

---

УДК 621.039.56

*К. Н. Маловик, А. Н. Мирошниченко*

---

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНТРОЛЯ ОСТАТОЧНОЙ ДЕФЕКТНОСТИ ТРУБОПРОВОДОВ АЭС

---

UDC 621.039.56

*K. N. Malovik, A. N. Miroshnichenko*

---

## IMPROVEMENT OF RESIDUAL DEFECTIVENESS CONTROL OF THE NPP PIPELINES

---

### **Аннотация**

Проблема обеспечения надёжной работы оборудования, трубопроводов АЭС и других опасных производственных объектов с каждым годом становится всё более актуальной, так как их старение во многих отраслях промышленности значительно опережает темпы технического перевооружения.

Для определения возможности долгосрочной эксплуатации оборудования проведён анализ факторов, влияющих на развитие остаточной дефектности, а также выявлены коренные причины возникновения деградационных отказов трубопроводов АЭС.

### **Ключевые слова:**

надёжность, безопасность, работоспособность, долгосрочная эксплуатация, остаточная дефектность, деградационный отказ, критерии надёжности, оборудование АЭС.

### **Abstract**

The problem of ensuring reliable operation of equipment, NPP pipelines and other hazardous production facilities is becoming more and more urgent with each coming year, since their aging in many industries is far ahead of the pace of technological upgrading. To determine the opportunities for the long-term operation of equipment, the analysis of factors destabilizing the reliability of nuclear power plant piping has been made, and the basic causes of their degradation failures have been revealed.

### **Key words:**

reliability, safety, efficiency, long-term operation, residual defectiveness, degradation failure, criteria of reliability, NPP equipment.

---

### **Введение**

Проблема обеспечения надёжной работы оборудования, трубопроводов АЭС и других опасных производственных объектов с каждым годом становится всё более актуальной, так как их старение во многих отраслях промышленности значительно опережает темпы технического перевооружения.

Первым и необходимым условием безаварийной работы АЭС является высокое качество проектирования, изготовления и монтажа оборудования. Однако

как бы тщательно оборудование не было изготовлено, в процессе его эксплуатации из-за механических воздействий, термических напряжений, коррозионных процессов в металле происходят структурные изменения, возникают дефекты сплошности. Со временем они развиваются и могут привести к разрушению оборудования АЭС.

Следовательно, для определения возможности долгосрочной эксплуатации оборудования необходим анализ факторов, влияющих на развитие остаточной дефектности, а также выявление

коренных причин возникновения деградационных отказов трубопроводов АЭС для соответствующего контроля.

### **Основная часть**

В настоящее время для контроля остаточной дефектности трубопроводов и оборудования АЭС применяются такие термины, как работоспособность [1], отказ [1], долгосрочная эксплуатация [2], ресурсоспособность [3], дефект [4], дефектность [5, 6], остаточная дефектность [7]. При этом следует отметить, что только термины работоспособность, дефектность, дефект и отказ гостированы, а другие приводятся в соответствующей технической литературе.

Трубопроводы занимают центральное место при оценке безопасности и ресурсных характеристик АЭС в связи с тем, что они:

- оказывают наибольшее влияние на ядерную безопасность АЭС;
- являются наиболее многочисленной группой конструкций энергоблока;
- имеют большие запасы упругой энергии, представляющие большую угрозу с точки зрения не только ядерной, радиационной, но и техногенной безопасности;
- при замене (или ремонте) требуют, как правило, больших материальных затрат.

На стадии проектно-конструкторских работ материалы трубопроводов выбираются таким образом, чтобы их прочность обеспечивалась на протяжении всего срока эксплуатации. Следовательно, при анализе их технического состояния необходимо учитывать все воздействия, которые предусмотрены на этапах проектирования, изготовления, монтажа, приёмо-сдаточных испытаний, транспортировки, пуско-наладочных работ или эксплуатации, приводящие к сокращению ресурсных характеристик.

Под влиянием внешних воздейст-

вий в металле трубопроводов могут возникать и развиваться повреждения, которые разделяют на силовые, тепловые, коррозионные и радиационные [8]. Общее системное представление повреждения трубопроводов АЭС показано на рис. 1.

Все трубопроводы различают по параметрам (давление, температура), степени радиоактивности, протекающей в них среде (вода, пар, пароводяная смесь, воздух и др.), периодичности работы (непрерывная работа, периодическое включение). Их элементы находятся под воздействием внутреннего давления рабочей среды, веса труб, арматуры и тепловой изоляции, напряжений самокомпенсации, возникающих в результате теплового расширения. Внутреннее давление в трубопроводах вызывает напряжение растягивания, а нагрузки – напряжение изгиба. Под действием тепловых расширений возникают изгибающие и сжимающие усилия в трубопроводах, расположенных в одной плоскости, а сжатие, изгиб и кручение – в пространственных. Под действием внутреннего давления и высоких температур при длительной эксплуатации может происходить постепенное увеличение диаметра и уменьшение толщины стенки трубопроводов из-за ползучести металла. Срок службы металла определяется длительностью установившейся фазы ползучести, которая в значительной степени зависит от свойств металла и условий эксплуатации.

В различных системах АЭС используются жидкие и газообразные теплоносители, в основном вода под давлением и пар, а в трубопроводах транспортируются также такие среды, как техническая вода, обессоленная вода (дистиллят), азот, аргон, химические реагенты и целый ряд других специальных сред. Вода обладает коррозионной активностью, склонна к разложению при радиационном облучении.

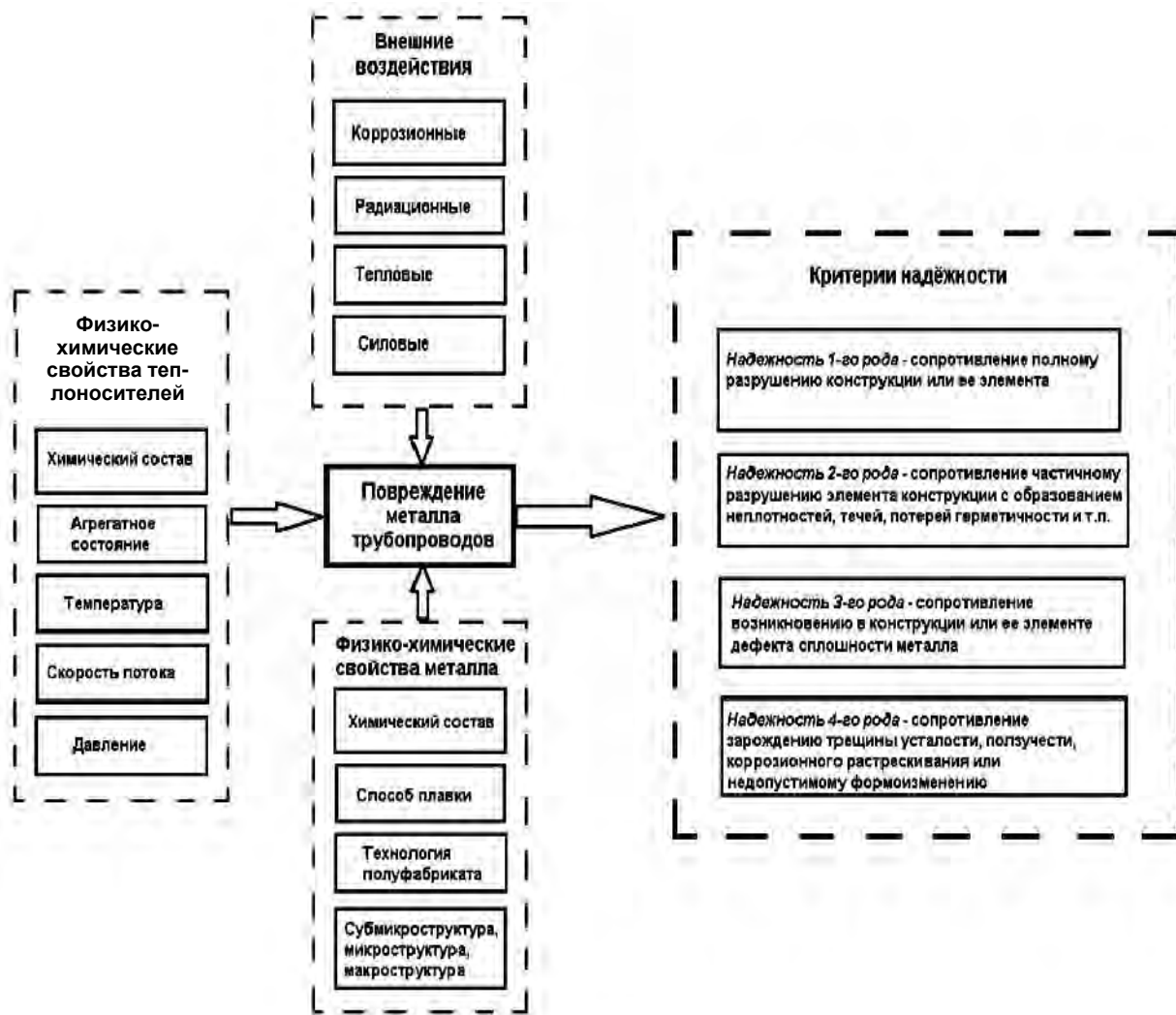


Рис. 1. Системное представление повреждения трубопроводов АЭС

У нее низкая температура кипения, что заставляет поддерживать высокое давление в контуре. Окисление металлических поверхностей оборудования происходит в связи с тем, что в результате радиолитического распада воды в реакторе образуются атомарный коррозионно-агрессивный кислород и водород. Кислород вызывает коррозию оборудования, а водород вступает в реакцию с газом компенсатора объема, которым является азот. Жидкая среда может оказывать на арматуру и гидродинамическое воздействие, создавая гидравлические удары, вибрацию, эрозию металла в результате кавитационного износа и пр. На интенсивность этих явлений, помимо давления и температуры, влияет ско-

рость движения среды.

Эксплуатационная надежность трубопроводов зависит от качества сварных соединений, состояния их деталей и элементов, работоспособности опорно-подвесной системы креплений, правильного выбора марки стали с учетом условий работы, технологии изготовления труб.

Марки сталей для труб, по которым на АЭС транспортируют коррозионно-неагрессивные среды, зависят от температуры среды. При температурах до 450 °С используют углеродистые стали 10 и 20; в интервале температур 450...570 °С – стали перлитного класса, легированные хромом 0,5...2 %, молибденом 0,3...1 % и ванадием 0,2...0,4 %;

наиболее распространены стали 12Х1МФ и 15Х1М1Ф. Для более высоких температур (до 620 °С) можно применять нержавеющие мартенситно-ферритные стали с высоким содержанием хрома, например, ЭИ-756 (11 % Сг, 2 % W, 0,7 % Мо, 0,2 % V). Наиболее жаропрочны и жаростойки стали аустенитного класса, из которых больше всего в атомной энергетике распространена сталь типа ОХ18Н10Т. Однако в эксплуатационных условиях при высоких температурах она оказалась недостаточно надежной из-за процесса старе-

ния. Аустенитные стали обладают наиболее высокой общей коррозионной стойкостью, что важно при транспортировке коррозионно-агрессивных сред.

Основными видами повреждений трубопроводов АЭС являются коррозия, кольцевые трещины, трещины у концов труб, износ, изгиб, выпучины и разрывы, классификация которых представлена в табл. 1 [9].

Выделим основные причины возникновения дефектов труб, результаты анализа которых отражены в табл. 2.

Табл. 1. Классификация дефектов трубопроводов АЭС

Хронологическая	Функциональная	По характерным признакам
Конструктивные	Дефекты от силовой нагрузки	Дефекты геометрической формы
	Дефекты от действия только силовой нагрузки	Сварочные дефекты (непровары)
Технологические	Дефекты от действия силовой нагрузки в сочетании с другими факторами	
Монтажные	Дефекты от коррозионной среды	Дефекты химического состава
Эксплуатационные	Дефекты от действия только коррозионной среды	Дефекты микроструктуры
	Дефекты от действия коррозионной среды в сочетании с другими факторами	Дефекты механические
Ремонтные	Дефекты от радиационного воздействия	Дефекты однородности
	Дефекты, основной причиной которых является тепловое воздействие	Дефекты сплошности

Табл. 2. Причины возникновения дефектов труб

Причина	Следствие	Примечание
1	2	3
Существующая технология прокатки металла, технология непрерывной разливки стали на отдельных металлургических заводах	Изготовление некачественных труб	<b>Деграционный отказ</b> (имеются случаи разрушения по причине расслоения металла)
Входной контроль сырья несовершенен или полностью отсутствует	Дефекты сырья становятся дефектами труб	<b>Деграционный отказ</b>
При изготовлении труб приходится подвергать металл нагрузкам, при которых он работает за пределом текучести	Появление наклепа, микрорасслоений, надрывов и других скрытых дефектов	<b>Деграционный отказ</b> (из-за кратковременности последующих заводских испытаний многие скрытые дефекты проявляются в процессе эксплуатации трубопроводов)

Окончание табл. 2

1	2	3
При очистке трубопроводов скребками-резцами возникают дефекты пластической деформации локальных участков поверхности трубы – риски, подрезы и т. д.	Концентраторы напряжений являются потенциальными очагами развития коррозионно-усталостных трещин	<b>Деградационный отказ</b> (очистка трубопроводов с помощью проводочных щеток исключает повреждения труб в виде подрезов, но при определенных режимах обработки приводит к деформациям поверхности металла, снижающим его коррозионную стойкость)
Коррозионные повреждения труб		
Низкая степень контроля заводами геометрической формы труб	На трубах диаметром 500...800 мм смещение кромок достигает 3 мм (при норме 0,75...1,2 мм), овальность – 2 %	–
Механические воздействия при погрузочно-разгрузочных, транспортных и монтажных операциях	Появление на трубах вмятин, рисок, царапин, задиоров	–

Появление и развитие дефектов, рассмотренных в табл. 2, в течение периодов приработки и нормальной эксплуатации трубопроводов АЭС предопределяет возникновение деградационных отказов, которые носят случайный характер, прежде всего, из-за низкого качества проектирования, изготовления, недостаточной кондиции покупных элементов и материалов, монтажа, эксплуатации, циклических изменений нагрузки, а также других неблагоприятных внешних факторов, вызванных как физическими процессами при нормальной эксплуатации, так и влиянием человека. По тяжести последствий отказы можно классифицировать по четырём категориям, представленным в [9]. Тогда надёжность трубопроводов и оборудования АЭС может оцениваться по критериям, описанным в материалах [8, 10], из которых наиболее важна надёжность 1, 2, 3 и 4-го рода.

При выполнении всех требований на стадиях проектирования и изготовления оборудования и соблюдения условий эксплуатации предполагается, что прочность в течение всего проектного срока обеспечена, а дефекты во время

эксплуатации не должны появляться. В действительности при установленных на этапе разработки трубопроводов АЭС требованиях к процессам контроля всегда имеется определённая вероятность пропустить дефект. Следовательно, можно утверждать, что после изготовления, испытаний и исправления обнаруженных дефектов в действующем, восстановленном оборудовании могут остаться невыявленные дефекты (остаточная дефектность), которые в конечном итоге и определяют надёжность, работоспособность и ресурсоспособность оборудования.

Каждый отказ оборудования и трубопроводов АЭС происходит по реальной конструкторской или производственно-технической причине, заложенной при их создании. Это означает, что возникновение ненадёжности имеет наследственный характер. Недостатки, привнесённые при создании трубопроводов АЭС, определяют возможные неисправности. Суммарная неопределённость энтропии, накопленная при создании изделия, т. е. состоящая из неопределённостей, заложенных при проектировании и возникших на стадии про-

изводства, проходит в течение эксплуатации латентный (скрытый) период и в какой-то момент времени достигает своего критического значения, суммируясь с эксплуатационной неопределённостью, что и приводит к отказу [11]. То есть недостатки, привнесённые в оборудование при «рождении» трубопроводов АЭС, определяют его «болезни» и время жизни.

Следует отметить, что вопросы исследования дефектности, определяемой скрытым (латентным) характером протекающих процессов, очень мало освещены как в отечественной, так и зарубежной литературе. Поэтому при оценивании остаточной дефектности трубопроводов АЭС необходимо обеспечивать не только высокую достоверность неразрушающего контроля [12], но и принимать действенные меры по выявлению отказов, обусловленных наследственностью и накоплением ненадёжности на разных этапах жизненного цикла трубопроводов АЭС. При этом можно считать, что энтропия – функция степени остаточной дефектности трубопроводов, характеризующая процесс изменения технического состояния, носит деградационный характер.

Учитывая изложенное, для оценивания остаточной дефектности трубопроводов АЭС можно предложить энтропийный критерий деградации:

$$\frac{dS}{dt} = C \sum_{i=1}^n \frac{\partial q_i}{\partial(\Delta x_i)} \frac{\partial(\Delta x_i)}{dt},$$

где  $C$  – положительная константа, связанная с выбором единиц измерения;  $S$  – энтропия состояния трубопроводов и оборудования, эквивалентная его ресурсу, выработанному за время  $t$ ;  $n$  – число параметров, характеризующих

действующие нагрузки;  $\Delta x_i$  – разность между критическими (экстремальными) и действующими (средними) значениями нагрузок;  $\frac{\partial q_i}{\partial(\Delta x_i)}$  – скорость изменения

вероятности отказов, вызванного изменением  $\Delta x_i$ ;  $\frac{\partial(\Delta x_i)}{dt}$  – скорость изменения величины запаса по нагрузке, зависит от физических и физико-химических свойств материала.

Применение предложенного критерия позволяет, учитывая деградационный характер отказов (см. табл. 2), выполнить физическое моделирование интенсивности отказов  $\lambda(t)$  трубопроводов АЭС. При этом на основании материалов [2] возможно получить как оптимистический, так и пессимистический прогнозы. Следовательно, можно построить прогнозирующую область наследственных (латентных) отказов, показанную на рис. 2. Такой подход позволяет повысить качество оценивания остаточной дефектности трубопроводов за счёт более полного выявления наследственных деградационных отказов.

### Выводы

1. Проведённый анализ факторов, дестабилизирующих надёжность трубопроводов АЭС, позволяет предложить их систематизацию.

2. Выявлен наследственный характер отказов, что обосновывает применение энтропийного критерия деградации.

3. Показана возможность прогнозирования области наследственных (латентных) отказов, способствующая повышению качества оценивания остаточной дефектности трубопроводов АЭС.

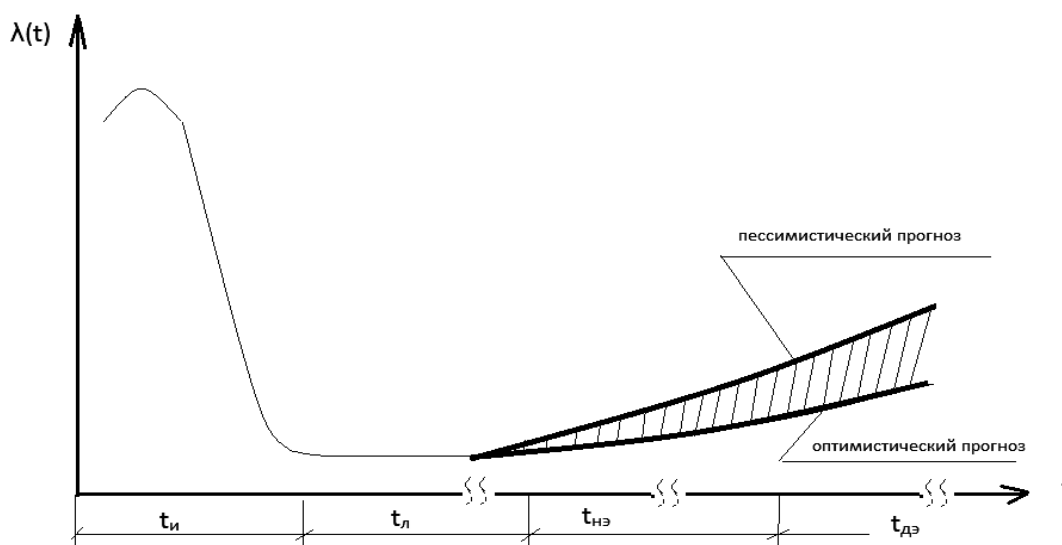


Рис. 2. Прогнозируемая область наследственных (латентных) отказов:  $t_{и}$  – период изготовления;  $t_{л}$  – латентный период;  $t_{нэ}$  – период назначенной эксплуатации;  $t_{дэ}$  – период долгосрочной эксплуатации

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Термины и определения. – М., 1989.
2. Safe Long Term Operation of Nuclear Power Plants, Safety Reports Series – Vienna : International atomic energy agency. – 2008. – № 57. – 35 p.
3. Маловик, К. Н. Развитие научных основ повышения качества оценивания и прогнозирования ресурсных характеристик сложных объектов : монография / К. Н. Маловик. – Севастополь : СКУЯЭиП, 2013. – 332 с. : ил.
4. ГОСТ 15467-79. Контроль качества продукции. Основные термины и определения. – М., 1979.
5. ГОСТ Р 53697-2009. Контроль неразрушающий. Основные термины и определения. – М., 2009.
6. ISO/TS 181173:2005. Контроль неразрушающий. Основные термины и определения. – М., 2005.
7. Маловик, К. Н. Анализ нормативной базы по оценке остаточной дефектности оборудования АЭС / К. Н. Маловик, А. Н. Мирошниченко // Устойчивое развитие. – 2014. – № 14. – С. 83–91.
8. Махутов, Н. А. Системная концепция обеспечения прочности, ресурса и безопасности оборудования и трубопроводов АЭС / Н. А. Махутов. – М. : МЭИ, 2004. – 55 с.
9. Додолев, С. Г. Диагностирование технических объектов методами неразрушающего контроля : учеб.-метод. пособие / С. Г. Додолев. – Гомель : БелГУТ, 2013. – 40 с.
10. Аркадов, Г. В. Ресурс и надёжность оборудования и трубопроводов АЭС : учеб. пособие / Г. В. Аркадов. – Севастополь : СКУЯЭиП, 2012. – 348 с. : ил.
11. Маловик, К. Н. Контроль качества и надёжности : учеб.-метод. пособие / К. Н. Маловик. – Севастополь : СНИЯЭиП, 2003. – 324 с. : ил.
12. Гетман, А. Ф. Ресурс эксплуатации сосудов и трубопроводов АЭС / А. Ф. Гетман. – М. : Энергоатомиздат, 2000. – 427 с.

Статья сдана в редакцию 14 ноября 2014 года

**Константин Николаевич Маловик**, руководитель Института нанотехнологий информационно-измерительных и специализированных компьютерных систем, Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности. E-mail: konstmalovik@mail.ru.

**Андрей Николаевич Мирошниченко**, аспирант, Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности. E-mail: miron0978@rambler.ru.

**Konstantin Nikolaevich Malovik**, Director of the Institute of Nanotechnology and Specialized Computer Systems, Sevastopol National University of Nuclear Energy and Industry. E-mail: konstmalovik@mail.ru.

**Andrey Nikolaevich Miroshnichenko**, PhD student, Sevastopol National University of Nuclear Energy and Industry. E-mail: miron0978@rambler.ru.