

Динамическая модель роста дефектов в тепломеханическом оборудовании стареющих электрических станций

Семенов В.К., д-р техн. наук, Степанов В.Ф., инж.

Предлагается полуэмпирическое дифференциальное уравнение, описывающее широкий класс процессов роста дефектов в тепломеханическом оборудовании стареющих электрических станций. Теория подкреплена практическими примерами.

Ключевые слова: математические модели прогноза ресурса и надежности.

Dynamic Model of Growth of Defects in the Heat-Mechanic Equipment of Growing Old Power Plants

V.K. Semenov, Doctor of Engineering, V.F. Stepanov, Engineer

The authors consider the semiempirical differential equation describing a wide class of processes of growth of defects in the heat-mechanic equipment of power plants which are becoming old. The theory is supported with practical examples.

Keywords: mathematical models of resource and reliability forecasting.

Энергетическое оборудование многих стареющих электрических станций, работающее в тяжелых условиях резкопеременных нагрузок, приближается к исчерпанию своего ресурса. В сложившейся ситуации для исключения катастрофических последствий, связанных с выходом из строя указанных аппаратов, требуется решить две взаимосвязанные задачи. С одной стороны, необходима организация постоянного многопараметрического контроля состояния оборудования. С другой стороны, на основе поступающей информации об оборудовании необходимо прогнозировать его состояние на будущее. Причем у оператора, в данный момент управляющего объектом, должен быть под руками электронный паспорт прогноза состояния объекта по одному или двум главным параметрам, выход за пределы которых может привести к повреждению объекта. При этом оператор должен держать руку на «пульсе» объекта, т.е. функция прогноза должна в режиме реального времени оперативно обновляться и верифицироваться на основе вновь поступающей информации об объекте.

Для решения поставленной задачи необходимо сформулировать физико-математическую модель роста дефектов в оборудовании, верифицировать ее на основе данных мониторинга объекта. В соответствии с этим все дефекты, возникающие в оборудовании, разделим на крупные и мелкие. Крупные (внезапные) повреждения оборудования являются событиями чрезвычайно редкими и плохо предсказуемыми. Накопление мелких дефектов определяет процесс старения оборудования и, следовательно, его ресурс. Задача прогноза ресурса оборудования, обусловленного его старением, должна заключаться в определении времени достижения числом дефектов некоторого критического значения, превышение которого может привес-

ти к катастрофическим последствиям. До наступления названного момента времени устройство должно либо сниматься с эксплуатации, либо подвергаться капитальному ремонту. Старение оборудования вызвано действием многих механизмов: тепловым и динамическим режимом работы, физико-химическими процессами на поверхности металла, обуславливающими коррозию и растрескивание, изменением структуры металла под действием нагрузок и пр. При взаимодействии таких перекрестных механизмов деградации установить точно динамический закон, учитывающий все эти факторы, вряд ли возможно, поэтому нами предлагается следующий подход.

Комплекс вышеназванных условий определяет тенденцию, т.е. закон старения и роста дефектов, который в каждом конкретном случае, в силу той или иной комбинации этих условий, будет принимать разные формы, сохраняя при этом свои главные общие черты. Этот закон легче установить на отдельных конкретных примерах.

1. *Модель роста коррозионных отложений на трубчатке теплообменных аппаратов.* Будем полагать, что на поверхности теплообменных трубок имеются неоднородности (каверны, вмятины, царапины), представляющие собой ловушки для коррозионных отложений, занесенных из конденсатно-питательного тракта. Осаждение отложений на поверхность и их срыв с поверхности обусловлены потоком жидкости. Для количественного описания процесса введем следующие величины: N – число коррозионных отложений на поверхности; N_p – число возможных ловушек; $(N_p - N)$ – число свободных мест; τ_1 – характерное время захвата примесей из потока вследствие адгезии поверхностью; τ_2 – время срыва захваченных частиц по-

током жидкости. Составим уравнение баланса частиц.

Полагая, что поверхность захватывает частицы равномерно (распределение ловушек однородно), имеем

$$N(t + dt) = N(t) + \frac{N_p - N}{\tau_1} dt - \frac{N}{\tau_2} dt. \quad (1)$$

Раскладывая $N(t + dt)$ в ряд Тейлора и ограничиваясь линейными членами разложения, получим уравнение накопления и срыва механических отложений:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{N_p}{\tau_1} - N \left(\frac{1}{\tau_1} - \frac{1}{\tau_2} \right). \quad (2)$$

Вводя «приведенное» время $\tau = \frac{\tau_1 \tau_2}{\tau_1 + \tau_2}$,

уравнение (2) можно записать в виде

$$\frac{dN}{dt} = \frac{N_p}{\tau_1} \left(1 - \frac{\tau_1}{\tau} \frac{N}{N_p} \right). \quad (3)$$

Как показывает опыт, $\tau_2 \gg \tau_1$. В этом случае уравнение (3) принимает вид

$$\frac{dN}{dt} = \frac{N_p}{\tau_1} \left(1 - \frac{N}{N_p} \right). \quad (4)$$

Уравнения (3) и (4) содержат эмпирические (подгоночные) коэффициенты идентификации, которые должны определяться для каждого теплообменного аппарата индивидуально на основе статистической обработки данных его обследования.

Можно установить связь характерного времени τ с другими параметрами процесса. Действительно, время τ определяет вероятность захвата поверхностью трубочки инородных примесей за единицу времени $W = \frac{1}{\tau}$. С другой стороны, эта вероятность определяется потоком примесей на поверхность j и сечением реакции захвата σ $W = \sigma j$. Если поток жидкости перпендикулярен к поверхности трубочки, то $j = nv$ и

$$\frac{1}{\tau_1} = \sigma nv. \quad (5)$$

Здесь n – концентрация примесей; v – скорость потока жидкости, несущей примеси.

Если поток жидкости скользит вдоль поверхности трубочки, то осаждение примесей определяется их диффузией поперек потока (рис. 1):

$$j = D \frac{\partial n}{\partial y} \approx D \frac{n}{R}$$

и

$$\frac{1}{\tau_2} = \sigma \cdot D \frac{n}{R}. \quad (6)$$

Здесь D – коэффициент диффузии примесей в жидкости; R – характерный размер свободного сечения теплообменной трубки.

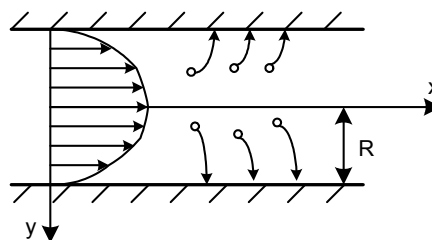


Рис. 1. Осаждение примесей при движении жидкости вдоль поверхности

Формулы (5) и (6) позволяют экспериментально по измерению времени накопления отложений определить очень важные характеристики процесса роста отложений: сечение реакции захвата примесей σ и коэффициент их диффузии $D = \frac{\tau_1 R v}{\tau_2}$.

Предлагаемая модель может быть применима не только для монослойного покрытия поверхности трубочки примесями, но и многослойного, когда сами отложения являются ловушками для последующих отложений. Если в процессе эксплуатации аппаратуры водно-химический режим контура изменяется, то τ_1 и τ_2 будут функциями времени и это следует учитывать при построении функции прогноза [1, 2].

2. *Элементарная теория образования и роста трещин.* Рост трещины возможен при равенстве энергии, необходимой для создания дополнительной свободной поверхности трещины $\gamma \Delta S$ и подведенной извне энергии, которая равна энергии упругости в объеме трещины ΔV :

$$\frac{\sigma^2}{2E} \Delta V = \gamma \Delta S. \quad (7)$$

Здесь σ – напряжение в материале; E – модуль Юнга; γ – коэффициент поверхностного натяжения. При выполнении этого условия трещина растет со скоростью распространения упругой деформации. Приведенное соотношение лежит в основе теории квазиупругого разрушения по концепции Гриффитса (полуэмпирические уравнения Пэриса, Эрдогана–Формана и др.) Согласно этой теории, рост длины трещины в бесконечной среде определяется выражением [3]

$$\frac{dl}{dt} \sim \frac{(K - K_0)^m}{K_c - K}. \quad (8)$$

Здесь $K = \sigma \sqrt{l}$ – коэффициент интенсивности роста напряжений; K_0 – пороговое значение коэффициента роста напряжений, с которого начинается рост трещины; $K_c = \sqrt{2E\gamma}$ – критический коэффициент интенсивности напряжений, при котором трещина распространяется со скоростью упругой деформации (согласно (8), трещина растет мгновенно).

В реальности длина трещины ограничена размером напряженной зоны, обозначим его через $l_{пр}$, т.е. вместо l в вышеприведенных формулах нужно подставить $(l_{пр} - l)$. Множи-

тель, стоящий перед l , определяется свойствами материала, его геометрией и условиями эксплуатации. Поскольку на практике эти параметры являются неконтролируемыми, то уравнение роста трещин удобнее записать в более формальном виде, введя некий коэффициент пропорциональности $\alpha(t)$, подлежащий экспериментальной идентификации [4]:

$$\frac{dl^*}{dt} = \alpha(t)(1 - i^*)^n, \quad (9)$$

где $i^* = \frac{l}{l_{пр}}$ – нормированная на $l_{пр}$ длина трещины.

3. *Полуэмпирическое уравнение динамики роста числа поврежденных теплообменных трубок.* Повреждение трубок теплообменных аппаратов обусловлено многими причинами: тепловым и динамическим режимом работы; электрохимической коррозией под напряжением, связанной с водно-химическим режимом; коррозионным растрескиванием; радиационным охрупчиванием и т.д.

При взаимодействии таких перекрёстных механизмов деградации установить динамический закон, учитывающий все вышесказанное, представляется невозможным. Поэтому при формулировании этого закона нужно стремиться к простоте, сохранив при этом существенную сторону рассматриваемого явления, и, опираясь на результаты эксперимента, определить подгоночные коэффициенты для каждого индивидуального аппарата.

Введем в рассмотрение величину $\lambda(t)dt$ – вероятность повреждения одной трубки за время dt и запишем уравнение баланса для числа поврежденных (заглушенных) трубок к моменту $N(t + dt)$:

$$N(t + dt) = N(t) + \lambda dt(N_0 - N)m. \quad (10)$$

Здесь N_0 – исходное число теплообменных трубок аппарата; m – эмпирический коэффициент. Второе слагаемое в уравнении (10) говорит о том, что число трубок, поврежденных за время dt , пропорционально числу живых трубок $(N - N_0)$ в момент времени t . Раскладывая левую часть уравнения (10) в ряд Тейлора и ограничиваясь линейными членами, получим

$$\frac{dN}{dt} = \lambda(N_0 - N)^m. \quad (11)$$

В процессе длительной эксплуатации оборудование стареет, в нем накапливается усталость, и процессы деградации трубки будут ускоряться. Это можно учесть либо зависимостью коэффициента m от времени, либо, оставляя m постоянным, ввести зависимость λ от времени.

Тогда уравнение (11) примет вид [5]

$$\frac{dN}{dt} = \lambda(t)(N_0 - N). \quad (12)$$

Подводя итоги анализа роста различных дефектов в теплоэнергетическом оборудовании, можно сказать, что, несмотря на различную при-

роду дефектов, формально (на математическом уровне) их рост можно описать уравнением чистого рождения типа уравнений (4), (8), (12). Это обусловлено тем обстоятельством, что целая группа различных по физической сути явлений деградации оборудования (рост трещин, нарастание амплитуды вибраций, рост коррозионных отложений на трубчатке теплообменных аппаратов, выход из строя теплообменных трубок с последующим их глушением и пр.) обладает одним общим свойством – свойством насыщения, т.е. число таких дефектов не может превысить некий физический предел N_p . Например, число заглушенных трубок парогенератора не может быть больше полного числа трубок, длина трещины не может быть больше некоторого геометрического размера аппарата, амплитуда вибраций не может превзойти некий предел, обусловленный потерей устойчивого состояния объектом, и т.д. Второй характерной особенностью вышечисленных дефектов является зависимость скорости их рождения от возраста оборудования. Это свойство обусловлено старением материалов оборудования и накоплением в них усталости. Таким образом, уравнение (12) для процессов деградации оборудования имеет некоторый универсальный характер. Эмпирический коэффициент $\lambda(t)$, равный вероятности повреждения объекта за единицу времени и учитывающий интенсивность роста числа повреждений с возрастом системы, можно представить в виде отрезка временного ряда $\lambda(t) = \lambda_0 + \alpha t + \beta t^2$. Коэффициенты λ_0 , α , β – эмпирические постоянные, подлежащие определению на основе статистической обработки результатов обследования объекта. Такому выбору зависимости $\lambda(t)$ можно дать следующее физическое толкование. В начале эксплуатации для малых времен доминирующую роль будет играть первый член разложения, т.е. вероятность повреждения от возраста системы зависеть не будет. С течением времени система стареет, в ней накапливается усталость, и вероятность λ будет зависеть от возраста системы.

Приведем некоторые примеры применения изложенной теории в практике прогнозирования. На рис. 2 приведена кривая функции прогноза коррозионных отложений на трубчатке парогенератора №3 блока №1 КААЭС.

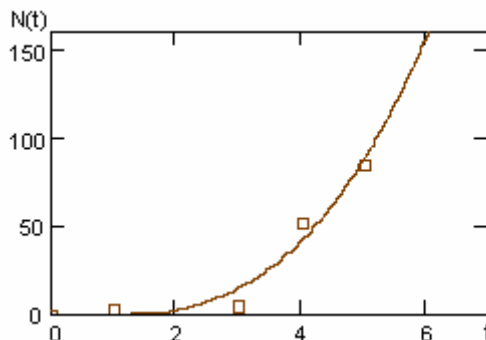


Рис. 2. Прогноз загрязненности трубки ПГ-3 1 блока Калининской АЭС

При достижении загрязненностью значения 150 г/м^2 парогенератор должен быть оставлен на химическую промывку. Прогнозируемые интервалы химической промывки парогенераторов одного блока лежат в интервале от 5,9 до 8,9 лет, т.е. прогноз должен носить индивидуальный характер.

В качестве второго примера на рис. 3 приведена кривая прогноза роста трещины из тепловой канавки турбины высокого давления К-200-130 ЛМЗ при циклической нагрузке. Коэффициенты идентификации функции прогноза определены на основе регрессионного анализа экспериментальных данных по методу наименьших квадратов. Предельная длина трещины составляет 150 мм, а время измерено сотнями циклов.

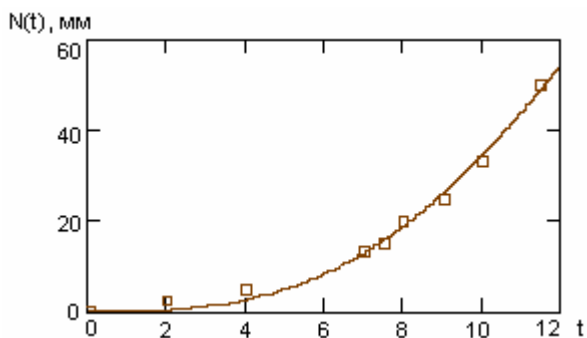


Рис. 3. Функция прогноза роста трещины из тепловой канавки ротора турбины

Третий пример касается прогноза радиальных вибраций ТНПБ подшипника турбины гидроагрегата №2 СШГЭС на основе опубликованных данных [7]. Результаты прогноза амплитуды вибраций представлены на рис. 4. Сплошная кривая построена по шести имеющимся экспериментальным точкам, тогда как пунктирная кривая построена только по первым четырем экспериментальным точкам. Из сравнения кривых видно, что они практически совпадают. Совпадение этих кривых верифицирует функцию прогноза. Несмотря на скудность имевшейся в нашем распоряжении информации,

заложенная в процессе тенденция успела себя проявить уже на первых четырех точках. Это является подтверждением того, что полуэмпирическое уравнение (1) весьма удовлетворительно отражает главные черты анализируемого процесса и подтверждает высказанную специалистами точку зрения о том, что катастрофу можно было спрогнозировать.

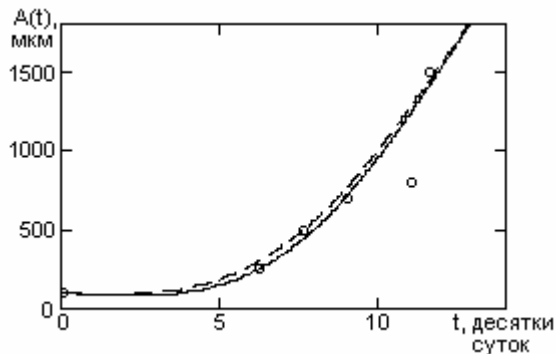


Рис. 4. Функция прогноза амплитуды вибраций турбинного подшипника ГА-2 СШГЭС

Список литературы

1. **К вопросу** прогнозирования ресурса теплоэнергетического оборудования тепловых и атомных электрических станций / В.К. Семенов, В.С. Щербнев, В.Ф. Степанов, В.П. Дерий // Вестник ИГЭУ. – 2007. – Вып. 2.
2. **Прогнозирование** отложения продуктов коррозии на теплообменных поверхностях парогенераторов АЭС с ВВЭР / В.К. Семенов, В.С. Щербнев, В.Ф. Степанов, В.П. Дерий: Мат-лы междунар. науч.-техн. конф. «XIV Бенардосовские чтения». – Иваново, 2007.
3. **Болотин В.В.** Прогнозирование ресурса машин и конструкций. – М.: Машиностроение, 1984.
4. **Семенов В.К., Беляков А.А.** К теории флуктуаций роста трещин в сосудах давления // Вестник ИГЭУ. – 2009. Вып. 2. – С. 46
5. **Семенов В.К., Щербнев В.С., Дерий В.П.** К вопросу прогнозирования надежности и ресурса трубчатки АЭС с ВВЭР // Изв. вузов. Ядерная энергетика. – 2007. – № 2.
6. **Акт** технического расследования причин аварии, происшедшей 17 августа 2009 года на СШГЭС.

Семёнов Владимир Константинович,
 ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
 доктор технических наук, профессор кафедры атомных электрических станций,
 телефон (4932) 38-57-78,
 адрес: г. Иваново, ул. Калинина, д. 22/2, кв. 46,
 e-mail: npp@aes.ispu.ru

Степанов Владимир Фёдорович,
 ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
 начальник отдела разработки АОС кафедры АЭС,
 телефон (4932) 26-99-14,
 адрес: г. Иваново, ул. 4-я Первомайская, д. 12, кв. 2,
 e-mail: step@aes.ispu.ru