

УДК 658.562

Р. М. ТРИЦ, д-р техн. наук

С. М. ПОЛИЩУК, канд. техн. наук

Украинская инженерно-педагогическая академия, г. Харьков

В. И. БЕСЦЕННЫЙ

Харьковский машиностроительный колледж, г. Харьков

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ НОРМАТИВНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭНЕРГООБОРУДОВАНИЯ АЭС

Рассмотрено существующее нормативное обеспечение безопасной эксплуатации энергооборудования атомных станций Украины. Предложены рекомендации по усовершенствованию нормативной обеспечения на основе типизации расчета остаточного ресурса трубопроводных систем АЭС.

Розглянуто існуюче нормативне забезпечення безпечної експлуатації енергообладнання атомних станцій України. Запропоновані рекомендації по удосконаленню нормативного забезпечення на основі типизації розрахунку залишкового ресурсу трубопровідних систем АЕС.

Введение

Атомная энергетика является одной из самых молодых и динамично развивающихся отраслей мировой экономики. Её история насчитывает лишь немногим более 50 лет. Развитие атомной энергетики стимулируют растущие потребности человечества в топливе и энергии при ограниченности невозобновляемых ресурсов. В сравнении с другими энергоносителями ядерное топливо имеет в миллионы раз большую концентрацию энергии.

По данным МАГАТЭ в мире действуют 439 ядерных энергоблоков общей мощностью 367,77 ГВт. В настоящее время европейская атомная энергетика переходит на рыночные основы. Мировая десятка стран-лидеров, в энергобалансе которых АЭС занимают ведущие позиции, — это именно европейские страны (кроме Армении). Украина занимают 6 позицию по выработке электроэнергии атомными станциями (рис. 1).

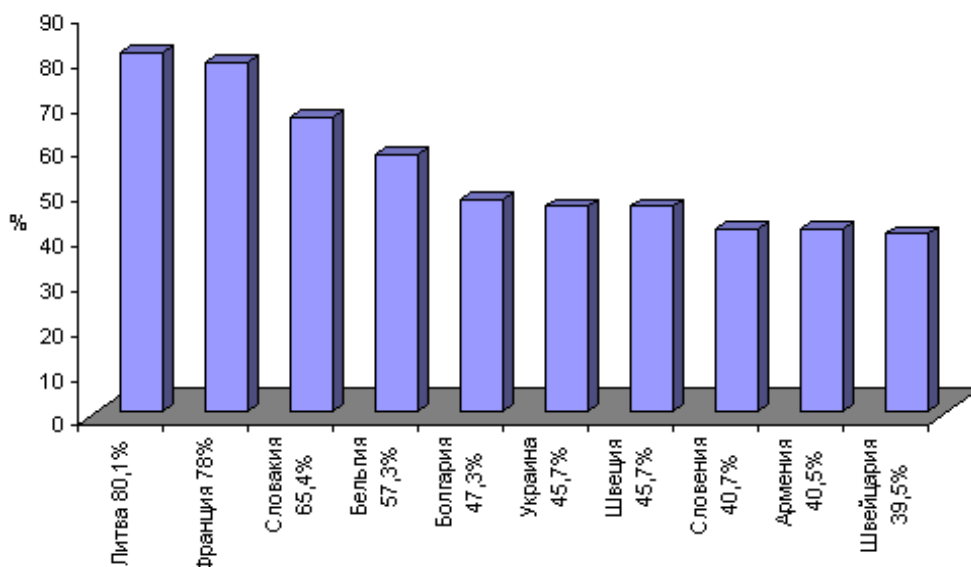


Рис.1. Атомная энергетика в энергобалансе стран мира (десятка лидеров)

В Украине работает 15 энергоблоков с общей мощностью 11835 МВт, что составляет 45,7 % от общего производства электроэнергии. Однако, при проектировании энергоблоков атомных станций заложен ресурс 30 лет. В настоящее время значительная часть

энергооборудования атомных станций Украины приблизилась к установленным срокам службы или уже исчерпала их. В связи с этим встают вопросы о снятии их эксплуатации или же продления сроков эксплуатации энергооборудования, а для этого необходимо определить их ресурс.

Согласно с требованиями МАГАТЭ все работы связанные с энергооборудованием АЭС должны выполняться в соответствии с существующими нормативными документами по безопасности. Существующее нормативное обеспечение по безопасной эксплуатации энергооборудования не учитывает все технические параметры нагрузки на их трубопроводы, и поэтому не позволяет в полном объеме делать комплексный анализ состояния трубопроводов для определения их ресурса.

Для безопасной эксплуатации АЭС необходимо создать механизм управления сроками эксплуатации, то есть ресурсом энергооборудования атомных станций, на основе мониторинга, унификации и стандартизации всех технических параметров трубопроводов, что позволит оптимизировать процесс их эксплуатации и сделать переход к работе в сверхпроектные сроки, без значительных остановок и материальных потерь. На современном уровне развития атомной энергетики без широкого применения унификации и стандартизации невозможна организация рентабельного производства электроэнергии и эксплуатация энергооборудования. В связи с этим, необходимо усовершенствовать нормативно-методическое обеспечение эксплуатационной безопасности трубопроводов атомных станций.

Основная часть

Для обеспечения эксплуатационной безопасности АЭС необходимо иметь нормативную документацию, отражающую требования для определения ресурса трубопроводов АЭС, связанные с параметрам их нагружения [1]. Ее можно создать на основе типизации трубопроводов и расчета их остаточного ресурса. Инструментом типизации в широком понимании являются классификация объектов или процессов по признакам, необходимым для решения поставленной задачи.

В задачу исследований входит создание нормативного обеспечения безопасной эксплуатации на основе разработки научно-обоснованной модели модели и алгоритма расчета остаточного ресурса трубопроводов атомных станций. Математическая модель даст возможность определить способность изделия (в данной работе, трубопроводов) выполнять заданные функции в течение проектного срока эксплуатации и прогнозировать ресурс, то есть возможность продлить проектные сроки безопасной эксплуатации.

Для создания математической модели, которая позволит выполнить комплексный анализ технического состояния трубопровода, необходимо: построить трехмерную модель трубопровода; определить напряженно-деформированное состояние трубопровода при малоцикловых нагружениях, вызванных температурными расширениями; определить напряженно-деформированное состояние трубопровода при вибрационных нагрузках; определить и смоделировать дефект при эрозионно-коррозионном износе и напряжения, возникающие при данном типе нагружения.

Для разработки математической модели определения остаточного ресурса трубопровода использовали фрагмент главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ), так как он является одним из важнейших трубопроводов в системе обеспечения безопасной эксплуатации на атомных станциях.

Таким образом, первым этапом создания математической модели является построения модели трубопровода для проведения расчетных исследований напряженно-деформированного состояния. Предлагается построение трехмерной (оболочечной) модели трубопровода (рис. 2). Такая модель дает возможность определить напряжения, возникающие как на внешней, так и на внутренней стороне стенки трубопровода и смоделировать дефект изменения толщины стенки при эрозионно-коррозионном износе.

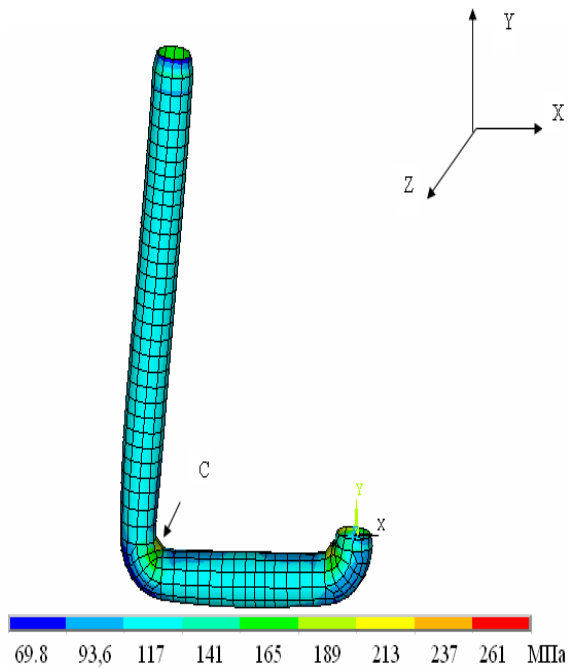


Рис. 2. Распределение интенсивности напряжения в трубопроводе ГЦТ.

Вторым этапом был построен блок нагружения трубопровода после планово-предупредительного ремонта и определено напряженно-деформированное состояние трубопровода при малоцикловых нагрузках, методом конечных элементов.

Третий этап заключался в определении напряженно-деформированного состояния трубопровода, которые возникают при вибрационных нагрузках. Были заданы величины пульсации давления при транспортировке теплоносителя та определены напряжения, возникающие в металле трубопровода.

Четвертым этапом был смоделирован дефект, который возникает при эрозионно-коррозионном износе и определено напряженно-деформированное состояние в области максимального утонения стенки трубопровода.

Полученные данные напряженно-деформированного состояния при малоцикловых нагрузках, вибрации и эрозионно-коррозионном износе, дают возможность предположить о линейности проходящих процессов. Уравнение накопления усталостных повреждений, для определения ресурса, напряженно деформированного трубопровода содержащего локальные дефекты можно представить в виде[2]:

$$\frac{dz}{dt} = \frac{\sigma_a(t)}{T\sigma_{-1K}^m N_0}, \quad (1)$$

где σ_{-1K}^m – напряжение предела выносливости, N_0, m – параметры кривой усталости; T – эффективный период нагружения; $\sigma_a(t)$ – эквивалентная амплитуда напряжений в опасной зоне, подверженной эрозионно-коррозионному износу.

Эквивалентная амплитуда определяется по формуле[3]:

$$\sigma_a = \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2}.$$

Математическая модель применима для трубопроводов атомных электростанций, со следующими исходными параметрами: диаметр – от 89 до 1200 мм; материал – сталь 20, аустенитная сталь марки 08X18H10T; среда теплоносителя – вода, пар, вода и пар; рабочая температура – от 20 до 350°C; рабочее давление – до 30 МПа.

На основе математической модели разработано типизированную систему определения остаточного ресурса трубопроводов при разных типах нагружения (табл. 1), согласно кодификатору[4], что позволяет повысить достоверность прогноза.

Для определения остаточного ресурса разработан унифицированный пошаговый алгоритм расчета на основе предложенной математической модели, который заключается в следующем:

Шаг 1. Определение накопления усталостных повреждений трубопровода, согласно с

формулой (1), где $\sigma_a^m(t) = K \frac{P}{h(t)},$

где P – давление в трубопроводе;
 $h(t)$ – толщина стенки в трубопроводе в опасной зоне, в месте эрозионно-коррозионного износа, в зависимости от времени
 K – коэффициент пропорциональности распределения давления в трубопроводе.

Таблица 1

Система типизации расчета остаточного ресурса трубопроводов при разных типах нагружения

Код трубопровода	Модели определения остаточного ресурса трубопровода при разных типах нагружения	Примечание
K2B01 K2П01 K2Д01 K3B01 K3П01 K3Д01 K4П01	$N = \left[\frac{(\varepsilon_a - \sigma_{-1}/E)A}{\ln(1/(1-\varphi))} \right]^m$	ε_a – малоцикловая усталость; σ_{-1} – граница усталости; E – модуль упругости; φ – коэффициент поперечного сечения
K1B02 K2B02 K2Д02 K3B02 K3Д02 K4П02	$N = \left[\frac{(\varepsilon_{ai} - \sigma_{-1}/E)A}{\ln\left(\frac{1}{1-\varphi}\right)} \right]^m$	ε_{ai} – малоцикловая усталость при блочном нагружении
K2B03 K2Д03 K3B03 K3Д03	$N = \frac{2}{(n-2)CY^n \pi^{n/2} \Delta\sigma^n} \times \left[\frac{1}{a_o^2} - \frac{1}{a_c^2} \right]$	N – число циклов доразрушения; C – константа, которая характеризует циклическое разрушение стали
K2B13 K2Д13 K3B13 K3Д13	$N = \left[\frac{(\varepsilon_a - \sigma_{-1}/E)A}{\ln(1/(1-\varphi))} \right]^m$	m – коэффициент, который характеризует механические параметры стали
K2B23 K2Д23 K3Д23	$N = \frac{2}{(n-2)CY^m \pi^{n/2} \Delta\sigma^n} \times \left[\frac{1}{a_o^{(n-2)/2}} - \frac{1}{a_c^{(n-2)/2}} \right]$	a_o, a_c – параметры дефекта при циклическом нагружении; Y – коэффициент интенсивности напряжения

Шаг 2. Определения условной плотности вероятности меры повреждений

$$z(t) = P^m F(t, t_0), \tag{2}$$

где
$$F(t, t_0) = \frac{1}{T\sigma_{-1k}^m N_0} \left[t_0 h_0^{-m} - \frac{1}{v(1-m)} \left((h_0 - v(t-t_0))^{1-m} - h_0^{1-m} \right) \right],$$

v – скорость износа;
 T – рабочая температура;
 t_0 – момент зарождения дефекта; t – момент времени измерения;
 h_0 – начальная толщина стенки.

Шаг 3. Определение накопления усталостных повреждений z_i для i -го промежутка времени эксплуатации и границы выносливости

$$z_i = N_i \frac{\sigma_{ai}^m}{\sigma_{-1ki}^m N_0} \quad (i = \overline{1, k}), \quad (3)$$

где σ_{-1ki} – граница выносливости конструкции для i -го промежутка времени;

σ_{ai} – максимальное напряжение в элементе трубопровода;

N_i – число циклов нагружения.

$$\sigma_{-1ki} = \sigma_{-1i} / K_{\sigma D}, \quad (4)$$

где σ_{-1i} – граница выносливости металла трубопровода в области дефекта.

Коэффициент распределения напряжения в трубопроводе $K_{\sigma D}$ определяется:

$$K_{\sigma D} = \alpha_\sigma / \left[0,5 \left[1 + \left(\frac{1}{88,3} \frac{L}{G} \right)^{-\nu\sigma} \right] + \frac{1}{\beta} - 1 \right], \quad (5)$$

где L – периметр сечения, в котором наблюдается концентрация напряжения;

α_σ – коэффициент концентрации;

β – коэффициент, который зависит от материала трубопровода;

G – градиент максимального напряжения.

Шаг 4. Степень i повреждения трубопровода на i -м промежутке времени. Зная границу выносливости элемента трубопровода, можно найти повреждаемость.

Повреждаемость на i -ом промежутке времени находится:

$$a_i = N_i / [N_0]_i. \quad (6)$$

Число циклов нагружения до разрушения определяется:

$$[N_0]_i = N_0 \sigma_{-1ki}^m / \sigma_{ai}^m. \quad (7)$$

Шаг 5. Определение остаточного ресурса

$$r_{ост} = z / a_c, \quad (8)$$

где z – запас по повреждаемости $z = l - a_k$, среднегодовая повреждаемость $a_c = (1/N_0 + 1/[N_0]_i) / 2$.

На основе проведенных численных исследований было установлено, что максимальные напряжения возникают в области гйба трубопровода, однако, как показали расчеты, более опасной с точки зрения накопления усталостных повреждений оказалась область дефекта.

Выводы

1. Проведен анализ нормативного обеспечения безопасности эксплуатации энергооборудования атомных станций и предложены рекомендации по ее усовершенствованию.

2. Предложена математическая модель прогнозирования остаточного ресурса в процессе эксплуатации трубопроводных систем атомных электростанций при многоциклового усталости трубопроводов, которые имеют дефекты в результате эрозионно-коррозионного износа.

3. Разработана система типизации расчета остаточного ресурса трубопроводов при разных типах нагружения, что позволяет сократить время при решении вопросов связанных с оценкой сроков их эксплуатации.

4. Предложен пошаговый алгоритм расчета остаточного ресурса, который позволяет разработать единую универсальную систему расчета остаточного ресурса трубопроводов в условиях многоциклового усталости при эрозионно-коррозионном износе.

Список литературы

1. Баранов А. Н., Полищук С. М., Кипоренко А. С., Сидоренко П. А. Влияние системы регулирования на динамику движения двухфазных сред в трубопроводах крупных энергоблоков // Вестник национального политехнического университета «ХПИ». – 2005. – № 57. – С.42-49.
2. Жовдак В. А., Кипоренко А. С., Локошко В. В. та інші. Применение информационных технологий для прогнозирования остаточного ресурса трубопроводов АЭС. Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Динаміка і міцність машин. – Харків: НТУ «ХПИ». – 2008. – № 36. – С. 65–74.
3. Конечные элементы и аппроксимация / О. Зенкевич, К. Морган. – М.: Мир, 1986. – 318 с.
4. Кіпоренко Г. С. Унифікація трубопроводних систем атомних станцій по класам безпеки з урахування різних типів навантаження // Енергосбереження • Енергетика • Енергоаудит. – 2009. – № 6 (64). – С. 22–28.

THE IMPROVING NORMATIVE PROVIDING OF SAFE EXPLOITATION OF THE ENERGOEQUIPMENT OF NPP

R. M. TRISCH, Dr. Tech. Sci., S. M. POLISHCHUK, Cand. Tech. Sci.
V. I. BESCENNIY

The existent normative providing of safe exploitation of the energoequipment atomic stations of Ukraine is considered. Offered recommendations after the improvement of the normative providing on the basis of tipization calculation of remaining resource of the pipeline systems of NPP.

Поступила в редакцию 10.02 2010 г.