

УДК 66.013.62-192

Некоторые аспекты частотного анализа риска химико-технологических объектов

*А. Г. Хлуденев, Н. М. Рябчиков, доценты, канд. техн. наук, С. А. Хлуденёв
(Пермский государственный технический университет),
С. Н. Южанин, В. Б. Гриценко (Пермское межрегиональное управление Федеральной
службы по экологическому и технологическому надзору Ростехнадзора).*

При выполнении работ, связанных с анализом аварийного риска, необходима информация о вероятности наступления нежелательных событий (отказов оборудования). Удобной характеристикой безотказности может служить часто применяемая как в теории надежности, так и в практике анализа риска интенсивность отказов λ , год⁻¹.

В практике частотного анализа риска сформировались два различных подхода к определению и использованию этой величины.

В соответствии с одним из них [1] интенсивность (частоту) отказов принимают как среднестатистическую по отрасли для данного типа опасного производственного объекта (ОПО):

$$\lambda_{\text{отр}} = \frac{N}{n \cdot T_n}, \quad (1)$$

где N - число аварий; n - число объектов; T_n - период наблюдения.

Определяемая на основе анализа ретроспективной информации среднеотраслевая характеристика $\lambda_{\text{отр}}$ является малоприменимой для оценки надежности оборудования химических отраслей, т.к. не всегда отражает специфику и реальное техническое состояние конкретного ОПО.

Специфика ОПО химико-технологического профиля заключается в том, что одни и те же типы оборудования (колонное, емкостное, теплообменное, технологические трубопроводы и.д.) работают в условиях различных температур и давлений, в средах с различной коррозионной активностью, отличаются конструктивным и материальным исполнением. Такая индивидуальность химико-технологического оборудования предопределяет виды, закономерности и глубину повреждающих процессов в условиях его эксплуатации и, следовательно, величину интенсивности отказов.

Одной из основных причин отказов оборудования являются эрозивно-коррозионные повреждения (ЭКП), или изнашивание. Следует заметить, что степень износа основного технологического оборудования предприятий химической и нефтехимической промышленности по оценкам специалистов достигает в настоящее время 80%. Игнорирование этого обстоятельства при частотном анализе риска связано с потерей точности его прогнозных оценок.

Второй подход к оценке интенсивности отказов на конкретном ОПО базируется на формировании и количественном анализе логико-графических схем, или «деревьев отказов» [2]. При таком подходе возможен учет специфики того или иного технического устройства, его фактического состояния (степени износа) и особенностей эксплуатации, параметров технологического режима. Необходимая для этого информация об интенсивности «первичных» [2], или износных (деградационных) отказов оборудования может быть получена путем вероятностного прогнозирования.

В основу вероятностного прогнозирования положено предположение о существовании единых закономерностей, определяющих техническое состояние и, в конечном итоге, интенсивность отказов группы однотипных технических устройств или их элементов, работающих в различных условиях нагружения.

Прогнозирование базируется на использовании реализаций ЭКП технологического оборудования, диагностируемых на различных временных этапах его эксплуатации.

Рассмотрим постановку задачи прогнозирования.

Для решения задачи весь период использования ОПО разделяется на два интервала: T_1 – интервал наблюдения за состоянием объекта; T_2 – интервал, в котором осуществляется прогнозирование.

В тех случаях, когда эрозионно-коррозионный износ является определяющим фактором перехода оборудования в предельное состояние, прогнозирование интенсивности износных отказов λ_δ может быть выполнено по изменению текущей толщины стенки t объекта (аппарата, трубопровода) при условии постоянства допускаемого напряжения материала стенки $[\sigma]=const$. В этой ситуации в качестве параметра, наиболее полно характеризующего техническое состояние объекта, целесообразно использовать степень износа δ .

Степень износа может быть определена как отношение фактического утонения стенки Δt_ϕ объекта к максимально возможному Δt_{max} при достижении стенкой расчетной толщины:

$$\delta = \frac{\Delta t_\phi}{\Delta t_{max}} \quad (2)$$

Параметр δ под действием случайных и детерминированных факторов изменяется в процессе эксплуатации объекта и достигает со временем предельного значения $[\delta]=1$ при $\Delta t_\phi = \Delta t_{max}$, после чего состояние объекта считается неработоспособным и квалифицируется как отказ.

Тогда прогнозирование интенсивности отказов может рассматриваться как прогнозирование изменения функции $\delta(\tau)$, реализации которой известны в моменты времени $\tau_d, d=1\dots j; \tau_d \in T_1$.

Необходимо по известным реализациям износа δ_d определить вероятность того, что значения функции $\delta(\tau)$ не выйдут за допустимые пределы $[\delta]$ в моменты времени $\tau_{j+l}, l=1\dots r; \tau_{j+l} \in T_2$, т.е. $P\{\delta_{j+l} < [\delta]\}$.

Предварительный анализ реализаций износа нефтехимического оборудования, выполненный на основании результатов нескольких последовательных диагностированных (рис. 1), позволяет полагать, что процесс износа может быть представлен линейной функцией:

$$\delta = a\tau, \quad (3)$$

где a – скорость износа (случайный параметр, распределенный по нормальному закону).

Корректность применения нормального распределения параметра a в случае накопления эрозионно-коррозионных повреждений в диагностируемом объекте согласуется с данными работ [3, 4].

Интенсивность износных отказов $\lambda_\delta(\tau)$ в соответствии с положениями теории надежности [5] может быть представлена как

$$\lambda_{\delta}(\tau) = \frac{f(\tau)}{P(\tau)} = \frac{f(\tau)}{1 - Q(\tau)}, \quad (4)$$

где $f(\tau)$ - плотность распределения вероятностей отказа; $P(\tau)$ - вероятность безотказной работы; $Q(\tau)$ – вероятность отказа.

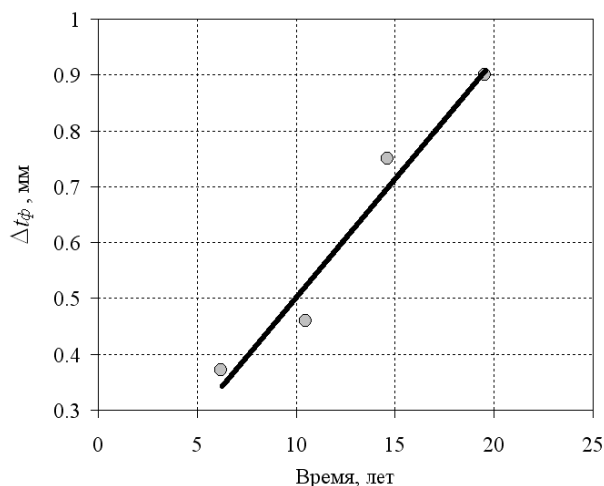


Рис. 1. Зависимость износа стенки ректификационной колонны от времени (рабочая среда - углеводороды)

Для нормального распределения нормированной случайной величины функция плотности распределения имеет вид [6]:

$$f(\tau) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) \quad (5)$$

Вероятность безотказной работы для рассматриваемого случая может быть определена следующим образом [7]:

$$P(\tau) = 0.5 + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^u \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du, \quad (6)$$

С учетом (3) – (5) получим выражение для точечной оценки интенсивности отказов:

$$\lambda_{\delta}(\tau) = \frac{\exp\left(-\frac{u^2}{2}\right)}{0.5 + \int_0^u \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du}, \quad (7)$$

В выражениях (5) ÷ (7) величину u , являющуюся квантилем нормального распределения, можно записать в соответствии с кумулятивной моделью отказов [7] в виде

$$u = \frac{[\delta] - \delta}{S_\delta} = \frac{[\delta] - a\tau}{S_a \tau}, \quad (8)$$

где δ - текущее значение степени износа стенки, дол. ед.; a - относительная скорость износа стенки, дол. ед./год; S_δ, S_a - статистические оценки среднеквадратичных отклонений соответственно степени и скорости износа стенки;

На рис. 2 представлена схема формирования износового отказа.

Процесс износа характеризуется прямыми, выходящими из начала координат (рис. 2, а), каждая из которых имеет определенную вероятность реализации. Функция $f(\delta)$ - плотность распределения степени износа $\delta(\tau)$. Значения $\tau_1 \dots \tau_j$ - время диагностирования объекта. Точки пересечения функций $\delta(\tau)$ с допустимым значением степени износа $[\delta]$ соответствуют моментам возможных отказов. Соответствующая этим пересечениям плотность распределения вероятности отказов (рис. 2, б) представлена функцией $f(\tau)$. Вероятность отказа для времени τ_{j+1} соответствует зачерненным площадям под кривыми $f(\delta)$ и $f(\tau)$. Ординаты графика (рис. 2, в) позволяют определить вероятности отказа $Q(\tau)$ или безотказной работы $P(\tau)$ для любого промежутка времени. Для нормального распределения характерна монотонно возрастающая интенсивность отказов, причем $\lambda_\delta(\tau) \rightarrow \infty$ при $\tau \rightarrow \infty$. Рост $\lambda_\delta(\tau)$ означает, что с увеличением наработки возрастает опасность отказов, обусловленная износом оборудования.

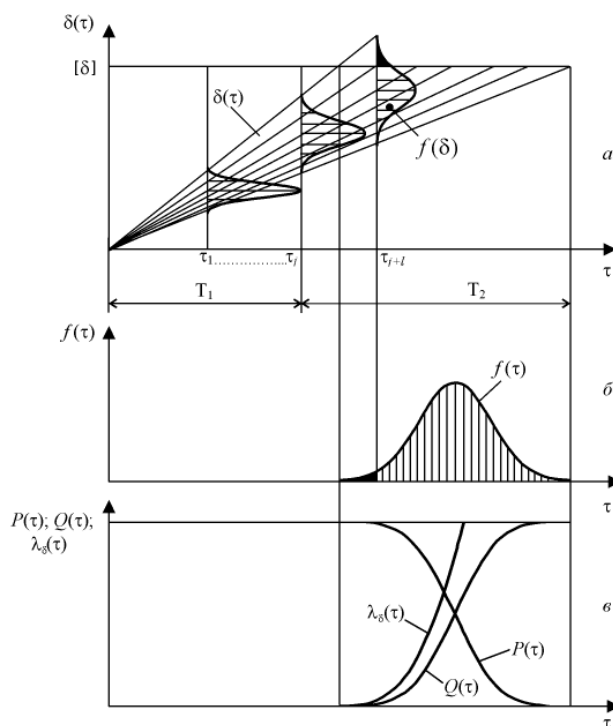


Рис. 2. Схема формирования износового отказа

Из уравнений (7) и (8) следует, что факторами, определяющими техническое состояние объекта, являются скорость повреждающих процессов a и время τ . Отсюда процедура определения интенсивности износовых отказов λ_δ сводится к решению двух задач:

- моделирование на основании результатов диагностики технологического оборудования кинетики накопления ЭКП (кинетики износа);

- вероятностное прогнозирование на базе кинетических моделей интенсивности отказов оборудования, соответствующей его техническому состоянию.

Величины, входящие в уравнение (8), определяются в процессе диагностирования. Реальная ситуация, когда диагностирование проводилось только один раз, или предыдущие измерения были непредставительными. В этом случае для каждого диагностируемого объекта i -го типа оборудования (колонное, теплообменное и т.д.) имеем:

$$\delta_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \delta_k = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left(\frac{t_n - t_k}{t_n - t_R} \right), \quad i=1 \dots m, \quad (9)$$

$$a_i = \frac{\delta_i}{\tau_{d_i}}, \quad (10)$$

$$S_{a_i} = \frac{S_{\delta_i}}{\tau_{d_i}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (\delta_k - \delta_i)^2}}{\tau_{d_i}}, \quad (11)$$

где n - число замеров толщины стенки при диагностировании; δ_k - степень износа стенки в месте k -го замера, дол. ед./год; t_n - номинальная толщина стенки диагностируемого объекта, мм; t_k - текущая толщина стенки в месте k -го замера, мм; t_R - расчетная толщина стенки, мм; при $t_k = t_R$ $\delta_k = [\delta] = 1$; m - число диагностируемых объектов i -го типа оборудования; τ_{d_i} - период эксплуатации объекта i -го типа оборудования на момент диагностирования, лет.

Для изучения кинетики износа целесообразно вместо относительной скорости износа a_i в формуле (10) с размерностью дол.ед./год использовать абсолютную скорость \bar{a}_i с размерностью мм/год, не требующую дополнительной информации о расчетной толщине стенки t_R и связанную с относительной скоростью с помощью очевидного соотношения, вытекающего из формул (9) и (10):

$$\bar{a}_i = a_i(t_n - t_R) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{t_n - t_k}{\tau_{d_i}}, \quad \text{мм/год}, \quad (12)$$

Скорость износа в общем случае может быть представлена зависимостью, отражающей влияние режимных и конструктивных параметров, материального исполнения аппарата, рабочей среды и ее агрегатного состояния. Для группы однотипных объектов:

$$\bar{a} = f(T, P, D, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3), \quad (13)$$

где T, P - соответственно температура и давление в аппарате (трубопроводе); D - диаметр аппарата; α_1 - материал аппарата; α_2, α_3 - соответственно рабочая среда и ее агрегатное состояние.

Моделирование кинетики износа может быть осуществлено с использованием методов регрессионного и корреляционного анализа [8, 9].

Предварительный анализ и обработка результатов диагностирования выполняются в соответствии с основными положениями математической статистики [10].

Грубые результаты диагностирований оцениваются, например, по значениям степени износа и исключаются на основании статистических критериев:

$$v_k = \frac{|\delta_k - \delta|}{S_\delta \cdot \sqrt{\frac{n-1}{n}}} \leq v_{табл} \quad (14)$$

где $v_{табл}$ – табличное значение критерия.

Если значения $v_k > v_{табл}$, то грубые значения δ_k исключаются из дальнейшего рассмотрения.

Априори принимается нормальное распределение наблюдаемых значений степени износа относительно ее среднего значения. Проверка гипотезы нормальности распределения осуществляется сравнением выборочных значений коэффициентов асимметрии и эксцесса с дисперсиями этих коэффициентов.

Выборочные коэффициенты асимметрии и эксцесса, а также их дисперсии определяются по формулам:

$$\gamma_{1i} = \frac{1}{n \cdot S_{\delta_i}^3} \cdot \sum_{k=1}^n (\delta_k - \delta_i)^3, \quad (15)$$

$$\gamma_{2i} = \frac{1}{n \cdot S_{\delta_i}^4} \cdot \sum_{k=1}^n (\delta_k - \delta_i)^4 - 3 \quad (16)$$

$$D(\gamma_{1i}) = \frac{6(n-1)}{(n+1) \cdot (n+3)} \quad (17)$$

$$D(\gamma_{2i}) = \frac{24n \cdot (n-2) \cdot (n-3)}{(n+1)^2 \cdot (n+3) \cdot (n+5)} \quad (18)$$

Если

$$|\gamma_{1i}| \leq 3\sqrt{D(\gamma_{1i})}, \quad (19)$$

$$|\gamma_{2i}| \leq 5\sqrt{D(\gamma_{2i})}, \quad (20)$$

то выборочные коэффициенты асимметрии и эксцесса незначимо отличаются от нуля, и наблюдаемое распределение можно считать нормальным.

Проверка однородности дисперсий степени износа S_δ^2 может быть выполнена по критерию Бартлета:

$$\frac{B}{C} \leq \chi_{1-p}^2, \quad (21)$$

$$\text{где} \quad B = 2.303(f \cdot \lg S_\delta^2 - \sum_{i=1}^m f_i \cdot \lg S_{\delta_i}^2), \quad (22)$$

$$C = 1 + \frac{1}{3(m-1)} \cdot \left(\sum_{i=1}^m \frac{1}{f_i} - \frac{1}{f} \right), \quad (23)$$

χ^2 - критерий Пирсона при уровне значимости p ;

$f = \sum_{i=1}^m n_i - m$ - число степеней свободы общей дисперсии степени износа S_{δ}^2 для всех диагностируемых объектов i -го типа оборудования;

$f_i = (n_i - 1)$ - число степеней свободы выборочных дисперсий степени износа $S_{\delta_i}^2$ для конкретных диагностируемых объектов i -го типа оборудования.

Общая дисперсия воспроизводимости степени износа для всех объектов i -го типа оборудования определяется как средневзвешенное значение выборочных дисперсий:

$$S_{\delta}^2 = \frac{\sum_{i=1}^m f_i \cdot S_{\delta_i}^2}{f} = \frac{\sum_{i=1}^m (n_i - 1) \cdot S_{\delta_i}^2}{\sum_{i=1}^m n_i - m} \quad (24)$$

Учет в рамках рассматриваемых аспектов специфики и реального состояния технологического оборудования при оценке его потенциальной опасности является, по нашему мнению, важной задачей и необходимым условием повышения эффективности количественного анализа риска ОПО химического профиля. В современных условиях интенсивного использования изношенного оборудования эта задача представляется особенно актуальной.

Литература

1. ГОСТ Р 12.3.047-98 ССБТ. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля. Введ. 03.08.98. -М.: Изд-во стандартов, 2000. - 79 с.
2. Хенли Э. Дж., Кумамото Х. Надежность технических систем и оценка риска: Пер. с англ. / Под ред. В. С. Сыромятникова. -М.: Машиностроение, 1984. -528 с.
3. Герцбах И. Б., Кордонский Х. Б. Модели отказов / Под ред. Б. В. Гнеденко. - М.: Советское радио, 1966. -167 с.
4. Маннапов Р. Г. Оценка надежности химического и нефтяного оборудования при поверхностном разрушении. -М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1988. - 38 с.
5. Зубова А. Ф. Надежность машин и аппаратов химических производств. -Л.: Машиностроение, 1971. -183 с
6. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. - М.: Наука, 1988. -480 с.
7. Сугак Е. В., Василенко Н. В., Назаров Г. Г., Паньшин А. Б., Каркарин А. П. Надежность технических систем. – 2-е изд., доп. и перераб. – Красноярск: НИИ СУВПТ, 2001. – 608 с.
8. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ: Пер с англ. –2-е изд; перераб. и доп. -М.: Статистика, 1973. -365 с.
9. Кендалл М., Стьюарт А. Статистические выводы и связи. -М.: Наука, 1973. - 899 с.

10. Ахназарова С. Л., Кафаров В. В. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Высш. шк., 1985. -327 с.