

## Введение

При длительной эксплуатации оборудования неизбежно возникают повреждения или нарушения работоспособности его элементов даже при отсутствии дефектов изготовления и соблюдении правил эксплуатации.

Это обусловлено особенностями производств: высокой коррозионной активностью технологических сред, высокими температурой, давлением и скоростью технологических потоков, наличием переменных температурных деформаций и сложного напряженного состояния металла оборудования.

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.

Отказы оборудования можно разделить на три вида: механические, технологические и обусловленные ошибками (нарушениями) при эксплуатации, изготовлении или разработке оборудования.

К первому виду относят отказы, вызванные нарушением механической работоспособности оборудования вследствие изнашивания, коррозии, поломки деталей, нарушения формы элементов оборудования, возникновения недопустимых сопутствующих процессов - вибрации, стука, утечки технологической среды, перегрева подшипников и др.

К технологическим относят отказы, обусловленные нарушением хода технологического процесса, выполняемого на данном оборудовании, приводящего к выпуску некондиционного продукта или нарушению функционирования оборудования.

Доля отказов третьего вида определяется в основном уровнем технологической дисциплины и культуры производства на конкретном предприятии. В методике этот вид отказов не анализируется.

Большая часть механических и технологических отказов (около 90%) проявляется постепенно в изменении одного или нескольких выходных параметров, поэтому их называют также параметрическими. Контролируемыми параметрами могут быть как непосредственно намеряемые величины повреждений (глубина коррозии стенок, износ

детали), так и выходные параметры оборудования (производительность, коэффициент полезного действия), параметры вибрации, шума и т.д.

Остаточным ресурсом называют запас возможной наработки оборудования после момента контроля его технического состояния (или ремонта), в течение которого обеспечивается соответствие, требованиям НТД всех его основных технико-эксплуатационных показателей и показателей безопасности.

## **1. Концепция прогнозирования остаточного ресурса**

Остаточный ресурс оборудование может иметь не только до истечения расчетного срока службы, но и после него. Это обусловлено действующими нормами и правилами расчета сроков службы оборудования, предусматривающими обеспечение прочности и износостойкости изделий при наиболее неблагоприятных режимах нагружения в заданных условиях эксплуатации, а также при минимальных уровнях механических характеристик конструкционных материалов, обеспечиваемых по государственным стандартам. Фактические режимы нагружения при соблюдении правил эксплуатации оказываются, как правило, менее напряженными, чем расчетные, что снижает интенсивность расходования заложенных запасов (по прочности, износо- и коррозионной стойкости) обеспечивает резерв по остаточному ресурсу оборудования.

Возможность прогнозирования величины остаточного ресурса обеспечивается при одновременном наличии следующих условий:

- известны параметры, определяющие техническое состояние оборудования (ПТС);
- известны критерии предельного состояния оборудования;
- имеется возможность периодического (или непрерывного) контроля значений ПТС.

Прогнозирование надежности оборудования обычно осуществляется по схеме (рис. 1). Через определенные периоды эксплуатации  $t_1$ ,  $t_2$ , ... и т.д. измеряют максимальные величины возникших повреждений (износа, коррозии, деформаций)  $h_1$ ,  $h_2$ , ... и т.д. и экстраполируют зависимость до предельно допустимой величины повреждений  $h_n$ . Такой метод позволяет получить достаточно точные оценки показателей надежности, если известен вид зависимости  $h(t)$  и при измерениях зна-

чений  $h$  определяются действительно максимальные значения повреждений, т.е. осуществляется сплошной контроль поверхностей оборудования.

Вид зависимости  $h(t)$  установлен для многих видов разрушения. При некоторых видах коррозии и изнашивания (трение, эрозионное) зависимость износа от времени линейная:  $h(t) = h_0 + C \times t$ , где  $h_0$  и  $C$  - постоянные величины для заданных условий. Некоторые другие виды зависимостей  $h(t)$  рассмотрены в приложении 2.

При прогнозировании в зависимости от срока эксплуатации оборудования применяют два подхода. При малом сроке эксплуатации (относительно нормативного) и незначительной поврежденности оборудования для прогнозирования его остаточного ресурса используют только информацию о нагруженности. При сроке эксплуатации близком к нормативному или значительной поврежденности элементов оборудования дополнительно исследуют степень поврежденности оборудования. Преимуществом первого подхода является его меньшая трудоемкость, второго - более точный прогноз, возможность выявления дополнительного резерва ресурса оборудования.

В зависимости от требуемой достоверности прогноза и возможностей получения информации применяют два подхода к прогнозированию: упрощенный, основанный на детерминистических оценках показателей, и уточненный, основанный на вероятностных оценках.

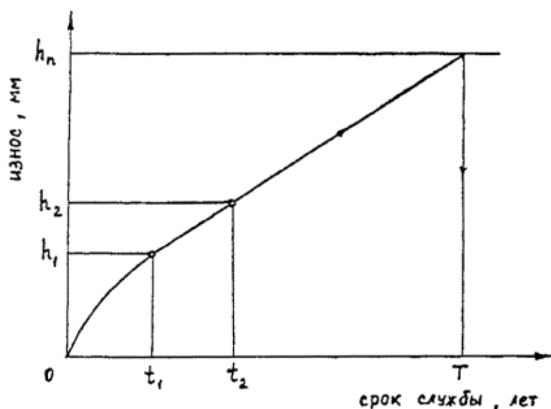


Рис. 1. Типовая схема прогнозирования долговечности оборудования:  
 $t$  - продолжительность эксплуатации;  $h$  - величина повреждений.

При первом - отклонения контролируемых параметров относят к погрешностям методов контроля, случайным помехам и при прогнозировании остаточного ресурса в расчетах учитывают с помощью коэффициентов запасов. При втором подходе колебания наблюдаемых параметров используют в качестве дополнительной информации, что позволяет повысить достоверность прогнозирования.

В методике детерминистические методы выделены в отдельную группу (раздел 3), а вероятностные методы изложены в разделах 4-6.

## **2. Анализ условий эксплуатации**

Анализ условий эксплуатации проводят с целью определения возможности достоверного прогнозирования остаточного ресурса оборудования, выявления наиболее информативных параметров и источников получения исходных данных, необходимых для расчета.

Возможность прогнозирования остаточного ресурса оборудования имеется в тех случаях, когда критерии предельного состояния оборудования определены в численных значениях, и в ходе эксплуатации оборудования ведутся измерения (периодические или непрерывные) и регистрация параметров, (ПТС), определяющих предельное состояние.

Примеры возможности прогнозирования остаточного ресурса.

1. Предельным состоянием аппарата, работающего с коррозионно-активной средой, является уменьшение толщины его стенок до расчетной величины ( $S_{\min}$ ). При эксплуатации периодически осуществляет контроль толщины стенок.

2. Предельным состоянием теплообменника является ухудшение теплообмена из-за отложений на трубах, выражающееся в снижении температуры на выходе нагреваемого продукта до предельно допустимой температуры ( $T_{\min}$ ) При эксплуатации ведется непрерывный контроль с записью на ленту температуры на выходе из аппарата.

Информативными параметрами для прогнозирования остаточного ресурса оборудования могут быть:

- величины возникающих повреждений (глубина коррозии, величины эрозийного или механического износа, деформации ползучести);
- параметры сопутствующих процессов (уровни вибрации агрегатов, величины утечек в уплотнениях, температура узлов трения и др.);
- технологические параметры (давление, температура, расход продукта);

- показатели качества и эффективности функционирования оборудования (производительность, расход электроэнергии, к.п.д. и т.п.).

Для выбора наиболее информативных параметров составляют полный перечень предельных состояний оборудования и контролируемых параметров, связанных с каждым предельным состоянием. Затем из этого перечня исключают зависимые (вторичные) параметры, если при контроле основных параметров обеспечивается получение достоверных данных в достаточном объеме.

По результатам анализа определяют имеющиеся источники получения исходных данных для прогнозирования (вахтовые журналы, ведомости дефектов, контрольные карты, диаграммы и др.) или при их недостатке планируют специальные наблюдения за изменением эксплуатационных параметров.

### **3. Прогнозирование остаточного ресурса при малоцикловых нагрузках**

Стальные сосуды и аппараты, подвергающиеся при эксплуатации периодическим нагрузкам, могут разрушаться от малоцикловой усталости металла. Поэтому они должны проверяться на циклическую прочность.

При эксплуатации реальных сосудов фактические действующие нагрузки и напряжения в их элементах отличаются от расчетных, причем в зонах концентрации напряжений или нарушения непрерывности возможно весьма значительное превышение допускаемых напряжений, определяемых по ГОСТ 14249-89. Кроме того, при эксплуатации сосудов возникают различные повреждения, которые создают дополнительные концентрации напряжений. Поэтому при оценке остаточного ресурса сосудов необходимо проведение исследования их напряженного состояния с учетом имеющихся концентраторов напряжений. Исследования выполняют расчетными, экспериментальными и расчетно-экспериментальными методами. Расчеты напряженного состояния выполняют с учетом фактической геометрии конструкции, фактических толщин несущих элементов и имеющихся концентраторов напряжений. При экспериментальных методах применяют натурное тензометрирование [34] в условиях эксплуатации, а также замеры температуры несущих конструкций оборудования путем термографирования, использования контактных термометров, термопар или пирометров.

На основе проведенного исследования выполняют расчеты допустимого числа циклов нагружения [N] в соответствии с ГОСТ 25859-83 и определяют остаточный ресурс сосуда путем вычитания из [N] фактически отработанного числа циклов.

При наличии в элементах сосудов дефектов типа трещин применение для оценки остаточного ресурса ГОСТ 25859-83 не допускается.

#### **4. Методы прогнозирования остаточного ресурса составных частей машин**

Среди параметров технического состояния (ПТС) различают прямые и косвенные параметры.

Прямой ПТС - это параметр технического состояния (ТС), непосредственно характеризующий конкретное свойство объема или его составной части - и определяющий его предельное состояние. Косвенный ПТС - это параметр ТС, связанный с прямым ПТС детерминированной или стохастической зависимостью, изменяющийся в результате изменения прямых ПТС.

Прогнозирование остаточного ресурса изделия по косвенным параметрам основано на одновременном выполнении условий:

- известны физические процессы, приводящие к ресурсным отказам, а также математические модели изменения прямых (структурных) и косвенных (диагностических) параметров;

- для каждого прямого ПТС установлены предельные значения, достижение которых определяет величину ресурса по данному параметру;

- в процессе наблюдения за изменением технического состояния изделия имеется возможность фиксации параметров, отражающих индивидуальные особенности изделия;

- имеется информация о функциональных или регрессионных соотношениях между прямыми и косвенными ПТС;

- зависимость между математическими ожиданиями прямых и косвенных ПТС является монотонной и непрерывной.

Определение остаточного ресурса по косвенным ПТС сопровождается, в общем случае, тремя видами погрешностей:

- погрешностями измерения косвенных параметров;

- погрешностями, связанными со случайной природой физических процессов развития отказов, а также методическими погрешностями определения прямых ПТС по значениям косвенных.

В зависимости от того, какой информацией располагает исследователь относительно объекта, остаточный ресурс которого прогнозируется, в РД рассмотрены три группы типовых ситуаций.

Первая группа типовых ситуаций характеризуется наличием следующей информации:

- известен вид функции  $F$ , определяющий связь между прямыми и косвенными параметрами, все коэффициенты и дисперсии этих коэффициентов;

- имеются результаты периодических измерений каждого косвенного параметра.

Вторая группа типовых ситуаций характеризуется следующей информацией:

- вид функции  $F$  известен, коэффициенты неизвестны;

- имеются результаты периодических измерений косвенных параметров, а также результаты обучающего эксперимента, в процессе которого производится одновременное измерение прямых и косвенных ПТС.

Третья группа типовых ситуаций характеризуется следующей информацией:

- функция  $F$  монотонна и непрерывна (общий вид неизвестен);

- имеются результаты обучающего эксперимента.

Дисперсия оценки остаточного ресурса представлена в виде суммы трех слагаемых: погрешности измерений, погрешности определения коэффициентов функции  $F$  и дисперсии случайного изменения приращений контролируемых параметров.

Математическое описание процесса изменения параметра технического состояния  $Y(t)$  (после приработки) основано на аппроксимации каждой реализации данного процесса случайной функцией следующего вида:

$$Y(t) = Kt^{\alpha} + z(t), \quad (1)$$

где  $K$  - случайное для группы одноименных составных частей, но неизменное для каждой реализации случайного процесса значение показателя скорости изменения параметра;

а - показатель степени аппроксимирующей функции, характеризующий конструктивные особенности составной части;

$z(t)$  - нормальный стационарный случайный процесс отклонений фактических значений параметра от аппроксимирующей степенной функции каждой реализации процесса  $Y(t)$ .

Статистические характеристики случайного процесса  $z(t)$  при  $t > 0,3 T_{cp}$  следующие:

$$M[z(t)] = 0; \quad D = [z(t)] = \sigma^2; \quad R[z(t), z(t + \Delta t)] = R(\Delta t);$$

$$f[z(t_k)] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{z^2(t_k)}{2\sigma^2}\right] \quad (2)$$

Средний остаточный ресурс составной части вычисляют на основе информации об изменении параметра ее технического состояния  $Y_k$  и о наработке  $t_k$  к моменту контроля по приближенной формуле:

$$t_{ост}^{cp} = t_k \left[ \left( \frac{Y_{п}}{Y_k} \right)^{1/2} - 1 \right] K_t \quad (3)$$

При  $s < 0,03$   $Y_{п}$  можно не учитывать поправочный коэффициент  $K_t$ .

Точно условный средний остаточный ресурс определяют по формуле

$$t_{ост}^{cp} = \int_0^{\infty} t_{ост} dQ[t_{ост} / Y(t_k) = Y_k] \quad (4)$$

где  $Q[p. t_{ост} / Y(t_k) = Y_k]$  - условная вероятность отказа (условие состоит в том, что в момент  $t_k$  значение отклонения параметра составляет  $Y_k$ ).

Для определения остаточного ресурса с заданной вероятностью безотказной работы и оптимального остаточного ресурса используют уравнения, куда входит условная вероятность отказа  $Q(t_{ост} / Y(t_k))$ , являющаяся функцией условного распределения остаточного ресурса.

Для практических вычислений рекомендуется рассчитать таблицы и номограммы остаточного ресурса.

Необходимую точность оценки рекомендуемый метод обеспечивает в том случае, если изменение параметра технического состояния к

моменту контроля составляет не менее половины предельного отклонения параметра  $Y_{п}$  и при соблюдении условия  $t_{ост} < 0,5 t_k$ .

При выполнении всех приведенных условий погрешность рекомендуемого метода прогнозирования не превышает 8-9%.

### **5. Оценка остаточного ресурса по изменениям контролируемого параметра**

В тех случаях, когда показатели назначения оборудования монотонно изменяются по времени (наработке), а дисперсия показателей не изменяется, для прогнозирования остаточного ресурса может быть использован метод, изложенный в ГОСТ 23942-80.

Правила стандарта разработаны для линейного:

$$Y(t) = C_1 + C_2 t,$$

квадратического

$$Y(t) = C_1 + C_2 t + C_3 t^2 \quad (5)$$

и экспоненциального законов изменения показателя назначения

$$Y(t) = \exp \{C_1 + C_2 t\}, \quad (6)$$

где  $C_1, C_2, C_3$  - неизвестные коэффициенты,

$$t = t_i - t_0, \quad t^3 \neq 0,$$

$t_0 \neq 0$  - начальное значение наработки изделия.

Для использования метода, рекомендованного в ГОСТе необходимо убедиться в том, что изменение контролируемого параметра подчиняется одному из законов (4-6), а его дисперсия не изменится с увеличением наработки изделия (см. раздел 6).

Показатель назначения оценивают по измеренным значениям контролируемого параметра

$$Y_i = F(t_i) + D_i; \quad i = 1, \dots, N; \quad (7)$$

где  $t_i$  - значение наработки в  $i$ -й момент измерения

$$t_i \in t_1 \in t_2 \in \dots \in t_N,$$

$D_i$  - неограниченная случайная величина с дисперсией  $D$ , симметрично распределенная относительно математического ожидания, равного нулю, либо симметрично распределенная, ограниченная случайная величина, для которой при всех значениях наработки выполняется условие

$$D \in D(t) \in D, \quad 0 < D < \infty.$$

Число измерений  $N$  выбирают из условия:

$$N > 2 m,$$

где  $m$  - количество неизвестных коэффициентов закона изменения параметра, Рекомендуется выбирать  $N \geq 11$ .

Моменты измерения  $t_i$  выбирают таким образом, чтобы случайные величины  $D_i$  были практически независимыми.

Теоретической основой ГОСТ 23942-80 является оценка соответствующих показателей на базе общеизвестного метода наименьших квадратов.

При линейном законе изменения параметра рекомендуется следующий порядок прогнозирования.

1. Проводят  $N$  измерений  $Y_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) контролируемого параметра в определенные моменты времени  $t_i$ .

2. Вычисляют величины

$$Y_1 = \sum Y_i; \quad Y_2 = \sum t_i Y_i;$$

$$X_1 = \sum t_i; \quad X_2 = \sum t_i^2;$$

$$D = N \sum t_i^2 - (\sum t_i)^2; \quad D_{22} = N/D;$$

$$D_{11} = \sum t_i / D; \quad D_{12} = D_{21} = -\sum t_i / D,$$

где через  $S$  обозначают сумму по  $i$  от 1 до  $N$ .

3. Вычисляют точечные оценки коэффициентов закона (4):

$$C_1 = Y_1 \times D_{11} + Y_2 \times D_{21}; \quad C_2 = Y_1 \times D_{12} + Y_2 \times D_{22}.$$

4. Вычисляют оценку среднего квадратического отклонения параметра

$$\sigma = \sqrt{S / (N - 2)},$$

где  $S = \sum (Y_i - C_1 - C_2 \times t_i)^2$ .

5. Вычисляют средние квадратические отклонения коэффициентов  $C_1$  и  $C_2$ :

$$\sigma_1 = \sigma \cdot \sqrt{D_{11}}; \quad \sigma_2 = \sigma \cdot \sqrt{D_{22}}.$$

6. Вычисляют гарантированные оценки коэффициентов

$$C_j = C_j \pm K \times s_j \quad (j = 1; 2),$$

где (+) берется при возрастающем параметре, (-) - при убывающем;

$$K = 1,282 \text{ (при } g = 0,9); 1,6459 \text{ (} g = 0,95); 2,326 \text{ (} g = 0,99);$$

$g$  - доверительная вероятность.

7. Вычисляют средний (ожидаемый) ресурс

$$T_{\text{ср}} = (Y_n - C_1) / C_2 - t_k$$

где  $t_k$  - наработка на момент последнего контроля.

8. Вычисляют гарантированный остаточный ресурс

$$T_g = (Y_n - C_1)/C_2 - t_k.$$

Пример прогнозирования остаточного ресурса изложенным методом приведен в приложении 1

Виды функциональных зависимостей, их графика и формулы для определения коэффициентов уравнений, отличающихся от (4) - (6) могут быть взяты из справочника [ 27] или табл. 6.

## **6. Оценка остаточного ресурса технологического оборудования по изменению его выходных параметров**

Большая часть механических и технологических отказов проявляется постепенно в изменении одного или нескольких выходных параметров (поэтому их называют параметрическими). Контролируемыми параметрами могут быть как непосредственно измеряемые величины повреждений (глубина коррозии стенок, износ детали), технологические параметры (температура, давление и т.п.), так и выходные параметры оборудования [производительность, коэффициент полезного действия, степень разделения (осветления, очистки) и другие количественные показатели качества продукта], параметры вибрации, шума, величина утечки среды через уплотнения и т.д. Контролируя изменение этих параметров, можно по мере приближения их значений к предельно допустимым прогнозировать момент наступления следующего отказа. Некоторые методы прогнозирования по этому принципу стандартизованы. Например, ГОСТ 23942-80 устанавливает правила оценки показателей качества и гарантированной наработки изделий, выходные параметры которых монотонно изменяются с увеличением наработки. Изложенный в ГОСТ 27.302-86 метод оценки остаточного ресурса предназначен для прогнозирования процессов изнашивания и других монотонных процессов ухудшения технического состояния узлов и агрегатов машин, оборудования и приборов.

Применение указанных документов ограничено необходимостью монотонности изменения контролируемых параметров. Кроме того, ГОСТ 23942-80, основанный на использовании метода наименьших квадратов, предполагает неизменность дисперсии (разброса) измеряемых параметров, тогда как во многих случаях дисперсия параметров с изменением наработки изменяется.

Большинство контролируемых технологических параметров нефтехимических процессов являются стационарными и немонотонными,

так как подвергаются регулированию. Некоторые из них могут нести информацию об интенсивности деградации оборудования; в таких случаях при анализе записей параметров наблюдается их дрейф, т.е. постепенное смещение среднего значения. Если этот дрейф не устраняется регулированием технологического процесса и определены предельно допустимые уровни параметров, то такие параметры могут быть использованы для прогнозирования ресурса оборудования.

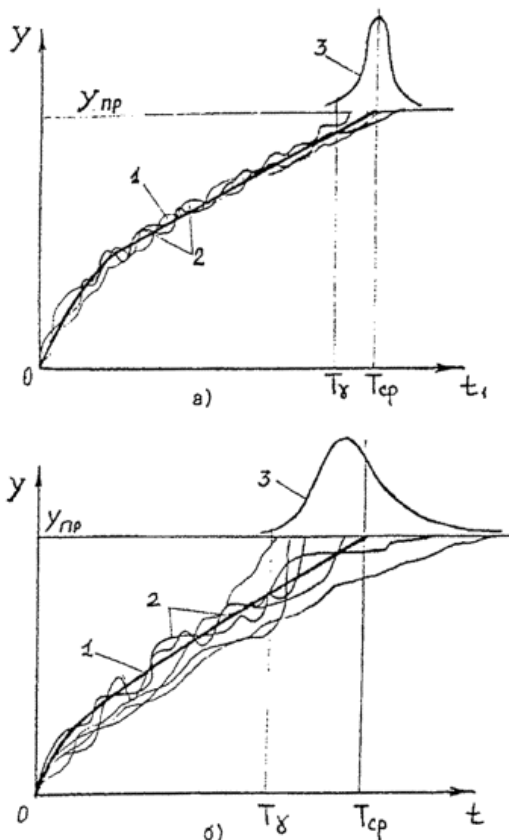


Рис. 4. Схема изменения параметров технического состояния  $Y$  при постоянной дисперсии (а) и непостоянной дисперсии (б); кривые: 1 - математического ожидания  $Y(t)$ ; 2 - отдельных реализаций; 3 - плотности распределения ресурса;  $T_{ср}$  - средний ресурс;  $T_{\gamma}$  - гарантированный (гамма-процентный) ресурс;  $Y_{пр}$  - предельное значение ПТС.

Поэтому прогнозированию должен предшествовать анализ случайных процессов, определяющих параметры технического состояния обследуемого оборудования. Для анализа случайных процессов существует большое число методов, зачастую достаточно сложных для лиц, не имеющих специальной математической подготовки; в качестве руководства можно использовать, например, работу [ 30].

Суть рекомендуемого в данном разделе метода заключается в использовании наблюдений за изменением параметров до момента контроля для оценки скорости деградации и ее возможных отклонений в последующий период эксплуатации оборудования до его предельного состояния (см. рис. 5).

Оценку остаточного ресурса осуществляют путем статистической обработки значений измеренных параметров технического состояния (ПТС) и вычислении численных значений показателей по формулам диффузионного распределения. Статистическую обработку ПТС осуществляют по результатам их записи за весь период эксплуатации оборудования или (при отсутствии таких записей) специально организуемых наблюдений.

В расчетные формулы входит предельно допустимая величина ПТС, значение которой рекомендуется определять по критериям отказов и предельных состояний оборудования, а также установленным в технологическом регламенте предельно допустимым уровням технологических параметров.

### **6.1. Порядок подготовки данных**

При наличии записей (диаграмм) контролируемых параметров за период предыдущей эксплуатации оборудования осуществляют их статистическую обработку.

При отсутствии записей организуют специальные наблюдения за изменением параметров. При эксплуатационных наблюдениях ПТС периодически измеряют, результаты записывают и наносят на рабочий график наблюдений, на котором также отмечены предельно допустимые уровни значений параметров.

После окончания наблюдений осуществляют статистическую обработку данных измерений и оценку параметров процесса деградации.

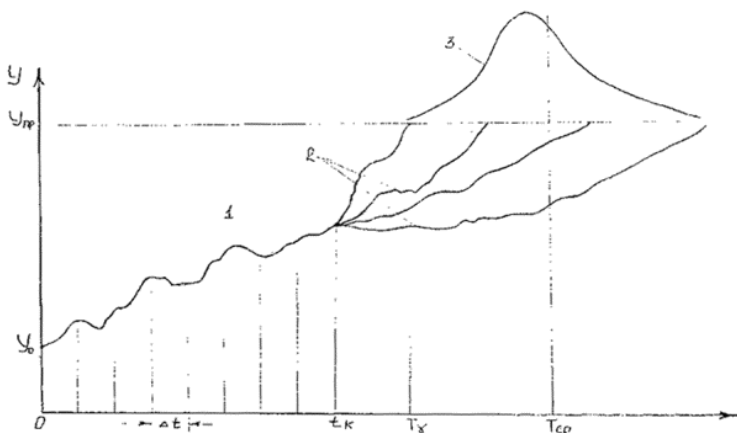


Рис. 5. Схема прогнозирования остаточного ресурса оборудования после момента контроля  $t_k$

Кривые: 1 - изменения контролируемого параметра  $U$  до момента контроля;  
 2 - возможных реализаций процесса деградации; 3 - плотности распределения остаточного ресурса. ( $T_{cp} - t_k$ ) - средний (ожидаемый) остаточный ресурс;  
 ( $T_g - t_k$ ) - гарантированный (гамма-процентный) остаточный ресурс;  
 $D$  - периодичность контроля или интервал разбиения записи параметра.

Продолжительность наблюдений  $T_n$  должна быть не менее  $0,2 \times T_p$ , где  $T_p$  - ожидаемая наработка (ресурс) до предельного состояния. При этом число измерений в ходе испытаний должно быть для монотонных процессов не менее указанного в табл. 7, для немонотонных - не менее 100 (при этом ошибка в оценке параметров не превысит 25%, если коэффициент их вариации не более 2).

Таблица 7 - Минимальное число измерений ( $n$ ) ПТС в зависимости от допустимой ошибки  $D$  и требуемой доверительной вероятности  $g$

$D$	0,1		0,2		0,3		0,5	
$g$	0,8	0,9	0,8	0,9	0,8	0,9	0,8	0,9
$n$	70	100	18	25	10	15	3	5

## 6.2. Статистическая обработка результатов измерений

Результаты измерений, нанесенные на рабочий график, подвергают качественной оценке:

- определяют период приработки (выхода на стационарный режим)
- по перегибу графика ПТС или стабилизации колебаний параметра; в

дальнейших расчетах скорости изменения ПТС этот период не учитывается;

- определяют монотонность или немонотонность зависимости ПТС от наработки - при отсутствии отрицательных приращений ПТС зависимость считается монотонной;

- оценивают стационарность или нестационарность процесса; (из рассмотрения исключают резкие отклонения параметров по известным причинам - из-за внезапных остановок, резкого изменения внешних условий и т.п.); при наличии признаков нелинейности оценку параметров осуществляют по степенной или другой функции в соответствии с табл. 8 и разделами 3.3 и 3.4).

При предварительной статистической обработке оценивают величину дисперсии измеряемых параметров и ее однородность.

Определяют среднюю скорость изменения параметра:

$$W = D Y_i / N \times D t_i, \quad (23)$$

где  $D Y_i$  - приращение ПТС за 1-й интервал наработки  $D t_i$  ;

$N$  - число интервалов наблюдений.

Определяют среднее квадратическое отклонение скорости:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (\Delta Y_i / \Delta t_i - W)^2}{N - 1}}. \quad (24)$$

Определяют коэффициент вариации скорости изменения параметра:

$$V = \sigma / M.$$

Проверку однородности дисперсии осуществляют по критерию Фишера следующим образом:

- выделяют из всего периода наблюдений начальный (без периода приработки) и конечный периоды, в каждый из которых включают  $n$  не менее 3 измерений ПТС (предпочтительно - не менее 10);

- определяют выборочную дисперсию ПТС в каждом периода (выборке) по формуле:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{n - 1},$$

где  $Y_i$ ,  $\bar{Y}$  - соответственно  $i$  - е и среднее значение ПТС в каждой выборке.

- определяют отношение  $F = D_2 / D_1$  и сравнивают его с табличным; если  $F$  превышает табличное значение, то оцениваемые дисперсии неоднородны.

Поскольку близкорасположенные на графиках точки замеров являются зависимыми друг от друга (коррелированными), необходимо интервал разбиения графика выбирать большим, чем интервал корреляции.

Для определения интервала корреляции строится корреляционная функция  $r(y)$  связи приращений контролируемого параметра (см. рис. 6), где  $y$  - параметр сдвига ( $y=0, 1, 2, \dots, n-1$ );  $n$  - количество интервалов квантования ( $n \approx 100$ ).

Значения  $r(y)$  определяются по формуле

$$r(y) = \frac{\sum_0^{n-y} \Delta Y_{i+y} \cdot \Delta Y_i}{(n-y)D},$$

где  $D Y_i = Y_{i+1} - Y_i$ ;  $D = S(Y_{i+1} - Y_i)^2/n$ .

За величину интервала корреляции принимают значение  $u_k$ , при котором  $r(y) < 0,2$  при всех  $y > u_k$ .

При линейной зависимости ПТС от наработки определяют среднюю скорость изменения ПТС по формуле [ 23].

Определение верхней и нижней доверительных границ скорости изменения ПТС осуществляют по формуле:

$$W_{B(H)} = W \pm U_g \cdot \sigma / \sqrt{N}, \quad (25)$$

где  $U_g$  ..- квантиль нормального распределения;  $U_g = 1,28$  при  $g = 0,9$ ;  $U_g = 1,65$  при  $g = 0,95$ ;  $U_g = 2,33$  при  $g = 0,99$ .

Определение верхней доверительной границы коэффициента вариации скорости осуществляют по формуле:

$$V_E = V \left( 1 + U_g \sqrt{\frac{3}{N}} \right) \quad (26)$$

Определение коэффициента вариации остаточного ресурса осуществляют по формуле:

$$V_T = V_E \sqrt{\frac{\Delta \bar{Y}}{Y_{пр} - Y_k}} \quad (27)$$

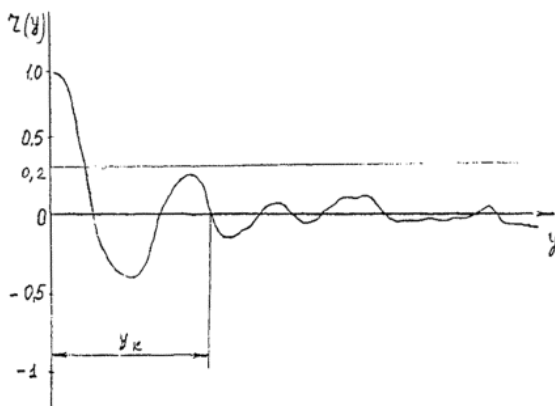
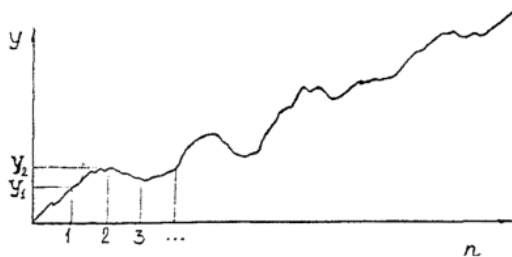


Рис. 9. Схема определения интервала корреляции  $y_k$  по корреляционной функции  $r(y)$ .

**Оценка среднего и гарантированного остаточного ресурса** осуществляется по формулам диффузионных распределений (28) для монотонных зависимостей ПТС от наработки и (29) - для немонотонных

$$T_{\text{ср}} = \frac{1}{a} \left( 1 + \frac{V_T^2}{2} \right),$$

$$T_V = \frac{1}{a_B} \left[ 1 + \frac{U_V^2 V_T^2}{2} - U_V V \left( 1 + \frac{U_V^2 V^2}{4} \right)^{1/2} \right], \quad (28)$$

где  $a = w / (Y_{\text{пр}} - Y_{\text{к}})$ ;  $a_B = w_a / (Y_{\text{пр}} - Y_{\text{к}})$ ;

$Y_{\text{пр}}$ ,  $Y_{\text{к}}$  - соответственно предельное и контрольное значение ПТС.

$$T_{\text{ср}} = 1/a;$$

$$T_Y = \frac{1}{a(1 + V_T^2/2)} \left[ 1 + U_Y^2 V_T^2/2 - U_Y V_T (1 + U_Y^2 V_T^2/4)^{1/2} \right] \quad (29)$$

При нелинейной зависимости ПТС от наработки вид зависимости  $Y(t)$  выбирают на основе анализа физических процессов, приводящих к потере работоспособности оборудования. Коэффициенты уравнения связи  $Y(t)$  определяют по формулам таблицы 8, методом наименьших квадратов (принимая  $X = t$ ), либо с помощью пакетов прикладных программ по статистическому анализу данных на ЭВМ.

Пример оценки остаточного ресурса оборудования приведен в приложении 1.

Статистический анализ эксплуатационных параметров дает дополнительные возможности для выявления причин низкой надежности оборудования и разработки эффективных мер по их устранению: стабилизации наиболее влияющих параметров, созданию повышенных запасов до предельного состояния по этим параметрам и др. Предварительный анализ стабильности (дисперсии) технологических параметров производств, для которых разрабатывается оборудование, позволяет создавать оборудование с гарантированными показателями надежности для конкретных условий.

## ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ОБОРУДОВАНИЯ

### Пример 1

При эксплуатации аппарата с перемешивающим устройством вследствие эрозионного износа происходит уменьшение толщины лопастей мешалки. Во избежание аварийной поломки лопастей через каждые 720 часов (при текущих ремонтах) измеряют величину износа лопастей. По условию прочности предельно допустимой является величина износа - не более 4 мм. Из-за непостоянства содержания примесей в перемешиваемом продукте скорость изнашивания может изменяться, однако в среднем увеличение износа происходит по линейному закону. Поэтому для прогнозирования остаточного ресурса в данном случае может быть применен метод раздела 3.3.

Результаты замеров величины износа и результаты расчета (выполненного на ЭВМ) представлены в таблице и на рисунке 10. По результатам видно, что величина гарантированного остаточного ресурса (4643 ч) значительно ниже среднего ресурса (6152), что обусловлено как колебаниями скорости изнашивания при эксплуатации аппарата, так и невысокой точностью измерений (до 0,1 мм). Повышение точности оценки может быть достигнуто путем повышения точности измерений, а также путем статистической обработки измеренных величин износа в разных точках поверхности лопастей методом, изложенным разделе 5 и примере 2.

Расчет остаточного ресурса методом линейной экстраполяции

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ:  $N = 11$   $Y$  предел. = 4 мм

Доверительная вероятность,  $y = .99$

- 1  $t = 0$  ч  $Y = 0$  мм
- 2  $t = 720$  ч  $Y = .3$  мм
- 3  $t = 1440$  ч  $Y = .4$  мм
- 4  $t = 2160$  ч  $Y = .6$  мм
- 5  $t = 2880$  ч  $Y = .9$  мм
- 6  $t = 3600$  ч  $Y = 1$  мм
- 7  $t = 4320$  ч  $Y = 1.2$  мм
- 8  $t = 5040$  ч  $Y = 1.6$  мм
- 9  $t = 5760$  ч  $Y = 1.9$  мм
- 10  $t = 6480$  ч  $Y = 1.9$  мм



фицируется коксоотложение. Поэтому при достижении давления сырья на входе в печь 0,7 МПа ее останавливают на выжиг кокса.

Длительность пробега печи ограничивается также температурой пирогаза на выходе из ЗИА, которая не должна превышать 450°C. Постепенный рост температуры пирогаза в ЗИА от 350 до 450 °С происходит вследствие ухудшения теплопередачи от продуктов пиролиза к генерируемому водяному пару вследствие загрязнения и коксоотложений в трубках аппарата. Замечено, что температура пирогаза ЗИА начале пробега печи растет примерно на 5°C/сут., а затем, после 5- 10 суток работы печи уменьшается до 1-3 ° C/сут.

Печь пиролиза останавливают на выжиг кокса при одном из следующих условий [ 33]:

- при температуре пирогаза на выходе из ЗИА более 450°C;
- при давлении сырья на входе в печь 0,7 МПа;
- когда температура стенки трубы превышает 1030 ° С (на выходном участке - 1070°C);
- при повышении перепада давления пирогаза до и после ЗИЛ более 0,05 МПа;
- в случае вынужденной внезапной остановки печи после 10 сут и более работы.

Для правильного планирования момента остановки печи для выжигания кокса необходимо в ходе эксплуатации прогнозировать остаточный ресурс змеевика. В таблице 10 и на рисунке 11 в качестве примера приведены исходные данные и результаты расчета на ЭВМ остаточного ресурса пирозмеевика после 27 суток эксплуатации.

Расчет выполнен в соответствии с рекомендациями раздела 6 по двум наиболее информативным параметрам: давлению сырья на входе в печь и температуре пирогаза на выходе из ЗИУ. Для планирования момента остановки печи используют данные по наименьшим значениям показателей, т.е. данном случае по показателям, определенным по изменению давления, ( рис. 11а): средний (ожидаемый) остаточный ресурс - 27,4 сут.; минимальный (гарантированный) - 17,2 суток.

Для сравнения в таблицах 12 и 13 приведены результаты расчетов по данным этого же примера методом линейной экстраполяции, изложенном разделе 3.3. По результатам видно, что метод линейной экстраполяции в случае  $V > 0,5$  дает завышенные оценки остаточного ресурса.

Таблица 10 - Расчет остаточного ресурса по изменению давления  
 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ: N = 20 Y предел.=0.7 МПа  
 Доверительная вероятность у= .99

1	t= 8	Y= .48
2	t= 9	Y= .49
3	t= 10	Y= .5
4	t= 11	Y= .5
5	t= 12	Y= .51
6	t= 13	Y= .52
7	t= 14	Y= .52
8	t= 15	Y= .52
9	t= 16	Y= .53
10	t= 17	Y= .53
11	t= 18	Y= .54
12	t= 19	Y= .54
13	t= 20	Y= .54
14	t= 21	Y= .55
15	t= 22	Y= .55
16	t= 23	Y= .55
17	t= 24	Y= .56
18	t= 25	Y= .56
19	t= 26	Y= .57
20	t= 27	Y= .57

**РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА:**

Средняя скорость изменения параметра SY = 4.736842E-03 МПа/сут.

Коэффициент вариации V = 1.082977

Средний остаточный ресурс T S = 27.44444 суток.

Гарантированный остаточный ресурс T Y = 17.1927 суток.

Таблица 11- Расчет остаточного ресурса по изменениям температуры  
 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ: K: N =28 Y предел.=458 ° C  
 Доверительная вероятность у= .99

1	t= 8	Y= 378
2	t= 9	Y= 380
3	t= 10	Y= 381
4	t= 11	Y= 382
5	t= 12	Y= 383
6	t= 13	Y= 384
7	t= 14	Y= 385
8	t= 15	Y= 385
9	t= 16	Y= 387
10	t= 17	Y= 389

11	l= 18	Y= 390
12	t= 19	Y= 391
13	t= 20	Y= 392
14	t= 21	Y= 393
15	t= 22	Y= 395
16	l= 23	Y= 396
17	t= 24	Y= 399
18	t= 35	Y= 400
19	t= 26	Y= 401
20	t = 27	Y = 403

**РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА:**

Средняя скорость изменения параметра  $SY = 1.31579 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{сут.}$

Коэффициент вариации  $V = .5099891$

Средний остаточный ресурс  $T S = 35.72 \text{ суток}$

Гарантированный остаточный ресурс  $T Y = 27.88885 \text{ суток .}$

Таблица 12 - Расчет остаточного ресурса методом линейной экстраполяции

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ: К: N =28 Y предел. = .7 МПа

Доверительная вероятность  $u = .99$

1	t = 8 сут.	Y= .49 МПа
2	t = 9 сут.	Y= .49 МПа
3	t = 18 сут.	Y= .5 МПа
4	t = 11 сут.	Y = .5 МПа
5	t = 12 сут.	Y= .51 МПа
6	t = 13 сут.	Y= .52 МПа
7	t = 14 сут.	Y= .52 МПа
8	t = 15 сут.	Y= .52 МПа
9	t = 16 сут.	Y= .53 МПа
10	t = 17 сут.	Y= .53 МПа
11	t = 18 сут.	Y= .54 МПа
12	t = 19 сут.	Y= .54 МПа
13	t = 20 сут.	Y= .54 МПа
14	t = 21 сут.	Y= .55 МПа
15	t = 22 сут.	Y= .55 МПа
16	t = 23 сут.	Y= .55 МПа
17	t = 24 сут.	Y= .56 МПа
18	t = 25 сут.	Y= .56 МПа
19	t = 26 сут.	Y= .57 МПа
20	t = 27 сут.	Y= .57 МПа

**РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА:**

$C1 = .4550524$   $C2 = 4.368425E-03$   $C1Y = .4627716$   $C2 Y 4.787367 E -03$

Средний остаточный ресурс  $T S = 29.0723$  с ут.

Гарантированный остаточный ресурс  $T Y = 22.55301$  сут.

Таблица 13 - Расчет остаточного ресурса методом линейной экстраполяции

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ: К: N =28 Y предел.= 458 ° C

Доверительная вероятность  $\gamma = .99$

1	t = 8 сут.	Y= 378 ° C
2	t = 9 сут.	Y= 380 ° C
3	t = 10 сут.	Y= 381 ° C
4	t = 11 сут.	Y= 382 ° C
5	t = 12 сут.	Y= 383 ° C
6	t = 13 сут.	Y= 384 ° C
7	t = 14 сут.	Y= 385 ° C
8	t = 15 сут.	Y= 385 ° C
9	t = 16 сут.	Y= 387 ° C
10	t = 17 сут.	Y= 389 ° C
11	t = 18 сут.	Y= 390 ° C
12	t = 19 сут.	Y= 391 ° C
13	t = 20 сут.	Y= 392 ° C
14	t = 21 сут.	Y= 393 ° C
15	t = 22 сут.	Y= 395 ° C
16	t = 23 сут.	Y= 396 ° C
17	t = 24 сут.	Y= 399 ° C
18	t = 25 сут.	Y= 400 ° C
19	t = 26 сут.	Y= 401 ° C
20	t = 27 сут.	Y= 403 ° C

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА:

$C1 = 367.542$   $C2 = 1.266159$   $C1Y = 368.9473$   $C2Y = 1.342429$

Средний остаточный ресурс  $T S = 38.12453$  сут.

Гарантированный остаточный ресурс  $T Y = 33.37764$  сут.

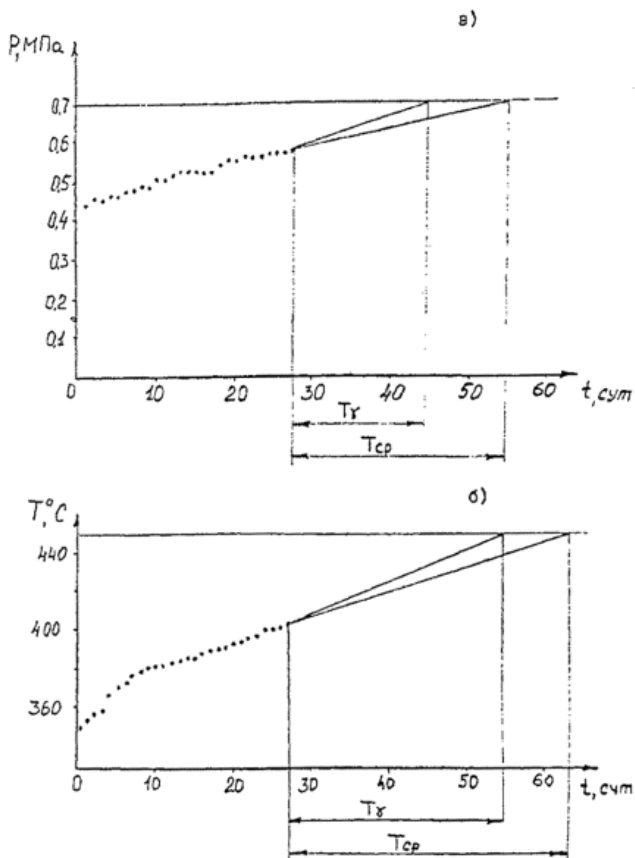


Рис. 11. Схема прогнозирования остаточного ресурса печи пиролиза по изменению давления на входе Р(а) и по изменению температуры на выходе из ЗИА (б).