

УДК 621.18.021

Прогнозирование накопления дефектов на трубопроводах ТЭС № АЭС

Семенов В.К., д-р техн. наук, Беляков А.А., асп., Щебнев В.С., канд. техн. наук

Предлагается стохастическая математическая модель, позволяющая с точностью до флуктуаций прогнозировать число повреждений паропроводов на ТЭС и АЭС, основанная на уравнении Колмогорова, полуэмпирическом уравнении роста среднего числа повреждений и результатах регрессионного анализа данных обследования состояния паропроводов.

Ключевые слова: стохастическая модель, регрессионный анализ, повреждение, прогнозирование, трубопровод.

Forecasting of accumulation of defects for pipelines heat power plant and the atomic power station

Semenov V. K., doctor of science, Belyakov A. A. post-graduate student, Shhebnev V. S., candidate of science

The stochastic mathematical model allowing to within fluctuations to predict number of damages of steam lines on heat power plant and the atomic power station is offered. The model is based on Kolmogorov's equation, the semiempirical equation of growth of an average of damages and results of regression analysis of the data of inspection of a condition of steam lines.

Keywords: stochastic model, regression analysis, damage, forecasting, pipeline.

Большинство ТЭС и АЭС, работающих в России, эксплуатируются уже в течение длительного времени и приближены к исчерпанию своего срока службы. Надежность паропроводов имеет большое значение для надежности энергоблока в целом. На многих установках паропроводы работают без замены с момента начала эксплуатации, поэтому в них имеется значительное накопление повреждений, приводящих к возникновению макроскопических трещин. Часто зародыши таких трещин, вызванные несовершенством технологии производства, содержатся в материале еще до введения его в эксплуатацию [1]. В процессе эксплуатации под действием тепловых и динамических нагрузок происходит развитие трещин до опасных размеров, что может привести к аварийной ситуации. Одна четвертая всех повреждений паропроводов отечественных ТЭС являются опасными. К ним относятся разрывы различных элементов – гибов, сварных соединений, реже прямых участков труб. По данным обследования, наиболее повреждаемыми элементами являются сварные угловые швы в местах приварки штуцеров (45 % общего количества повреждений), стыковые сварные соединения (36 %) и гибы (14 %) [2]. На атомных и тепловых станциях регулярно проводятся мероприятия по контролю толщин стенок элементов трубопроводов в целях выявления мест износа. Повреждения элементов энергоблоков должны устраняться при проведении плановых ремонтов. Поскольку проведение ремонтных работ связано с большими затратами материальных и трудовых ресурсов, то возникает необходимость прогнозирования объема плановых работ для отдельных элементов конкретной станции.

Коррозионное и механическое растрескивание паропроводов определяется целым комплек-

сом условий: накоплением отложений продуктов коррозии, тепловым и динамическим режимами работы, внешними механическими воздействиями, наличием химически активных частиц и пр. Поскольку многие причины повреждения паропроводов являются неконтролируемыми, то на процесс накопления дефектов следует смотреть как на стохастический и исходить из вероятностных представлений.

Существует весьма сложная методика расчета надежности и прогнозирования остаточного ресурса оборудования по физико-статистической модели «нагрузка – несущая способность» [3]. Эта методика основывается на сборе большого количества экспериментальных данных по толщине трубок паропроводов и действующих на них нагрузок (давление, температура, механические нагрузки и пр.). Далее производится подбор законов распределения случайных величин нагрузок и толщины трубопроводов, а также вида функции усталости и ее параметров. На основе этих данных проводится прочностной расчет, определяется минимально допустимая толщина трубопроводов, прогнозируется остаточный ресурс и даются рекомендации по техническому обслуживанию. Реализовать такой подход в условиях практики весьма проблематично.

Нами предлагается следующая математическая модель прогноза, основанная на минимальном количестве информации о состоянии паропровода. Состояние паропровода (системы) будем характеризовать числом повреждений N , причем если интервал времени мал, то и изменение состояния системы тоже мало, т.е. за малое время наиболее вероятны переходы, в результате которых число N изменяется незначительно, а большие изменения числа N маловероятны. Так

как повреждения возникают не непрерывно, а время от времени, то процесс по переменной N является дискретным. В таких условиях эволюцию системы можно рассматривать как непрерывный во времени и дискретный по числу N стохастический процесс марковского типа [4]. Состояние системы будем характеризовать вероятностью $P(N_0, t_0; N, t)$ того, что система, имевшая в момент времени N_0 повреждений, к моменту t будет иметь N повреждений. Также введем в рассмотрение величину $Q(N, t)dt$ – вероятность появления повреждения за время dt . Эта вероятность определяет средний поток повреждений в системе. В самом деле, вероятность появления двух повреждений за время dt равна $[Q(N, t)dt]^2$. Она представляет собой величину второго порядка малости по dt , и ею можно пренебречь. Тем более можно пренебречь вероятностями появления трех и большего числа повреждений за время dt . Таким образом, среднее число повреждений, появляющихся в системе за время dt , будет равно $0[1 - Q(N, t)dt] + 1 \cdot Q(N, t)dt = Q(N, t)dt$. (1)

Следовательно, средний поток повреждений равен $Q(N, t)$.

Найдем вероятность $P(N_0, t_0; N, t + dt)$. Эта вероятность складывается из вероятности того, что к моменту времени t уже имелось N повреждений и за время dt ни одного повреждения не возникло, и из вероятности того, что к моменту t имелось $N - 1$ повреждений, но к моменту $t + dt$ появилось еще одно. Возможность появления за время dt двух и большего количества повреждений исключается, так как вероятности этих событий – второго и более высокого порядка малости. Следовательно,

$$P(N, t + dt) = P(N, t)[1 - Q(N, t)dt] + P(N - 1, t)Q(N - 1, t)dt. \quad (2)$$

Раскладывая левую часть уравнения в ряд Тейлора и ограничиваясь линейными членами разложения, имеем

$$\frac{\partial}{\partial t} P(N, t) = P(N - 1, t)Q(N - 1, t) - P(N, t)Q(N, t). \quad (3)$$

Полученное уравнение в теории марковских процессов называется уравнением чистого размножения и представляет собой частный случай уравнения Колмогорова [4]. Для краткости записи аргументы N_0 и t_0 опущены. Заметим, что при $N = N_0$ правая часть уравнения не должна содержать первого слагаемого. Как правило, зависимость $Q(N)$ нелинейная, поэтому решение уравнения (3) можно найти только численными методами при помощи вычислительной техники. Между тем для практики достаточно знать, как ведут себя средние числа повреждений и их флуктуации. Для знания этих величин не требуется определения явного вида функции распределения.

Сначала найдем уравнение для среднего числа повреждений. С этой целью умножим левую и правую части уравнения (3) на N и просуммируем по всевозможным значениям числа по-

вреждений от 0 до ∞ . После несложных преобразований получим

$$\frac{d \langle N \rangle}{dt} = \langle Q(N, t) \rangle. \quad (4)$$

Уравнение (4) имеет очевидный физический смысл: скорость роста повреждений в системе определяется средним потоком повреждений. Однако для того, чтобы им воспользоваться, нужно перейти от среднего потока к потоку от среднего числа повреждений. Для этого разложим $Q(N)$ в ряд Тейлора вблизи $\langle N \rangle$:

$$Q(N) \approx Q(\langle N \rangle) + \frac{1}{2} \frac{dQ(\langle N \rangle)}{dN} (N - \langle N \rangle) + \frac{1}{2} \frac{d^2 Q(\langle N \rangle)}{dN^2} (N - \langle N \rangle)^2. \quad (5)$$

Усредняя по N , получим

$$Q(N) \approx Q(\langle N \rangle) + \frac{1}{2} \frac{d^2 Q(\langle N \rangle)}{dN^2} \Delta. \quad (6)$$

При малой дисперсии распределения $\Delta = \langle (N - \langle N \rangle)^2 \rangle$ вторым слагаемым можно пренебречь:

$$\frac{d \langle N \rangle}{dt} \approx Q(\langle N \rangle). \quad (7)$$

На детерминированном уровне описания именно это уравнение должно лежать в основе всех теорий накопления числа повреждений в системе. Заметим, что в случае линейной зависимости $Q(N)$ это уравнение становится точным.

Выведем теперь уравнение для дисперсии распределения

$$\Delta = \langle (N - \langle N \rangle)^2 \rangle = \langle N^2 \rangle - \langle N \rangle^2. \quad (8)$$

После элементарных вычислений получим

$$\frac{d\Delta}{dt} = 2 \left(\frac{dQ}{dN} \right)_{N=\langle N \rangle} \cdot \Delta + Q(\langle N \rangle, t). \quad (9)$$

Если в зависимости $Q(N, t)$ переменные разделяются, то вместо времени t можно ввести новую переменную $\langle N \rangle$, разделив уравнение (9) на уравнение (7):

$$\frac{d\Delta}{d \langle N \rangle} = 2\Delta \frac{d}{d \langle N \rangle} [\ln A(\langle N \rangle)] + 1. \quad (10)$$

Полученное уравнение является линейным и интегрируется в квадратурах:

$$\Delta = \frac{Q^2(\langle N \rangle)}{Q^2(\langle N_0 \rangle)} \left[\Delta_0 + Q^2(\langle N_0 \rangle) \int_{\langle N_0 \rangle}^{\langle N \rangle} \frac{dN}{Q^2(N)} \right]. \quad (11)$$

Аналогичным образом можно найти уравнение для третьего момента распределения $\Gamma = \langle (N - \langle N \rangle)^3 \rangle$, характеризующего меру асимметрии распределения вероятностей. Опуская вычисления, приведем лишь окончательный результат:

$$\frac{d\Gamma}{dt} = 3Q'\Gamma + 3Q'\Delta + Q. \quad (12)$$

Итак, на основании уравнений (7) и (11) определяется среднее число повреждений и их флуктуация $\sqrt{\Delta}$:

$$N(t) = \langle N(t) \rangle \pm \sqrt{\Delta(t)}. \quad (13)$$

Для практического использования полученных результатов необходимо сформулировать полуэмпирический закон роста числа поврежденных паропроводов. Обозначая число потенциально опасных мест на трубопроводе через N_p и считая число повреждений пропорциональным числу неповрежденных потенциально опасных мест $N_p - \langle N \rangle$, получим следующее уравнение для числа повреждений в момент времени $t + dt$: $\langle N(t + dt) \rangle = \langle N(t) \rangle + \lambda(t)(N_p - \langle N \rangle)dt$.

Из этого следует

$$\frac{d \langle N^* \rangle}{dt} = \alpha(t)(1 - \langle N^* \rangle). \quad (14)$$

Здесь $N^* = \frac{N}{N_p}$ – нормированное число повреждений.

Подставляя (14) в уравнение для дисперсии распределения (11) при $\Delta_0 = 0$, получим

$$\frac{\Delta}{N_p} = \langle N^* \rangle (1 - \langle N^* \rangle). \quad (15)$$

В процессе планово-предупредительных ремонтов имеет место частичное восстановление объекта, поскольку поврежденные участки ремонтируются (завариваются, вырезаются и заменяются). При этом остальные опасные участки остаются прежними, что приводит к старению материала опасных участков и ускоренному росту новых повреждений. Поэтому коэффициент α следует считать зависящим от времени: $\alpha = \alpha_0 + 2\alpha_1 t + 3\alpha_2 t^2$. Определение количества коэффициентов идентификации $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$ и их значений осуществляется методом регрессионного анализа результатов обследования конкретных паропроводов.

Интегрируя уравнение (14), получим

$$N^* = 1 - \exp\left(-\int_0^t \alpha(t) dt\right), \quad (16)$$

при этом

$$\int_0^t \alpha(t) dt = g(t) = \alpha_0 t + \alpha_1 t^2 + \alpha_2 t^3.$$

Зависимость числа дефектов, возникших за год ΔN , от времени носит скачкообразный характер, поэтому следует строить интегральную кривую зависимости суммарного числа повреждений от времени. По полученной зависимости можно будет определить прирост числа повреждений за тот или иной промежуток времени.

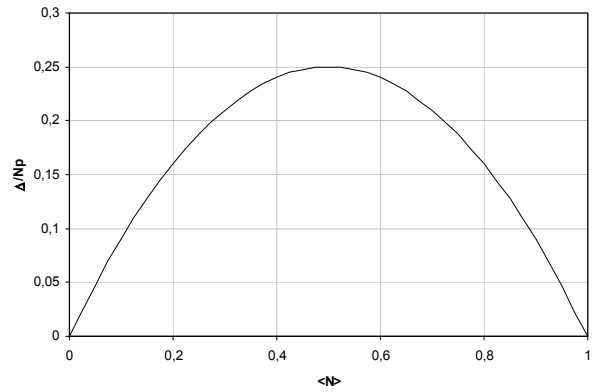


Рис. 1. График зависимости дисперсии распределения от среднего числа дефектов

На рис. 1 представлен график зависимости дисперсии распределения от среднего числа дефектов при нулевой начальной дисперсии. Анализ графика показывает, что дисперсия достигает максимального значения при $\langle N \rangle = \frac{1}{2} N_p$, тогда как в начале процесса и в конце дисперсия равна нулю.

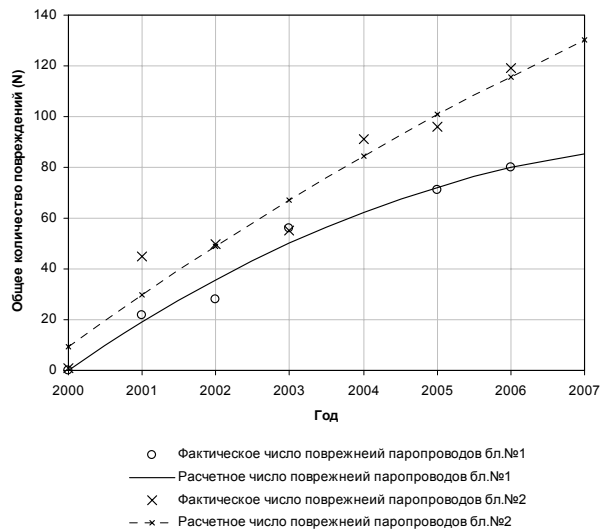


Рис. 2. Данные расчета повреждений паропроводов 1-го и 2-го блоков Рязанской ГРЭС

На рис. 2 в качестве примера представлены результаты прогноза повреждений паропроводов блоков №1 и №2 Рязанской ГРЭС. Анализ графиков показывает, что кривые регрессии оказываются разными для разных паропроводов. Этим подтверждается, что прогноз следует проводить для конкретного паропровода, а не для среднестатистического.

Верификация полученных в расчете данных осуществляется путем отбрасывания последней известной точки статистических данных и сравнения её с точкой, полученной расчетным путем, по следующей формуле:

$$\delta = \frac{N_{уст} - N_{прогноз}}{N_{уст}}, \quad (17)$$

где $N_{уст}$ – реальное количество повреждений, известное по результатам обследования; $N_{прогноз}$ – число прогнозируемых повреждений.

Для верификации прогноза использовались результаты обследования трубопроводов шести блоков Рязанской ГРЭС. Точность прогноза накопления дефектов составляет 86–100 %, что говорит о состоятельности предложенной математической модели и возможности применения данного подхода для оценки примерных объемов ремонтных работ.

Список литературы

1. **Болотин В.В.** Прогнозирование ресурса машин и конструкций. – М.: Машиностроение, 1984.

Семенов Владимир Константинович,
Ивановский государственный энергетический университет,
доктор технических наук, профессор кафедры атомных электростанций,
телефон (4932) 385-778.

Беляков Андрей Александрович,
Ивановский государственный энергетический университет,
аспирант кафедры атомных электростанций.

Щебнев Владимир Сергеевич,
Ивановский государственный энергетический университет,
кандидат технических наук, заведующий кафедрой атомных электростанций,
телефон (4932) 385-778.

2. **Живучесть** паропроводов стареющих тепловых электростанций / Под ред. Ю.Л. Израилева, Ф.А. Хромоченко. – М.: Изд-во «ТОРУС ПРЕСС», 2002.
3. **Острейковский В.А.** Старение и прогнозирование ресурса оборудования атомных станций. – М.: Энергоатомиздат, 1994.
4. Баруча-Рид А.Т. Элементы теории марковских процессов и их приложения. – М.: Наука, 1969.