

БЫСТРЫЙ МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РОСТА ТРЕЩИН В ТРУБОПРОВОДАХ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА

В.А. Андреев, О.М. Гулина

Обнинский институт атомной энергетики, г. Обнинск



Предложен быстрый метод расчета вероятности течи с использованием информации о начальном распределении дефектов, характеристиках метода контроля и параметрах уравнения Пэриса. В отличие от имитационного моделирования предложенный метод обладает большими быстродействием и точностью. Для принятия решения о продолжении эксплуатации трубопровода предложен метод анализа кривой интенсивности отказов, полученной по расчетным данным.

Актуальная проблема управления ресурсом оборудования АЭС требует разработки адекватных методов оценки характеристик надежности этого оборудования при различных механизмах деградации. Одной из таких задач является оценка и прогнозирование ресурса оборудования в условиях роста трещин. При этом управление ресурсом должно состоять, в том числе, в назначении контроля состояния оборудования и проведении превентивных мероприятий, при которых будут обеспечены заданные характеристики ресурса. Для оборудования, важного с точки зрения безопасности (корпуса, трубопроводов ГЦК), в таком случае используется концепция “течь перед разрушением”. Согласно этой концепции для оценки ресурсных характеристик оборудования в условиях роста трещин в качестве предельного состояния принимается наличие сквозного дефекта, причем разрушение трубопровода может наступить уже после дальнейшего роста необнаруженного текущего дефекта. Таким образом, разрушение является зависимым событием. Чтобы вычислить вероятности соответствующих событий, необходимо смоделировать рост начальных дефектов, имеющих в материале оборудования, согласно некоторому закону распределения и оценить, используя критерий отказа (течь или разрушение), вероятности течи, разрушения или безотказной работы.

Разработанный программный комплекс ReP (Reliability of Piping) решает задачи прогнозирования надежности трубопроводов в соответствии с концепцией “течь перед разрушением”. Модель расчета, используемая в комплексе, реализует физико-статистический подход, развиваемый в теории надежности, и принимает во внимание как физическую природу процесса деградации, так и стохастический характер параметров нагружения, а также прочностных и геометрических характеристик материала [4]. Результатом моделирования является оценка вероятности течи

$$P_{\text{leak}} = \{(a \geq h) \cup (K_I(a) \geq K_{IC})\}, \quad (1)$$

где a – величина растущего дефекта; h – толщина стенки трубопровода; $K_I(a)$ – коэффициент интенсивности напряжения в вершине дефекта, K_{IC} – критический коэффициент интенсивности напряжения. Все параметры, используемые в модели, описываются одномерными распределениями в каждый момент времени. Для описания распространения усталостной трещины использовано уравнение вида [2]:

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K), \quad (2)$$

где $\frac{da}{dN}$ – скорость роста трещины (средний прирост глубины за один цикл), а точнее, один из его распространенных вариантов – эмпирическое уравнение Пэриса [2-4]

$$\frac{dl}{dN} = C(\Delta K)^n, \quad (3)$$

где C и n – константы материала [2], в общем случае тоже случайные. Подробно общая имитационная модель, реализованная в комплексе ReP, описана в [4].

Интерфейс комплекса приведен на рис.1.

В настоящее время в комплексе оптимизирована скорость вычисления, внедрены база данных используемых характеристик конструкционных материалов и современные технологии доступа к данным, модифицирована имитационная модель, а также расширены функциональные возможности программного комплекса.

Исходная имитационная модель предполагает следующий алгоритм расчета: генерируется некоторая последовательность дефектов с заданным распределением, осуществляется имитация контроля, в результате чего с вероятностью P_d часть дефектов отсеивается, а оставшиеся растут со скоростью (3), пока не выполняются условия хрупкого разрушения [1]. В результате получается выборка из «проросших» дефектов за i -й год, на основе которой оцениваются статистические показатели надежности. Такой подход имеет существенный недостаток. Для высоконадежного оборудования и методов контроля возникает необходимость в генерации очень большого количества дефектов, что приводит к огромным объемам

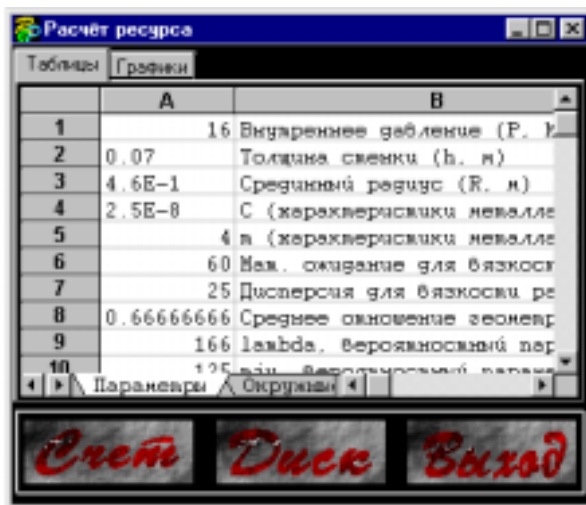


Рис. 1. Интерфейс комплекса

вычислений. В особенности это касается вычисления вероятности течи в первые годы эксплуатации.

Разработан вычислительный метод “быстрая процедура” который качественно отличается от изложенного выше алгоритма:

- допустим, что начало роста дефектов совпадает с началом эксплуатации трубопровода;
- предположим также, что в i -й момент времени некоторый дефект стал сквозным, т.е. его размеры стали сравнимы либо с размерами стенки трубы ($a_1=h$), либо $K_I(a_2)=K_{IC}$, где a_1 - размер дефекта для первого условия, а a_2 - для второго;
- если скорость роста дефекта известна [2], то можно найти $a_1(t)$, $a_2(t)$;
- “прокручивая” рост дефекта назад по времени, можно определить размеры дефектов в начальный момент времени $a_{10}=a_1(-t)$, $a_{20}=a_2(-t)$;
- начальное распределение $P_0(a)$ [3] и вероятность необнаружения дефекта $(1-P_d(a))$ [4] также известны;
- вероятность течи в i -й момент времени находится по формуле

$$P_{\text{leak}}=1-(1-(1-P_0(a_1(-i)/P_0(h))(1-P_d(a_1(-i))))(1-(1-P_0(a_2(-i)/P_0(h))(1-P_d(a_2(-i))))).$$

Ниже приведены результаты расчета математического ожидания вероятности течи трубопровода Ду850 для продольных трещин по исходной имитационной модели. Исходные данные:

- марка стали 10ГН2МФА;
- номинальное давление 16 МПа;
- расход теплоносителя 2000 м³/ч;
- давление при гидроиспытаниях 24 МПа;
- рабочая температура горячей нитки 320°C;
- рабочая температура холодной нитки 290°C;
- для начального распределения дефектов $f_0(\lambda)=\lambda e^{-\lambda a}$, $\lambda=166$;
- для вероятности обнаружения дефекта $P_d=1-e^{-\mu a}$ $\mu=250$;
- внутренний диаметр 850 мм; внешний диаметр 990 мм;
- толщина стенки 70 мм; $C=2.5E-8$; $m=4$.

Результаты расчета по “быстрому” методу приведены на рис.4. Верхняя кривая - вероятности, рассчитанные аналитически, нижняя – по исходной имитационной модели. Результаты получены в предположении, что контроль дефектов проводится

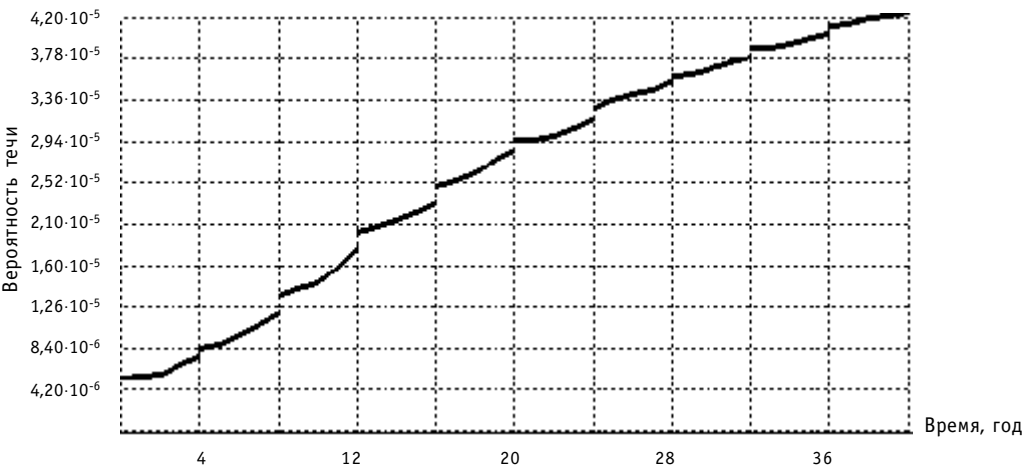
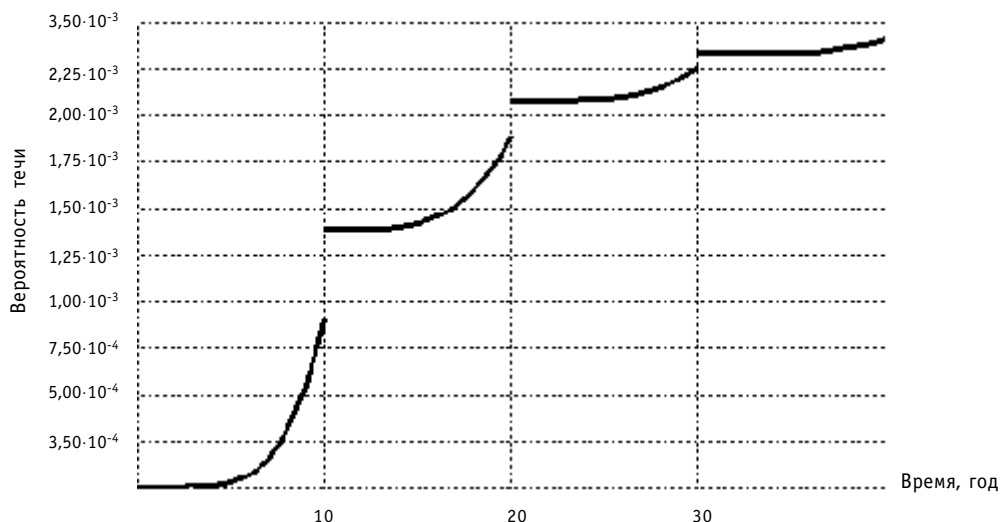


Рис. 2. Число гидроиспытаний (с контролем дефектов) равно 10, длина периода 4 года. Выборка из 10⁶ растущих дефектов

Рис. 3. Период гидроиспытаний 10 лет. Выборка из 10^6 растущих дефектов

только в начале эксплуатации.

Итак, мы располагаем методиками расчета вероятности течи в трубопроводе в результате прорастания усталостных трещин до критических размеров. На основе рассчитанных характеристик надежности необходимо принять решение о возможности дальнейшей эксплуатации трубопровода. Это решение может быть принято, например, на основе анализа кривой интенсивности отказов, отражающей процесс старения материала трубопровода. Стадии начала старения отвечает участок возрастания кривой интенсивности отказов от времени. На рис.5 показана зависимость изменения интенсивности отказов вследствие течи от времени $\lambda_{рас}$ на основе данных рис.4. В работе [6] на основе анализа течей трубопроводов АЭС по каждому типу реакторов приведены эмпирические интенсивности отказов $\lambda_{экср}$. В табл.1 [6] для PWR $\lambda_{экср}=8,1 \cdot 10^{-5}$ 1/м·год. На рис.5 эта константа, пересчитанная для рассматриваемого трубопровода, отмечена горизонтальной линией. Пересечение $\lambda_{рас}$ с верхней границей 95-процентного доверительного интервала для $\lambda_{экср}$ приходится на 32-й год эксплуатации трубопровода, следовательно, в отсутствие периодического контроля и восстановления трубопровода через 32 года после начала его эксплуатации $\lambda_{рас}$ превысит среднестатистический предел. Этот предел также может быть задан, например, с учетом требований по безопасности для данного вида оборудования.

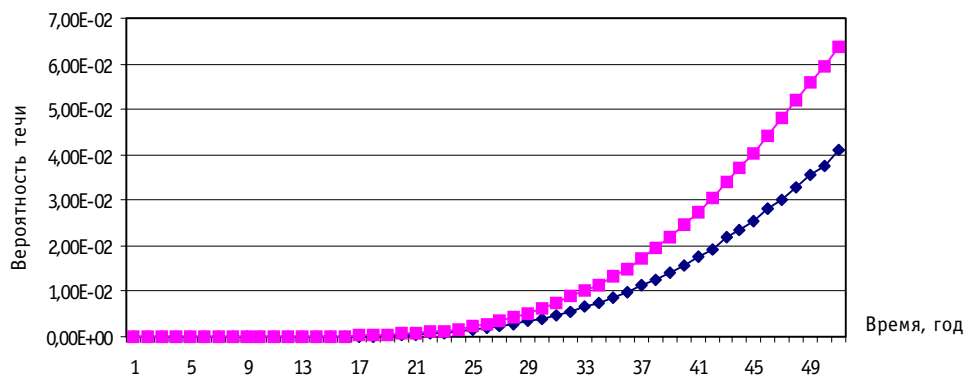


Рис.4. Математическое ожидание вероятности течи для трубопровода Ду850: верхняя кривая - вероятность, рассчитанная аналитически; нижняя - по исходной имитационной модели

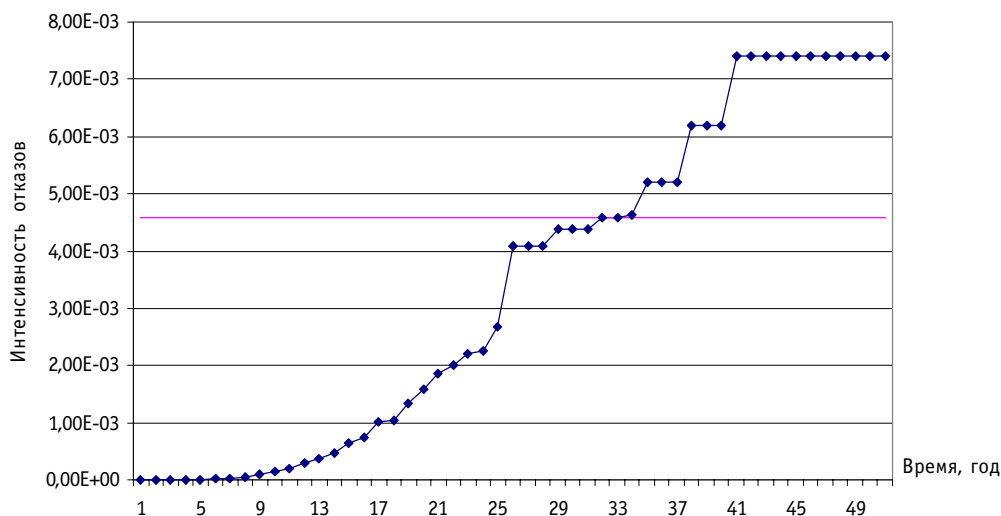


Рис.5. Зависимость верхней границы 95-процентного доверительного интервала для интенсивности течи трубопровода Ду850 от времени

ВЫВОДЫ

Методом обратной прогонки по времени роста сквозного дефекта, оценивается вероятность течи в произвольный момент времени на основе известных характеристик контроля, распределения начальных дефектов и параметров уравнения Пэриса. Предложенный метод обладает существенно большими быстродействием и точностью по сравнению с исходной имитационной моделью. Решение о продлении эксплуатации принимается на основе анализа кривой интенсивности отказов, полученной на основе расчетов вероятности течи.

Литература

1. Сиратори М., Миеси Т., Мацусита Х. Вычислительная механика разрушения. - М.: Мир, 1986. – 334 с.
2. Кузьмин Г.Г. Линейная механика разрушения элементов конструкций ЯЭУ: Учебн. пособие по курсу "Диагностика повреждений методами механики разрушения". - Обнинск: ИАТЭ, 1998. – 108 с.
3. Баландин Ю.Ф., Горынин И.В., Звездин Ю.И., Марков В.Г. Конструкционные материалы АЭС. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 280 с.
4. Гулина О.М., Сальников Н.Л. Вероятностное прогнозирование ресурса трубопроводов и сосудов давления АС // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 1998. - №1. - С. 4-11.
5. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭ Г-7-002-86) / Госатомэнергонадзор СССР. (Правила и нормы в атомной энергетике). - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 252 с.
6. Fullwood R.R., Hall R.E. PRAISDPD: An aging pipe reliability analysis PC code // Reliability Engineering and System Safety. – 1990. – 30. – Р. 427-446.

Поступила в редакцию 27.09.2000

ABSTRACTS OF THE PAPERS

УДК 621.039.526:662.7

Processing of Coal in Engine Fuel with Usage of Nuclear Technology - Future of Coal-Chemistry \A.V. Zrodnikov, V.M. Poplavskiy, G.I. Sidorov, A.V. Malenkov, A.A. Kritchko, A.S. Maloletnev, V.V. Zamanov, T.D. Demidova; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 11 pages, 3 illustrations, 3 tables. – References, 19 titles.

An efficient universal technology for both coal and high-boiling petroleum residues (boiling point > 360-520°C) reprocessing by hydrogenation under hydrogen pressure of 6-10 MPa has been developed in Russia, which allows an economically efficient production of gasoline, diesel and jet engines fuel, raw material for catalytic cracking, phenols, aromatic hydrocarbons $C_6 - C_8$ and other chemical products. High efficiency of the production is stipulated by combination of using of low hydrogen pressure in the processes and high-reliable, environmentally safe of BN-type fast reactors (BOR-60, BN-600) for power supply and intensification of these processes. On the basis of calculation is shown that usage of combined nuclear-chemical technology is essentially reduced the expenditure of coal and releases of noxious wastes into environment.

УДК 621.039.566

Fast Method of Prediction of Crack Growth in Pipelines \V.A. Andreev, O.M. Gulina; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 5 pages, 5 illustrations. – References, 6 titles.

The fast method of leak probability calculation using the information on initial defects allocation, characteristics of control method and parameters of the equation Paris is offered. This method is faster and more accurate than direct simulation method. For decision-making about prolongation of pipeline exploitation the method of the analysis of failure rate curve obtained on calculation data is offered.

УДК 621.039.566.007.4

Analysis of NPP Operating Personnel Activity under Stress Conditions \A.N. Anokhin, S.M. Kindinova, A.A. Bugaev, L.V. Puchkov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 8 pages, 3 illustrations. – References, 6 titles.

The purpose of this paper is to study of the NPP operator performance under extreme conditions that are fraught with stress. The operator activity is modeled in «input-state-output» formalism. The model consists of 37 components, including 21 environmental factors, 9 operator individual indexes, 4 stress indexes, and 3 indexes of operator's efficiency. Evaluation of factors and indexes was carried out by expert estimation technique with special questionnaire. 30 operators from Kalinin and Ignalina NPPs were interviewed as experts. Each expert carried out verbal description and qualitative estimation of the most critical situation, which has been taking place in his own practice. As a result of correlation analysis of acquired data some relationships between model components were detected. Emotional pressure and deficit of time are the most significant factors that provoke stress and operator's errors.

УДК 51-74:621.039.58

Problem of Estimation of Equipment Reliability under Discrete Degradation \A.I. Pereguda, I.A. Soborova, A.I. Groshev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 8 pages, 4 illustrations. – References, 5 titles.

The mathematical model of reliability of equipment subjected to percussion load of the same nature is described. Analysis of this model allows to receive quantitative values of indices of reliability and longevity. The practical example is given.

УДК 621.039.526

*Role of Reactivity Coefficients at Realization Principle of the Maximal Self-Protection of Fast Reactors *