

V. N. Nikolaev

THERMO ANEMOMETRIC TRANSDUCER OF AIRFLOW MASS VELOCITY

Thermo anemometric transducer of airflow mass velocity has been developed. Estimation method of dynamic measurement error on the basis of the transducer unsteady heat exchange mathematical modeling is suggested in the article.

Keywords: thermo anemometer, mass velocity, mathematical model, dynamic and static errors, unsteady heat exchange.

© Николаев В. Н., 2011

УДК 630.36

Е. Н. Окладникова, Е. В. Сугак

ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ С УЧЕТОМ СЛУЧАЙНЫХ ФАКТОРОВ*

Предложена методика расчета интенсивности отказов и остаточного ресурса безопасной эксплуатации технического объекта с учетом случайных факторов. Результаты расчетов позволяют определять вероятность отказа объекта и минимизировать риск возникновения аварийных ситуаций при решении задач оптимизации систем технического обслуживания и обеспечивать управление безопасностью при эксплуатации потенциально опасных объектов.

Ключевые слова: эксплуатация, ресурс, безопасность, риск, интенсивность отказов, техническое обслуживание.

При эксплуатации любых технических объектов происходит старение их элементов в результате различных механических, тепловых, электрических и других физико-химических процессов или под воздействием внешних и внутренних нагрузок различной природы. Эти процессы и факторы вызывают накопление повреждений, развитие дефектов, необратимые изменения свойств конструкционных материалов и параметров элементов технических объектов и, как следствие, постепенное снижение их функциональности, что впоследствии приводит к отказам и к наступлению предельного состояния, после чего дальнейшая эксплуатация невозможна.

Эффективность эксплуатации технического объекта, в первую очередь, связана с его использованием по назначению, поэтому основная задача управления процессом технического использования заключается в повышении доли времени использования при приемлемых затратах на техническое обслуживание и ремонт [1].

Современный уровень научно-технического прогресса позволяет создавать объекты, которые обладают высокой надежностью. Основой для этого служит комплекс мер, применяемых на стадиях проектирования, изготовления, монтажа и эксплуатации. Наиболее актуальной является проблема прогнозирования и обеспечения технического ресурса объекта. Общая схема оценки остаточного ресурса представлена на рисунке [2].

По результатам прогнозирования на стадии эксплуатации возможно увеличение ресурса и сроков

эксплуатации элементов технических систем. Решение этой задачи предусматривает установление качественных и количественных закономерностей, определяющих ресурс, разработку методов оценки влияния различных факторов на средний ресурс и разброс ресурса эксплуатируемого объекта [1–4].

Контролируемыми параметрами могут быть как непосредственно измеряемые величины повреждений (глубина коррозии или износ детали), так и выходные параметры оборудования (производительность, коэффициент полезного действия, степень разделения, очистки) и другие количественные показатели качества. Контроль изменения этих параметров по мере приближения их значений к предельно допустимым позволяет прогнозировать момент наступления отказа [5; 6]. Оценка надежности в данном случае осуществляется путем проведения периодических обследований оборудования, измерения значений определяющего параметра, статистической обработки результатов измерений и последующего расчета показателей надежности.

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.

*Работа выполнена при поддержке аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы» (проект 2.1.2/2076).

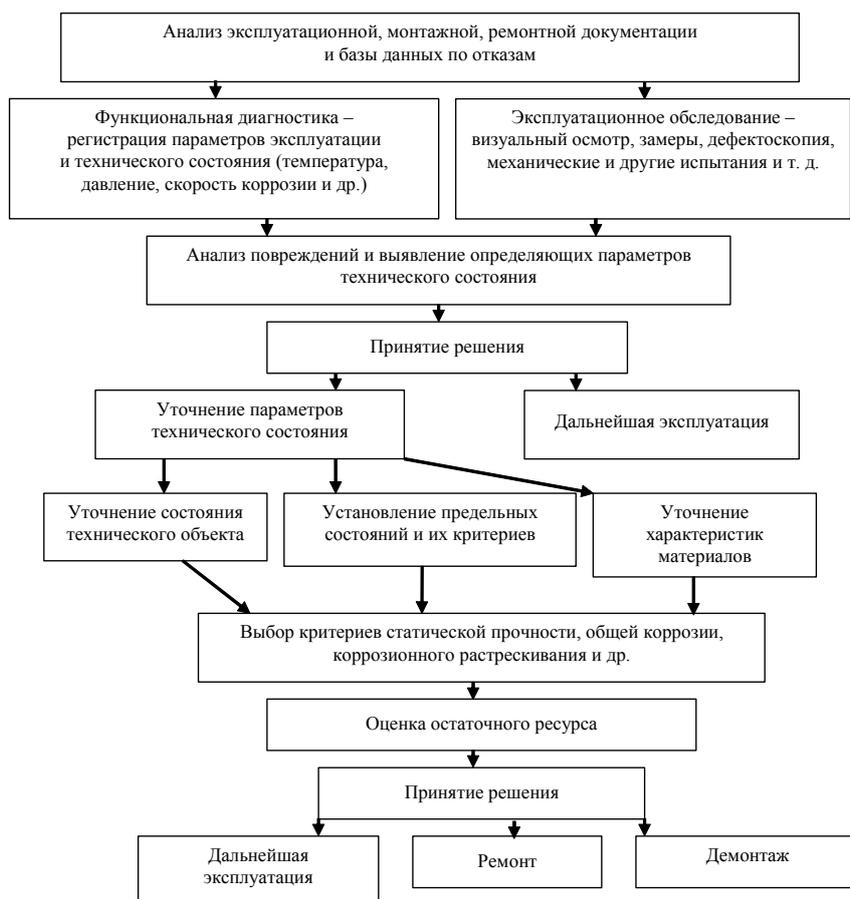


Схема оценки остаточного ресурса

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 таком случае определяется как вероятность ненаступления ни одного из возможных предельных состояний в течение заданного срока эксплуатации.

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 следующие: рабочее давление – 0,6 кгс/мм² или вакуум, рабочая среда – латекс, объем – 29 650 м³, температура – от 30 до 65 °С, фактическая толщина металла обечайки сосуда – 12 мм, с учетом поля допуска – 12 ± 0,2 мм [7].

Среднее квадратическое отклонение толщины стенок обечайки находится исходя из предположения о нормальном распределении по правилу «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 $S_{cp} = 12$ мм.

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

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

На основе найденных значений $\sigma_{исх}$, $\sigma_{эсп}$ и $\mu_{исх}$ и $\mu_{эсп}$, используя генератор случайных чисел MathCAD, получено по 1 000 значений исходной и фактической толщины стенки $S_{исх}$ и $S_{эсп}$.

При оценке ресурса по определяющему параметру $X(t)$ (в рассматриваемом случае это толщина металла обечайки сосуда) обычно используется зависимость вида

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

где X_0 – начальное значение определяющего параметра; γ – скорость изменения параметра; показатель

степени n может принимать значения из интервала от 1 до 2 [1].

В двух предельных случаях при $n = 1$ и $n = 2$

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

Тогда оценка полного T ресурса при известном значении γ производится решением уравнений (4) при $X = X_{пр}$, оценка остаточного ресурса при $X = X_{эсп}$:

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

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

Расчетное значение допустимой толщины металла из условий прочности определяется как

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

где $P_{раб} = 0,6 \text{ кгс/мм}^2$ – рабочее давление; $D = 2400 \text{ мм}$ – внутренний диаметр сосуда; $\varphi = 1$ – коэффициент прочности сварного шва; $\sigma_{доп} = 168 \text{ МПа}$ – 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 имеет вид

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

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

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

Плотность распределения $f(X)$ получим, дифференцируя по величине x , которая входит как параметр в верхний предел интеграла. Так как случайные величины X_0 и γ независимы и равноправны, плотность распределения находится как

$$f(X) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(X_0) f_2(X - X_0) dX_0 \quad (8)$$

или

$$f(X) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(X - \gamma) f_2(\gamma) d\gamma, \quad (9)$$

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

Принимая для них нормальный закон распределения, получим

$$f(X_0) = \frac{1}{\sigma_{X_0} \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{[X_0 - \mu_{X_0}]^2}{2\sigma_{X_0}^2} \right\}, \quad (10)$$

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

Закон распределения случайной величины X определим как [8]:

$$f(X) = \frac{1}{2\pi\sigma_{X_0}\sigma_\gamma} \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left\{ -\frac{[X_0 - \mu_{X_0}]^2}{2\sigma_{X_0}^2} \right\} \times \exp \left\{ -\frac{[X_0 - X - \mu_\gamma]^2}{2\sigma_\gamma^2} \right\} dX_0. \quad (12)$$

После преобразований получим

$$f(X) = \frac{1}{\sigma_X \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{[X - \mu_X]^2}{2\sigma_X^2} \right\}, \quad (13)$$

где

$$\mu_X = \mu_{X_0} - t\mu_\gamma \quad \text{или} \quad \mu_X = \mu_{X_0} - t^2\mu_\gamma, \quad (14)$$

$$\sigma_X = \sqrt{\sigma_{X_0}^2 + t^2 \cdot \sigma_\gamma^2} \quad \text{или} \quad \sigma_X = \sqrt{\sigma_{X_0}^2 + t^4 \cdot \sigma_\gamma^2}, \quad (15)$$

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

или

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

Далее необходимо определить вид и функцию распределения ресурса. Так как вывод аналитических зависимостей представляет определенные сложности, имеет смысл решать данную задачу в численном виде. Значения t , μ_{X_0} , μ_X , σ_{X_0} и σ_X известны, используя формулы (14), (15) определяем μ_γ и σ_γ :

$$\mu_\gamma = \frac{\mu_{X_0} - \mu_X}{t} \quad \text{или} \quad \mu_\gamma = \frac{\mu_{X_0} - \mu_X}{t^2}, \quad (17)$$

$$\sigma_\gamma = \pm \frac{\sqrt{\sigma_{X_0}^2 - \sigma_X^2}}{t} \quad \text{или} \quad \sigma_\gamma = \pm \frac{\sqrt{\sigma_{X_0}^2 - \sigma_X^2}}{t^2}. \quad (18)$$

После определения значений μ_γ и σ_γ с помощью генератора случайных чисел программы MathCAD получено 1 000 значений скорости изменения определяющего параметра и 1 000 значений ресурса. После проверки гипотезы о законе распределения с помо-

щью критерия Колмогорова строится функция распределения ресурса, которая хорошо аппроксимируется функцией нормального распределения:

$$f(T) = \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{[T - \mu_t]^2}{2\sigma_t^2} \right\}. \quad (19)$$

По полученным данным определены параметры функции распределения полного и остаточного ресурсов (табл. 1).

Таблица 1

Параметры функции распределения полного и остаточного ресурсов

| Зависимость | μ_m | σ_m | $\mu_{ост}$ | $\sigma_{ост}$ |
|---------------------------|---------|------------|-------------|----------------|
| $X(t) = X_0 - \gamma t$ | 39,769 | 0,756 | 29,165 | 4,026 |
| $X(t) = X_0 - \gamma t^2$ | 33,959 | 0,322 | 29,013 | 2,006 |

Исходя из функциональных связей между показателями безотказности, интенсивность отказов (условная плотность вероятности возникновения отказа объекта, определяемая для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента отказ не возник) определяется как [9]:

$$\lambda(t) = \frac{f(T)}{\int_{\tau} f(T) dt}, \quad (20)$$

где $f(t)$ – плотность распределения ресурса.

Тогда для рассматриваемого случая

$$\lambda(t) = \frac{\left(\frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{[T - \mu_t]^2}{2\sigma_t^2} \right\} \right)}{\int_{\tau} \left(\frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{[T - \mu_t]^2}{2\sigma_t^2} \right\} \right) dt}. \quad (21)$$

Для решения интеграла произведена замена переменных:

$$\int_{\tau} f(T) dt = \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} \int_{\tau} \exp \left\{ -\frac{[T - \mu_t]^2}{2\sigma_t^2} \right\} dt = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{\xi} \exp(-x^2) dx, \quad (22)$$

где $x = \frac{T - \mu_t}{\sqrt{2}\sigma_t}$, 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 [10]:

$$\exp(-x^2) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-x^2)^n}{n!} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n x^{2n}}{n!}. \quad (23)$$

Следовательно:

$$\int_{\tau} f(T) dt = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{\xi} \exp(-x^2) dx = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{\xi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n x^{2n}}{n!} dx = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n \xi^{2n+1}}{n!(2n+1)} \quad (24)$$

или

$$\int_{\tau} f(T) dt = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n \left((T - \mu_t) / \sqrt{2}\sigma_t \right)^{2n+1}}{n!(2n+1)}, \quad (25)$$

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

Тогда формула (21) примет вид

$$\lambda(t) = \frac{\left(\frac{1}{\sigma_t \sqrt{2}} \exp \{ -x^2 \} \right)}{\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n \xi^{2n+1}}{n!(2n+1)}}. \quad (26)$$

Некоторые результаты расчетов значений интенсивности отказов и остаточного ресурса приведены в табл. 2.

Таблица 2

Интенсивность отказа объекта

| Зависимость определяющего параметра | Остаточный ресурс $T_{ост}$, лет | Интенсивность отказов λ , Γ^{-1} (ч^{-1}) |
|-------------------------------------|-----------------------------------|---|
| $X(t) = X_0 - \gamma t$ | 42 | $3,68 \cdot 10^{-4}$ ($4,21 \cdot 10^{-8}$) |
| $X(t) = X_0 - \gamma t^2$ | 35 | $1,78 \cdot 10^{-3}$ ($2,04 \cdot 10^{-7}$) |

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 управление безопасностью при эксплуатации потенциально опасных объектов [1; 11; 12].

Библиографические ссылки

1. Окладникова Е. Н. Оптимизация системы технического обслуживания потенциально опасных объектов : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.01 : защищена 18.06.2008 : утв. 10.10.2008. Красноярск : СибГАУ. 2008.
2. РД 09-102-95. Методические указания по определению остаточного ресурса потенциально опасных объектов, подконтрольных Госгортехнадзору России : утв. постановлением Госгортехнадзора России от 17.11.95 г. № 57 [Электронный ресурс]. URL: www.docload.ru/basesdoc/3/3022/index.htm.
3. Макаров Ю. В. Определение остаточного ресурса промышленных трубопроводов в условиях локализо-

ванной механохимической повреждаемости : дис. ... канд. техн. наук : 250019. Уфа, 2004.

4. Окладникова Е. Н., Сугак Е. В. Вероятностная оценка ресурса узлов трения и износа // Вестник СибГАУ. Вып. 6. 2005. С. 148–152.

5. ГОСТ 23942–80. Оценка показателей качества продукции по изменениям контролируемого параметра. М. : Изд-во стандартов, 1980.

6. РД 26-10-87. Методические указания. Оценка надежности химического и нефтяного оборудования при поверхностном разрушении [Электронный ресурс]. URL: www.docload.ru/basesdoc/9/9080/index.htm.

7. Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя : в 3 т. Т. 1. М. : Машиностроение, 2001.

8. Светлицкий В. А. Статистическая механика и теория надежности. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002.

9. Надежность технических систем / Е. В. Сугак [и др.] Красноярск : МГП «Раско», 2001.

10. Математика : энцикл. / под. ред. Ю. В. Прохорова. М. : Большая Российская энциклопедия, 2003.

11. Окладникова Е. Н., Сугак Е. В., Игнатьев Д. А. Оптимальное управление безопасностью промышленных объектов // Вестник СибГАУ. Вып. 4 (17). 2007. С. 43–47.

12. Окладникова Е. Н., Сугак Е. В. Управление техническим состоянием потенциально опасных объектов // Системы управления и информационные технологии : науч.-техн. журн. Вып. 1.1(35). М. : Научная книга, 2009. С. 192–196.

E. N. Okladnikova, E. V. Sugak

ESTIMATION OF RESIDUAL RESOURCE OF SAFE EXPLOITATION TAKING INTO ACCOUNT CASUAL FACTORS

The authors offer a method for calculation of intension of refuses and residual resource of safe exploitation of technical object with the account of casual factors. Results of calculations allow to define probability of object refuse and to minimize risk of accident occurrence at the decision of problems of optimization of systems of technical service, and to provide optimum control of safety at exploitation of potentially dangerous objects.

Keywords: exploitation, resource, safety, risk, refuse intensity, technical service.

© Окладникова Е. Н., Сугак Е. В., 2011

УДК 629.7.018.4:534.01

Л. А. Семенова, Е. А. Лысенко, К. Е. Лысенко

МЕТОДИКА ВЫБОРА УНИВЕРСАЛЬНОЙ ВИБРАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Представлена методика выбора универсальной вибрационной системы для динамических испытаний космических аппаратов на примере схемы «тандем». Определены параметры системы и даны рекомендации по ее применению.

Ключевые слова: методика, вибрационная система, испытания, космический аппарат.

Разработка, изготовление и испытания различных космических аппаратов, в том числе и для коммерческих заказчиков иностранных государств, должны соответствовать современным тенденциям расширения рынка полезных нагрузок, рациональному и эффективному использованию космической техники, материалов и космических технологий.

Космические аппараты (КА) на высокоэллиптические и геостационарные орбиты выводятся на ракетах-носителях (РН) типа «Протон». Одной из задач при проектировании, создании новых КА или их модернизации является обеспечение длительного срока активного существования аппаратов на орбите в интересах заказчика.

Космические аппараты связи размещают под головным обтекателем (ГО) ракеты-носителя. Количество и масса выводимых спутников влияет на их компоновку на разгонном блоке РН. Для одновременного

вывода нескольких КА существует три основных вида компоновки: последовательная по схеме «тандем», параллельная и последовательно-параллельная. Поэтому изменяемыми элементами в составе космического комплекса являются и КА, и их компоновка с разгонным блоком. Известно, что максимальные значения параметров механического нагружения системы «РН + разгонный блок + КА» имеют место при запуске двигателей первой ступени, в зоне полета при максимальных скоростных напорах и в момент разделения ступеней. Создаваемая при этом вибрация от работы двигательных установок и средств отделения ступеней и КА от разгонного блока не должна влиять на работоспособность приборов КА и механизмов раскрытия солнечных батарей и антенн. Для обеспечения поставленных задач осуществляется комплекс испытаний – наземная экспериментальная отработка. Такие цели, как отработка параметров конструкции на