{ср} = 6,37$ мм и среднее квадратическое отклонение

$$\sigma_{эксн} = \frac{S_{max} - S_{min}}{6} = \frac{6,84 - 5,83}{6} = 0,17 \text{ мм.} \quad (2)$$

На основе найденных значений $\sigma_{исх}$, $\sigma_{эксн}$ и $\mu_{исх}$, $\mu_{эксн}$ используя MathCAD - генератор случайных чисел получено по 1000 значений исходной и фактической толщины стенки $S_{исх}$ и $S_{эксн}$.

При оценке ресурса по определяющему параметру $X(t)$ рассмотрена зависимость следующего вида:

$$X(t) = X_0 - \gamma t^n, \quad (3)$$

где X_0 – начальное значение определяющего параметра, γ – скорость изменения параметра, t в данном случае является временной характеристикой, показатель степени n может принимать значения из интервала от 1 до 2 [1]:

$$X(t) = X_0 - \gamma t, \quad X(t) = X_0 - \gamma t^2. \quad (4)$$

В этом случае оценка полного T ресурса при известном значении γ производится решением уравнений (4) при $X = X_{np}$, оценка остаточного ресурса при $X = X_{эксн}$

$$T = \frac{X_0 - X}{\gamma}, \quad T = \sqrt{\frac{X_0 - X}{\gamma}}. \quad (5)$$

Величина предельного износа X_{np} определяется из условий прочности деталей, требований нормативно-технической документации или исходя из требований безопасности.

Расчетное значение допустимой толщины металла:

$$X_{np} = \frac{P_{раб} D}{2\varphi (\sigma_{дон} - P_{раб})} = \frac{0,6 \times 2400}{2 \times 1(168 - 0,6)} = 4,29 \text{ мм,}$$

где $P_{раб} = 0,6$ кгс/мм² – рабочее давление; $D = 2400$ мм – внутренний диаметр сосуда; $\varphi = 1$ – коэффициент прочности сварного шва; где $\sigma_{дон} = 168$ МПа – допустимое напряжение для расчетной температуры.

Для нахождения функции определяющего параметра $X(t)$ необходимо знать совместный закон распределения $f(X)$ случайной величины X .

В общем случае закон распределения случайной величины X :

$$F(X) = P[(X_0, \gamma) \subset D] = \iint_{D(X \leq x)} f(X_0, \gamma) dX_0 d\gamma. \quad (6)$$

Математическая задача определения $F(X)$ сводится к решению двукратного интеграла. Для случая, когда $X = X_0 + \gamma t$ интеграл берется по области D , где $X_0 + \gamma t < x$, следовательно, получаем конкретные пределы интегрирования.

$$F(X) = P[(X_0, \gamma) \in D] = \iint_D f(X_0, \gamma) dX_0 d\gamma = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^x f(X_0, \gamma) d\gamma \right] dX_0. \quad (7)$$

или

$$f(X) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(X - \gamma) f_2(\gamma) d\gamma, \quad (8)$$

где f_1 и f_2 – плотности распределения аргументов и возможные значения аргументов неотрицательны.

Принимая для них нормальный закон распределения, получим:

$$f(X_0) = \frac{1}{\sigma_{X_0} \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{[X_0 - \mu_{X_0}]^2}{2\sigma_{X_0}^2} \right\} \quad (9)$$

$$f(\gamma) = \frac{1}{\sigma_{\gamma} \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{[\gamma - \mu_{\gamma}]^2}{2\sigma_{\gamma}^2} \right\} \quad (10)$$

Закон распределения случайной величины X [10]:

$$f(X) = \frac{1}{2\pi\sigma_{X_0}\sigma_{\gamma}} \exp \left\{ -\frac{[X_0 - \mu_{X_0}]^2}{2\sigma_{X_0}^2} \right\} \times \exp \left\{ -\frac{[\gamma - \mu_{\gamma}]^2}{2\sigma_{\gamma}^2} \right\} \quad (11)$$

После проведения преобразований:

$$f(X) = \frac{1}{\sigma_X \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{[X - \mu_X]^2}{2\sigma_X^2} \right\} \quad (12)$$

где

$$\mu_X = \mu_{X_0} - t\mu_{\gamma} \quad \text{или} \quad \mu_X = \mu_{X_0} - t^2\mu_{\gamma}, \quad (13)$$

$$\sigma_X = \sqrt{\sigma_{X_0}^2 + t^2\sigma_{\gamma}^2} \quad \text{или} \quad \sigma_X = \sqrt{\sigma_{X_0}^2 + t^4\sigma_{\gamma}^2}, \quad (14)$$

$$f(X) = \frac{1}{\sqrt{\sigma_{X_0}^2 + t^2\sigma_{\gamma}^2} \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{[X - (\mu_{X_0} - t\mu_{\gamma})]^2}{2\sqrt{\sigma_{X_0}^2 + t^2\sigma_{\gamma}^2}} \right\} \quad (15)$$

или

$$f(X) = \frac{1}{\sqrt{\sigma_{X_0}^2 + t^4\sigma_{\gamma}^2} \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{[X - (\mu_{X_0} - t^2\mu_{\gamma})]^2}{2\sqrt{\sigma_{X_0}^2 + t^4\sigma_{\gamma}^2}} \right\} \quad (16)$$

Далее с помощью генератора случайных чисел программы MathCAD, по найденным значениям μ_{γ} и σ_{γ} получено 1000 значений скорости изменения определяющего параметра и найдено 1000 значений ресурса. С использованием программы для проверки гипотезы о законе распределения с помощью критерия Колмогорова строится график функции распределения ресурса. Функция распределения хорошо аппроксимируется графиком функции нормального распределения

$$f(T) = \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{[T - \mu_{\gamma}]^2}{2\sigma_T^2} \right\}. \quad (17)$$

Т а б л и ц а 1. Параметры функции распределения полного и остаточного ресурсов [6]

Зависимость	μ_{tn}	σ_{tn}	μ_{tnp}	σ_{tnp}
$X(t) = X_0 - \gamma t$	39,76897	0,75629	29,1647	4,0263
$X(t) = X_0 - \gamma t^2$	33,95883	0,32247	29,013	2,006

Далее по полученным данным определены параметры функции распределения полного и остаточного ресурсов (таблица 1).

Исходя из функциональных связей между показателями безотказности можно записать:

$$\lambda(t) = \frac{f(T)}{\int_{\tau}^{\infty} f(t)dt}, \tag{18}$$

где $\lambda(t)$ – интенсивность отказов (условная плотность вероятности возникновения отказа объекта, определяемая для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента отказ не возник), $f(t)$ – плотность распределения ресурса

$$\lambda(t) = \frac{\frac{1}{\sigma_t\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{[T - \mu_\gamma]^2}{2\sigma_T^2}\right\}}{\int_{\tau}^{\infty} \left(\frac{1}{\sigma_t\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{[T - \mu_\gamma]^2}{2\sigma_T^2}\right\}\right) dt} \tag{19}$$

Для решения интеграла произведена замена переменных:

$$\int_t^{\infty} f(T)dt = \frac{1}{\sigma_t\sqrt{2\pi}} \int_t^{\infty} \exp\left\{-\frac{[T - \mu_\gamma]^2}{2\sigma_T^2}\right\} dt = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_t^{\infty} \exp(-x^2)dx, \tag{20}$$

где $x = \frac{[T - \mu_\gamma]^2}{2\sigma_T^2}$, откуда $t = \sqrt{2}\sigma_t x + \mu_t$; $dt = \sqrt{2}\sigma_t dx$ и $\xi = \frac{T - \mu_t}{\sqrt{2}\sigma_t}$.

Раскладывая функцию (22) в ряд Тейлора, можно записать [11]

$$\exp(-x^2)dx = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-x^2)^n}{n!} = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{x^{2n}}{n!}. \tag{21}$$

Следовательно

$$\int_t^{\infty} f(T)dt = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_t^{\infty} \exp(-x^2)dx = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_t^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{x^{2n}}{n!} dx = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n \xi^{2n+1}}{n!(2n+1)} \tag{22}$$

или

$$\int_t^{\infty} f(T)dt = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n \left(\frac{T - \mu_t}{\sqrt{2}\sigma_t}\right)^{2n+1}}{n!(2n+1)}, \tag{23}$$

где n – количество членов ряда, при $n = 30$ погрешность составляет 10^{-6} .

Тогда формула (21) примет вид

$$\lambda(t) = \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2}} \exp(-x^2) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n \xi^{2n+1}}{n!(2n+1)} \quad (24)$$

Для расчета функции (26) написана программа, которая при заданных значениях математического ожидания μ , среднего квадратического отклонения σ и ресурса T , рассчитывает значения интенсивности отказа. Некоторые результаты расчетов приведены в таблице 2.

Т а б л и ц а 2. Интенсивность отказа объекта

Зависимость определяющего параметра	Остаточный ресурс $T_{ост}$, г.	Интенсивность отказа λ , г ⁻¹ или ч ⁻¹
$X(t) = X_0 - \gamma t$	42	$3,68405 \cdot 10^{-4}$ $4,2055 \cdot 10^{-8}$
$X(t) = X_0 - \gamma t^2$	35	$1,78 \cdot 10^{-3}$ $2,04058 \cdot 10^{-7}$

Разработанная методика позволяет определять интенсивность отказов и остаточный ресурс безопасной эксплуатации технического объекта по данным о его текущем состоянии. Результаты расчетов позволяют определять вероятность отказа объекта и минимизировать риск возникновения аварийных ситуаций при решении задач оптимизации систем технического обслуживания и обеспечивать оптимальное управление безопасностью при эксплуатации оборудования нефтехимических производств [6,12,13].

Список литературы

- [1] Маннапов Р.Г. Методы оценки работы оборудования, подвергающегося коррозии. - М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1990. 49с.
- [2] ОРВИС - Дияс В. С., ШЕРСТЮК А. Н. Диагностика центробежных компрессоров химических технологий. - Химическая промышленность, 1990, Мая 6, С.360- 362.
- [3] Маннапов Р. Г. Прогнозирование надежности оборудования путем статистического анализа эксплуатационных параметров. - Химическое и нефтяное машиностроение, 1990, № 5, С.1 - 3.
- [4] РД 26-11-21-88. Методические указания. Надежность изделий химического и нефтяного машиностроения. Система контроля и оценки показателей надежности по результатам эксплуатационных наблюдений (испытаний). - М.: НИИхиммаш, 1988.
- [5] РД 26-10-87. Методические указания. Оценка надежности химического и нефтяного оборудования при поверхностном разрушении. - М.: НИИхиммаш, 1987.
- [6] Окладникова Е.Н. Оптимизация системы технического обслуживания потенциально опасных объектов. Дисс. . . канд. техн. наук: 05.13.01: защищена 18.06.2008: утв. 10.10.2008 - Красноярск: СибГАУ. 2008. 135 с.

-
- [7] МАКАРОВ Ю.В. Определение остаточного ресурса промысловых трубопроводов в условиях локализованной механохимической повреждаемости: Дисс. канд. техн. наук: 250019 - Уфа. 2004. 129 с.
- [8] ОКЛАДНИКОВА Е.Н., СУГАК Е.В. Вероятностная оценка ресурса узлов трения и износа. Вестник СибГАУ, Вып.6. 2005. С.148-152.
- [9] АНУРЬЕВ В.И. Справочник конструктора-машиностроителя. В 3т. Т.1. М.: Машиностроение, 2001. 901 с.
- [10] СВЕТЛИЦКИЙ В.А. Статистическая механика и теория надежности. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2002. 504 с.
- [11] Математика: Энциклопедия. Под. ред. Ю.В.Прохорова - М.: Большая Российская энциклопедия, 2003. 845с.:ил.
- [12] ОКЛАДНИКОВА Е.Н., СУГАК Е.В., ИГНАТЬЕВ Д.А. Оптимальное управление безопасностью промышленных объектов. Вестник СибГАУ, Вып.4 (17). 2007. С.43-47.
- [13] ОКЛАДНИКОВА Е.Н., СУГАК Е.В. Управление техническим состоянием потенциально опасных объектов. Научно-технический журнал - Системы управления и информационные технологии, Вып.1.1(35), Москва-Воронеж, Научная книга. 2009. С.192-196.