

УДК 519.718.2

РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ АВАРИЙНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА АТОМНОЙ СТАНЦИИ

Т.А. Ефремова, Ю.А. Мефедова

Проведен расчёт вероятности безотказной работы системы аварийного охлаждения при неизменности интенсивности отказов и без учета планово-предупредительных ремонтов. Выполнен уточненный расчет, учитывающий интенсивность отказов вследствие естественного износа элементов системы, а также с учетом восстановления элементов системы в период ремонта. Полученные результаты свидетельствуют о высокой надежности системы.

Ключевые слова: атомные станции; система аварийного охлаждения активной зоны; надежность; вероятность безотказной работы.

АТОМДУК СТАНЦИЯНЫН РЕАКТОРУНУН АКТИВДҮҮ ЗОНАСЫН АВАРИЯЛЫК МУЗДАТУУ СИСТЕМАСЫНЫН БЕКЕМДИГИН ЭСЕПТЕП ЧЫГАРУУ

Авариялык муздатуу системасынын токтоосуз иштөө мүмкүндүгү эсептелип чыкты, мында интенсивдүү токтоп калуу өзгөрүүсүз калган жана алдын ала пландаштырылган оңдоп-түзөө иштерин эске алынбаган. Системанын элементтеринин табигый эскиришинен улам токтоп калуулардын интенсивдүүлүгүн эске алып, ошондой эле ремонт учурунда системанын элементтеринин калыбына келтирилишин эске алуу менен такталган эсептөө жүргүзүлдү. Алынган жыйынтыктар системанын бекемдигин тастыктайт.

Түйүндүү сөздөр: атомдук станциялар; активдүү зонаны авариялык муздатуу системасы; токтоосуз иштөө мүмкүндүгү.

RELIABLE CALCULATION OF THE EMERGENCY COOLING SYSTEM IN THE ACTIVE ZONE OF THE REACTOR OF NUCLEAR POWER STATION

T.A. Efremova, J.A. Mefedova

Reliable calculation of failure-free operation of the emergency cooling system at the same failure rate, and excluding preventive maintenance. It is produced a refined calculation taking into account the growth of the failure rate as a consequence of natural wear and tear of the system components, and also the calculation was made taking into account the restoration of the system elements during the repair period. The results obtained indicate a high reliability of the system.

Keywords: nuclear power plants; core emergency cooling system; reliability; probability of failure-free operation.

Система автоматического охлаждения активной зоны реактора относится к защитным системам безопасности и должна соответствовать ПНАЭ Г-01-011-97 «Общие положения обеспечения безопасности атомных станций», НП 082-07 «Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций», ГОСТ 26291-84 «Надежность атомных станций и их оборудования». Высокая надежность системы аварийного охлаждения

активной зоны (CAOЗ) реактора атомной станции является необходимым критерием его эксплуатации, во избежание аварийных ситуаций. В работе проведен расчет CAOЗ реактора ВВЭР-1000, при этом функционирование системы предусматривается при потреблении электроэнергии с учетом надежного энергоснабжения насосов. Все элементы системы являются равнонадежными, отказ любого из элементов системы приводит к отказу

всей системы. Данные о надежности элементов, входящих в состав САОЗ, основан на обработке статистических эксплуатационных данных о надежности атомных станций, энергоблоков, систем и оборудования по РД 50-204–87. Так как система аварийного охлаждения активной зоны реактора относится к системам безопасности, то все элементы системы выполняются с полным независимым дублированием, следовательно, вероятность отказа уменьшается вдвое, при этом каждая из двух дублированных ветвей включает две независимые пассивные подсистемы. В итоге САОЗ включает 4 независимые пассивные подсистемы и 3 активные подсистемы. В таблице 1 приведена интенсивность отказов элементов САОЗ.

Таблица 1 – Интенсивность отказов элементов САОЗ

Функциональная принадлежность	Вероятность безотказной работы в год
Нормально открытая быстрозапорная задвижка	0,9975
Гидроаккумулятор	0,9995
Обратный клапан	0,995
Теплообменник аварийного расхолаживания	0,999
Насос аварийного расхолаживания	0,99
Спринклерный насос	0,99

Статистическая вероятность повреждения активной зоны составляет $0,9 \cdot 10^{-6}$ в год. В среднем статистическая вероятность необходимости срабатывания САОЗ составляет $1 \cdot 10^{-4}$ в год [1].

Согласно логической схеме для расчета надежности, представленной на рисунке 1, и теории надежности [2], вероятность работоспособного состояния для пассивной подсистемы САОЗ имеет вид

$$P_{\text{псаоз}} = P_{\text{га}} \cdot (1 - (1 - P_{\text{нобз}})^2) \cdot (1 - (1 - P_{\text{ок}})^2), \quad (1)$$

где $P_{\text{га}}$ – вероятность работоспособного состояния гидроаккумулятора; $P_{\text{нобз}}$ – вероятность работоспособного состояния нормально открытой быстрозапорной задвижки; $P_{\text{ок}}$ – вероятность работоспособного состояния обратного клапана.

$$P_{\text{псаоз}} = 0,99947.$$

Вероятность работоспособного состояния для активной подсистемы САОЗ примет вид

$$P_{\text{асаоз}} = P_{\text{тар}} \cdot (1 - (1 - P_{\text{нар}}) \cdot (1 - P_{\text{сн}})), \quad (2)$$

где $P_{\text{тар}}$ – вероятность работоспособного состояния теплообменника аварийного расхолаживания;

$P_{\text{нар}}$ – вероятность работоспособного состояния насоса аварийного расхолаживания; $P_{\text{сн}}$ – вероятность работоспособного состояния спринклерного насоса.

$$P_{\text{асаоз}} = 0,999 \cdot (1 - (1 - 0,99) \cdot (1 - 0,99)) = 0,9989.$$

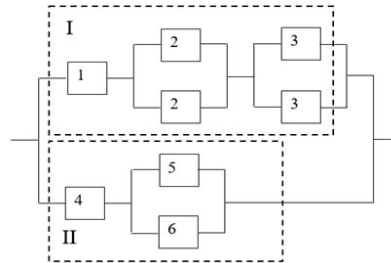


Рисунок 1 – Логическая схема для расчета надежности САОЗ: I – пассивная часть САОЗ; II – активная часть САОЗ; 1 – гидроаккумулятор; 2 – нормально открытая быстрозапорная задвижка; 3 – обратный клапан; 4 – теплообменник аварийного расхолаживания; 5 – насос аварийного расхолаживания; 6 – спринклерный насос

Вероятность работоспособного состояния одной ветви САОЗ

$$P_{\text{саоз1}} = 1 - (1 - P_{\text{псаоз}})^2 \cdot (1 - P_{\text{асаоз}}) = 0,9999999997. \quad (3)$$

Полная вероятность работоспособного состояния САОЗ:

$$P_{\text{саоз}} = 1 - (1 - P_{\text{саоз1}})^2 = 0,9999999999999997. \quad (4)$$

Расчет вероятностей работоспособного состояния производили без учета вероятности работоспособного состояния трубопроводов, для учета трубопроводов вводили поправочный коэффициент

$$P_{\text{саоз}}^* = K_{\text{тр}} \cdot P_{\text{саоз}}, \quad (5)$$

где $K_{\text{тр}}$ – поправочный коэффициент, численно равный вероятности безотказной работы трубопроводов САОЗ.

Согласно [3], вероятность разрыва трубопровода САОЗ составляет $5 \cdot 10^{-5}$ в год. Следовательно, вероятность отказа трубопровода САОЗ в условную единицу времени (1 час) составляет

$$K_{\text{тр}} = P_{\text{тр}} = e^{-\lambda_{\text{тр}} \cdot t} = 0,99999994. \quad (6)$$

Уточненная вероятность работоспособного состояния САОЗ по выражению (5) с учетом трубопровода составит

$$P_{\text{саоз}}^* = 0,99999994 \cdot 0,9999999999999997 = 0,99999994.$$

Интенсивность отказов системы аварийного охлаждения активной зоны реактора в течение условной единицы времени (1 час)

$$\lambda_{CAOЗ} = -\ln(P_{CAOЗ}^*) / t = 10^{-13}. \quad (7)$$

Вероятность работоспособного состояния системы аварийного охлаждения активной зоны реактора в течении топливного цикла (18 месяцев) составит:

$$P_{CAOЗТЦ} = e^{-\lambda_{CAOЗ} \cdot t_{ТЦ}}, \quad (8)$$

где $t_{ТЦ}$ – длительность топливного цикла.

$$P_{CAOЗТЦ} = 0,99993.$$

Вероятность работоспособного состояния системы аварийного охлаждения активной зоны реактора в течение всего срока эксплуатации (30 лет) без учета планово-предупредительного ремонта, составит

$$P_{CAOЗЭ} = e^{-\lambda_{CAOЗ} \cdot t_{СЭ}}, \quad (9)$$

где $t_{СЭ}$ – длительность срока эксплуатации.

$$P_{CAOЗЭ} = 0,99988.$$

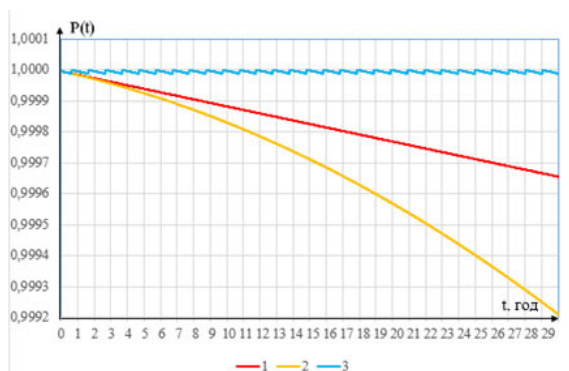


Рисунок 2 – Вероятность безотказной работы CAOЗ с учетом ППР: 1 – вероятность безотказной работы без учета увеличения интенсивности отказов и без учета ППР; 2 – вероятность безотказной работы с учетом увеличения интенсивности отказов и без учета ППР; 3 – вероятность безотказной работы с учетом увеличения интенсивности отказов и с учетом ППР

В процессе работы был проведен расчет вероятности безотказной работы системы аварийного охлаждения активной зоны реактора с учетом восстановления в период планово-предупредительного ремонта (ППР). На рисунке 2 представлена зависимость вероятности безотказной работы CAOЗ с учетом всех трех подходов к расчету.

Для расчета плотности распределения отказов CAOЗ использовали модель Вейбулла, по которой было установлено, что во время эксплуатации в межремонтный период вероятность отказов возрастает на 6,5 % – с 0,00012 до 0,0001278. При этом в период планово-предупредительного ремонта происходит восстановление работоспособности оборудования и систем до номинального уровня, для расчета степень восстановления после ремонта была принята равной 0,99. Проведен анализ возможных отказов элементов системы и их последствий для эффективности работы системы в целом. Результаты анализа показывают, что пассивная часть системы аварийного охлаждения активной зоны реактора по надежности значительно превышает активную часть. Вероятность отказа пассивной части системы за 30 лет не превышает 0,0002. Слабым же местом активной части системы, с точки зрения надежности являются насосы аварийного расхолаживания, однако возможно повышение их надежности проведением регулярного технического обслуживания, текущим и капитальным ремонтом, а также их заменой.

Литература

1. Бахметьев А.М. Исследование и обоснование надежности и безопасности ядерных энергетических установок с использованием вероятностных методов: дис. ... д-ра техн. наук / А.М. Бахметьев. Нижний Новгород, 2006. 275 с.
2. Викторова В.С. Модели и методы расчета надежности технических систем / В.С. Викторова, А.С. Степанянц. М.: Ленанд, 2016. 256 с.
3. Бакланов А.В. Использование вероятностного анализа безопасности при обосновании технических решений ядерной энергетической установки универсального атомного ледокола / А.В. Бакланов, С.П. Линьков, А.Г. Маркелов, Ю.В. Соболева. URL: <http://www.gidropress.podolsk.ru/> (дата обращения 29.11.2018).