

СОКРАЩЕНИЕ ДЛИТЕЛЬНОСТИ РЕМОНТОВ ЭНЕРГБЛОКОВ АЭС С ВВЭР ЗА СЧЕТ ОПТИМИЗАЦИИ ПЛАНИРОВАНИЯ РЕМОНТОВ И ИСПЫТАНИЙ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ

Ю. Л. Коврижкин¹, В. И. Скалозубов²

¹НАЭК «Энергоатом», Киев

²Одесский филиал ГП «Государственный научно-технический центр по ядерной
и радиационной безопасности»

Рассмотрены методы и результаты обоснований по сокращению плановых ремонтов и испытаний тепломеханического оборудования систем безопасности серийных энергоблоков с ВВЭР-1000.

Общие положения и актуальность вопроса

Продолжительность планово-предупредительных ремонтов (ППР) определяется совокупностью отдельных работ на критическом пути ремонтов. Под критическим путем обычно подразумевается условная последовательность отдельных работ/операций, ограничивающая общие сроки проведения ремонта. Критический путь зависит от вида ремонта, от объемов конкретных этапов и последовательностей их реализации при ремонте, от уровня организации, технического оснащения качества планирования и фактического выполнения графиков ремонта. При этом следует учитывать, что изменение в продолжительности отдельных работ, входящих в критический путь, может изменить как состав, так и последовательность критических путей.

Таким образом, продолжительность ремонтов энергоблоков можно оценить соотношением

$$T_{ППР} = \sum_i t_{ki} \quad (1)$$

где t_{ki} – продолжительность i -го вида работ на критическом пути. Предельно минимальные значения продолжительности этих работ на критических путях ремонтов ($\lim t_{ki}$) при обеспечении приемлемого уровня безопасности определяют величину допустимого КИУМ ($\sum \lim t_{ki}$). Характерными примерами факторов, определяющих $\lim t_{ki}$, могут быть регламентное время начала разборки реактора для перегрузки топлива после его останова, скорость перемещения кассет в процессе перегрузки топлива, допустимое время работы ремонтного персонала в реакторном цехе и т.п.

С учетом вышеизложенного условия для оптимальной продолжительности ремонтов энергоблоков

$$КИУМ(T_{ППР}^{opt}) = КИУМ\left(\sum_i \lim t_{ki}\right) \quad T_{ППР}^{opt} = \sum_i \lim t_{ki} \quad (2)$$

Условие (2) означает, что оптимальная продолжительность плановых ремонтов определяется суммой допустимых (предельных) с позиций принципа обеспечения приемлемого уровня безопасности сроков проведения отдельных работ технического обслуживания и ремонта (ТОиР) на критическом пути.

В качестве критерия значимости работы для сокращения срока ремонта может быть использована частота нахождения работы на критическом пути, позволяющая оценить приоритетные работы, по которым следует добиваться сокращения сроков их выполнения в первую очередь. Значения частот нахождения укрупненных видов ремонтных работ для реакторной установки (РУ) и вспомогательного оборудования на критическом пути средних и капитальных ППР на основе эксплуатационной статистики АЭС Украины с ВВЭР-1000 за более чем 50 реакторо-лет приведены в таблице.

**Доля отдельных укрупненных работ на критических путях средних
и капитальных ремонтов**

Вид работ	Вид ремонта	
	средний	капиталь- ный
Работы на реакторной установке (Р), %	63	70
Работы в бассейне выдержки (БВ), %	9	13
Работы с оборудованием первого контура (1К), %	9	7
Работы с главным циркуляционным насосом (ГЦН), %	2	2
Работы по ремонту систем безопасности (СБ), %	4	3
Работы по ремонту автоматической системы управления (АСУ), %	2	-
Работы на парогенераторе (ПГ), %	11	5
Всего	100	100

На основе статистических данных по опыту эксплуатации для средних и капитальных ППР ВВЭР-1000 в приведены средние резервы времени Δt_i по сокращению отдельных видов работ на критическом пути ремонта

$$\Delta t_i = \frac{\sum_{j=1}^n t_i}{n} - \min t_i, \quad (3)$$

где t_i – продолжительность i -й работы в отдельном ППР; n – число проведенных ППР; $\min t_i$ – минимальное время (по опыту эксплуатации), необходимое для проведения i -й работы.

Проведенный в [1 - 3] анализ опыта и статистики проведения работ по ремонту и техническому обслуживанию определил значительные резервы по сокращению их продолжительности на критическом пути работ по РУ, ПГ, ГЦН и БВ. Эти резервы и указанные подходы сокращения продолжительности ППР были учтены при разработке новых отраслевых норм продолжительности среднего и капитального ремонта энергоблоков АЭС [4, 5]. В конечном итоге внедрение этих норм позволило сократить до 30 - 40 % продолжительность ППР по сравнению с ранее действующими сроками и достигнуть значительного экономического эффекта при обеспечении необходимого уровня безопасности.

Вместе с тем сокращение общей продолжительности ППР за счет оптимизации сроков ремонтных работ на реакторе, ПГ, оборудовании 1К и других увеличило значимость работ по ремонту СБ в общей доле работ на критических путях ППР. Поэтому актуальным является вопрос сокращения продолжительности плановых ремонтов и испытаний СБ в процессе ППР.

В настоящей работе приведены применения разработанных ранее вероятностных методов обоснованного сокращения плановых ремонтов и испытаний СБ для серийных энергоблоков с ВВЭР-1000.

Расчетные обоснования

В рамках риск-ориентированного подхода для оптимизации стратегии планового ремонта и испытаний СБ принимается целевая функция риска R [1, 3]:

$$R = R(K_{нз}, Y_i), \quad (4)$$

где Y_i – вероятностные показатели удельного вклада i -й системы в оценку критериев безопасности энергоблоков; $K_{нз}$ – суммарный за рассматриваемый период t коэффициент неготовности выполнения назначенных проектом функций безопасности:

$$K_{нз} = \int_0^t P(\tau) d\tau. \quad (5)$$

Приведенный (средний) коэффициент неготовности за период t

$$\bar{K}_{нз} = \frac{1}{t} \int_0^t P(\tau) d\tau, \quad (6)$$

где $P(\tau)$ – вероятность отказа системы в текущий момент τ .

Критериями оптимизации стратегии планового ремонта и испытаний СБ являются:

$$R \rightarrow \min R(K_{нз}, Y_i) \text{ – критерий максимальной надежности;} \quad (7)$$

$$R \leq R^{пр} \text{ – проектный критерий,} \quad (8)$$

где $R^{пр}$ – условная вероятность риска при проектной стратегии планового ремонта и испытаний.

Для независимых (при испытаниях) СБ минимизация целевой функции риска сводится к оценке условий, соответствующих минимуму $K_{нз}$. Оптимизируемый коэффициент неготовности $K_{нз}$ определяется:

структурой и составом системы;

показателями надежности элементов систем/оборудования как связанными с качеством проведения самих испытаний/ремонтов, так и не связанными с их проведением (в режиме ожидания);

периодичностью проведения испытаний СБ;

длительностью (объемами) проводимых работ при испытаниях и ремонте (восстановлении).

Проектным критерием применимости стратегий планирования ремонтов и испытаний являются условия сохранения надежности по отношению к проектной стратегии ТООР:

$$K_{нз}(t_0^{don}, t_p) \leq K_{нз}^{пр}(t_{0p}, t_p^{don}), \quad (9)$$

где $K_{нз}^{пр}$ суммарный за межремонтный и ремонтный периоды коэффициент неготовности по предельной проектной модели СБ при проектной (регламентной) длительности режима ожидания t_{0p} и проектном допустимом времени вывода канала в неработоспособное состояние при работе реактора на мощности t_p^{don} ; $K_{нз}$ – суммарный коэффициент неготовности за межремонтный и ремонтный периоды при допустимом периоде режима ожидания t_0^{don} и фактическом времени неработоспособности канала СБ при работе реактора на мощности t_p (по опыту эксплуатации).

Целевой функцией риска R для внедрения каждой из непроектных стратегий планового ремонта независимых СБ является вероятность сохранения надежности по отношению к проектным условиям:

$$R = K_{нз}(t_0, t_p) - K_{нз}^{пр}(t_{0p}, t_p^{don}). \quad (10)$$

При $R < 0$ непроектная стратегия планового ремонта и испытаний СБ является приемлемой. При $R \geq 0$ – неприемлема.

Оптимизируемым параметром является время ожидания между испытаниями двух каналов t_0 .

Условием приемлемости непроектных стратегий планового ремонта и испытаний является

$$R(t_0 < t_0^{don}) < 0, R(t_0^{don}) = 0. \quad (11)$$

Критерием максимальной надежности для рассматриваемых систем являются условия, соответствующие

$$\frac{dR}{dt_0}(t_0 = t_{opt}) = 0, \quad \frac{d^2R}{dt_0^2}(t_0 = t_{opt}) > 0, \quad (12)$$

где t_{opt} – оптимальная периодичность испытаний каналов СБ при работе реактора на мощности.

Разработанная авторами в [2] модель непроектной стратегии планового ремонта 1-го канала из трех каналов СБ определяет условия оптимизации

$$R = K_{HG}(t_0, t_p) - K_{HG}(t_{op}, t_p^{don}) + K_{HG}^{ППР2}(t_0, t_p) - K_{HG}^{ППР0}(t_{op}, t_p^{don}), \quad (13)$$

где $K_{HG}(t_0, t_p)$; $K_{HG}(t_0, t_p^{don})$ – соответственно коэффициенты неготовности системы при работе реактора на мощности при непроектных интервалах испытаний t_0 , времени ремонта системы t_p и регламентных значениях t_{op} , t_p^{don} ; $K_{HG}^{ППР0}$ – коэффициент неготовности системы в процессе ППР при проектной стратегии. Суммарный коэффициент неготовности за время ППР [2]:

$$\begin{aligned} K_{HG}^{ППР2} = & \int_0^{\tau_1} [P_0 + P(\lambda, t)]^2 dt + \int_0^{\tau_{n1}} [P(\xi, \tau_1) + P(\lambda_{n1}, t)][P_0 + P(\lambda, \tau_1) + P(\lambda, t)]^2 dt + \\ & + \int_0^{\tau_{n2}} [P(\xi, t_{n1}) + P(\lambda, t)][P_0 + P(\lambda, \tau_1) + P(\lambda, t_{n1}) + P(\lambda, t)][P_0 + P(\lambda, \tau_1) + P(\lambda, t_{n1}) + P(\lambda, t)] dt + \\ & + \int_0^{\tau_{n3}} [P(\xi, t_{n1}) + P(\lambda, t_{n2}) + P(\lambda, t)][P(\xi, t_{n2}) + P(\lambda, t)][P_0 + P(\lambda, \tau_1) + P(\lambda, t_{n1}) + P(\lambda, t_{n2}) + P(\lambda_{n1}, t)] dt + \\ & + \int_0^{\tau_2 + \tau_3} [P(\xi, t_{n1}) + P(\lambda, t_{n2}) + P(\lambda, t_{n3}) + P(\lambda, t)][P(\xi, t_{n2}) + P(\lambda, t_{n3}) + P(\lambda, t)][P(\xi, t_{n3}) + P(\lambda, t)] dt \end{aligned} \quad (14)$$

где λ, λ_{n1} – интенсивность потока отказов в режимах ожидания и испытаний соответственно; ξ – интенсивность потока отказов, вызванных качеством технического обслуживания и ремонта.

Результаты расчетов допустимых значений периодов ожидания t_p^{don} для непроектной стратегии без испытаний неремонтируемых каналов при различной надежности оборудования ($\lambda = 10^{-7} \dots 10^{-3}$ 1/ч) приведены на рис. 1 и 2. Согласно полученным результатам при $t_0 \geq t_{op}$ определяющее влияние на допустимый период ожидания оказывает изменение условий проведения планового ремонта каналов СБ. В принятой стратегии за период ППР два канала находятся в режиме оперативной готовности и вероятность их отказа непрерывно увеличивается пропорционально интенсивности потока отказов для оборудования СБ (λ). Поэтому увеличение надежности оборудования (уменьшение λ) приводит к увеличению допустимого значения периода ожидания. Так, при $\lambda < 10^{-3}$ 1/ч, $t_p^{don} > 240$ ч.

При уменьшении времени $\tau_{ппр}$ (или промежутка времени, на котором необходима работоспособность не менее двух каналов СБ в процессе ППР) влияния надежности оборудования имеют другую тенденцию (см. рис. 2). В этом случае определяющим фактором при $t_0 \geq t_{op}$ является "запас" по надежности, вызванный сокращением времени unplanned ремонтов каналов СБ при работе реактора на мощности t_p по отношению к допустимым значениям по проекту ($t_p^{don} = 72$ ч). "Запас" по надежности в отношении проектных условий пропорционален $\lambda(t_p - t_p^{don})$. Поэтому для ситуаций с сокращенными сроками $\tau_{ппр}$ (или необходимого времени работоспособности неремонтируемых каналов) увеличение надежности оборудования при прочих равных условиях приводит к сокращению допустимых значений периода ожидания t_p^{don} , но не менее 240 ч (см. рис. 2).

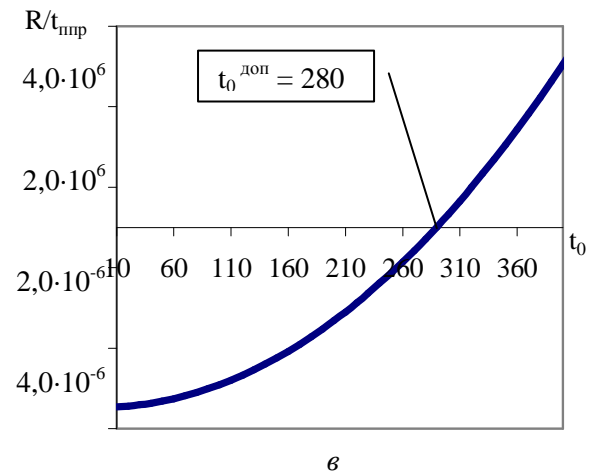
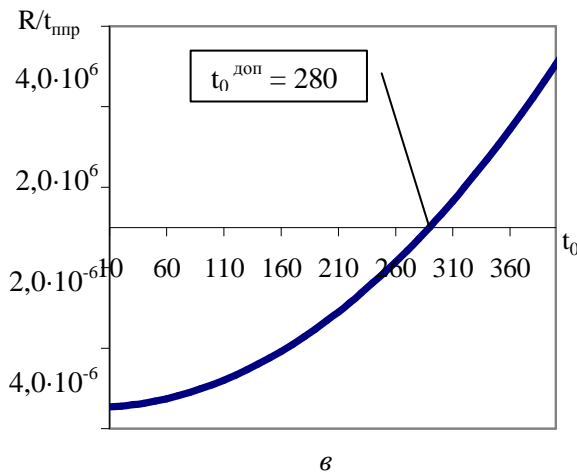
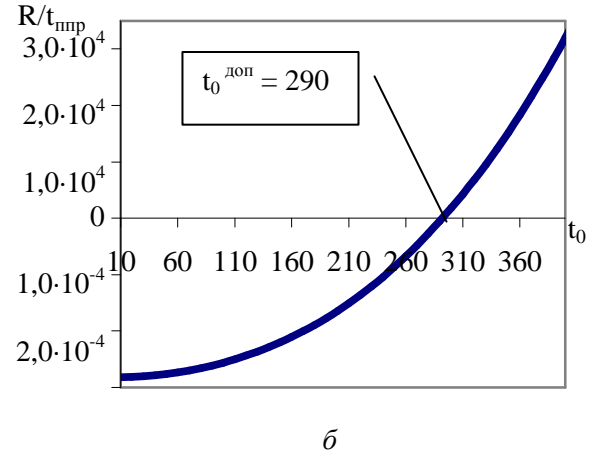
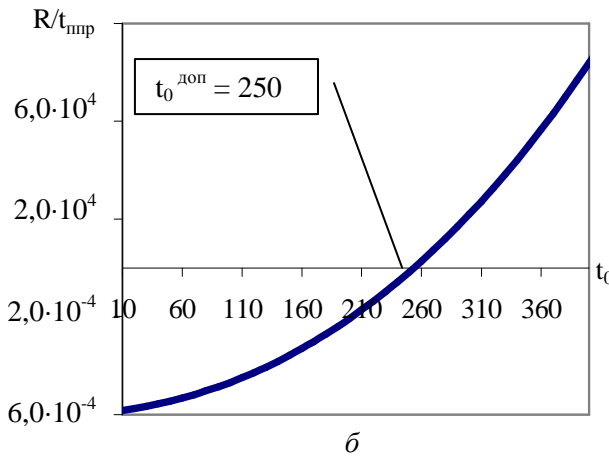
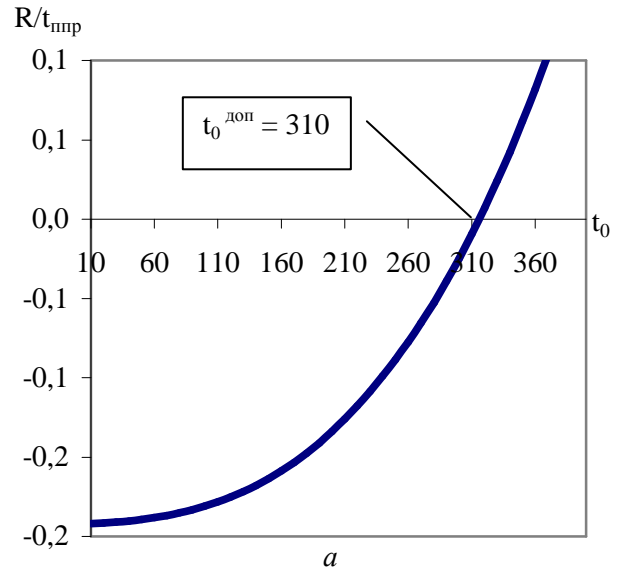
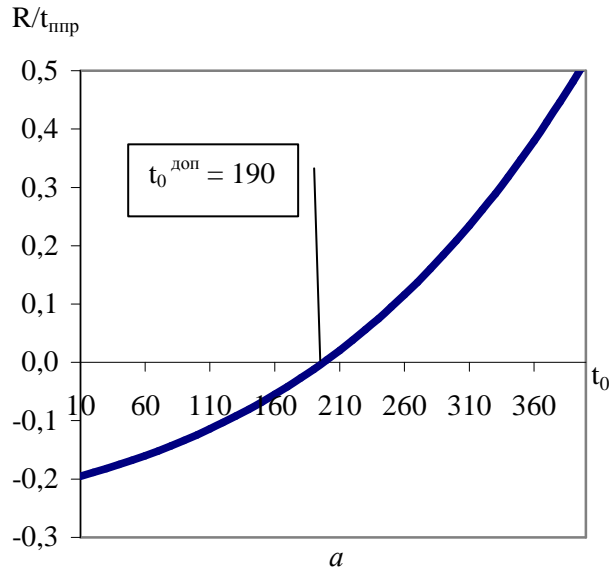


Рис. 1. Расчетные оценки допустимого времени периода ожидания $t_p^{\text{доп}}$ при $\tau_{\text{нпр}} = 1440$ ч без испытаний неремонтируемых каналов:
 а - $\lambda = 10^{-3}$ 1/ч; б - $\lambda = 10^{-4}$ 1/ч; в - $\lambda = 10^{-5}$ 1/ч.

Рис. 2. Расчетные оценки допустимого времени периода ожидания $t_p^{\text{доп}}$ при $\tau_{\text{нпр}} = 480$ ч без испытаний неремонтируемых каналов:
 а - $\lambda = 10^{-3}$ 1/ч; б - $\lambda = 10^{-4}$ 1/ч; в - $\lambda = 10^{-5}$ 1/ч.

Результаты расчетов допустимого периода ожидания t_p^{don} для случая обязательного испытания двух неремонтируемых каналов при различных показателях надежности оборудования ($\lambda = 10^{-6} \dots 10^{-3}$ 1/ч) показали, что в этом случае при больших значениях $\tau_{ппр}$ согласно полученным результатам также определяющим фактором t_p^{don} является влияние изменения проектной стратегии планового ремонта СБ в процессе ППР. Однако проведение испытаний в процессе ППР неремонтируемых каналов приводит к общему повышению надежности системы в процессе ППР (по отношению к предыдущему случаю), что в конечном итоге расширяет допустимый диапазон t_p^{don} . Так, для всех рассматриваемых значений надежности оборудования значения $t_p^{don} = 320 - 380$ ч, и с увеличением надежности оборудования (уменьшение λ) значения допустимого периода ожидания плановых испытаний канала СБ при работе реактора на мощности увеличивается.

Уменьшение времени ремонта $\tau_{ппр}$ (или времени необходимой работоспособности неремонтируемых в процессе ППР) также приводит к изменению тенденции влияния надежности оборудования на t_p^{don} , которое определяется влиянием "запаса по надежности", вызванное сокращением времени ремонта канала СБ на мощности t_p по отношению к допустимому проектом значению t_p^{don} .

В результате проведенного статистического анализа показателей надежности тепло-механического оборудования активной части САОЗ ВВЭР-1000/320 (на основе эксплуатационных данных) установлено, что показатели надежности канала СБ определяется главным образом показателями надежности насосного оборудования. При этом интенсивности потока отказов не превышают значений 10^{-4} 1/ч, а время восстановления/ремонта при обнаруженных отказах/повреждениях не превышает 48 ч. Поэтому результаты расчетных обоснований оптимизации периодичности и объемов ППР СБ, приведенные выше, обоснованы для рассматриваемых систем активной части САОЗ ВВЭР-1000/320.

Полученные результаты технических и расчетных обоснований позволяют сформулировать основные положения концептуального технического решения об изменении эксплуатационной практики планового ремонта каналов активной части САОЗ энергоблоков с ВВЭР-1000/320:

1. В год капитального ремонта энергоблока ВВЭР-1000/320 плановый ремонт, контроль и техническое обслуживание в полном объеме, предусмотренном эксплуатационной и заводской документацией, а также техническое освидетельствование, капитальный ремонт и ресурсное обследование оборудования проходят все каналы СБ, планово испытываемые при работе реактора на мощности.

2. В последующие средние ремонты энергоблока ВВЭР-1000/320 в полном объеме плановый ремонт, контроль и техническое обслуживание последовательно проходит только один из трех каналов СБ. В случае необходимости для неремонтируемых каналов в средний ремонт проводятся работы по восстановлению теплообменной поверхности теплообменников аварийного расхолаживания (ТОАР), метрологической аттестации средств измерения, контролю металла и ресурсному обследованию средств автоматики и электрооборудования (ремонт канала в неполном объеме).

3. Ограничением применения стратегии планового ремонта одного из трех каналов в средние ремонты энергоблока является выполнение любого из следующих условий:

отказ канала в результате предпусковых испытаний СБ;
превышение 48 ч неработоспособности канала СБ по причине непланового ремонта при работе реактора на мощности;

превышение значения вероятностного показателя интенсивности потока отказов канала СБ более 10^{-4} 1/ч.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Коврижкин Ю.Л., Комаров Ю.А., Пышный В.М. и др.* Оптимизация плановых ремонтов и испытаний систем, важных для безопасности АЭС, на основе риск-ориентированных подходов. – Одесса: Изд-во «ТЭС», 2006. – 468 с.
2. *Коврижкин Ю.Л., Габляя Т.В., Драган Г.С., Скалозубов В.И.* Методика переназначения периодичности и объема плановых ремонтов и испытаний тепломеханического оборудования систем безопасности ВВЭР 1000 (В-320) // *Ядерная и радиационная безопасность.* - 2005. - № 2. - С. 29 - 36.
3. *Билей Д.В., Васильченко В.Н., Власенко Н.И., Скалозубов В.И.* Основы оптимизации плановых ремонтов и испытаний систем безопасности для повышения эффективности производства // *Ядерная и радиационная безопасность.* - 2004. - № 1. - С. 90 - 96.
4. *Типовые* графики ремонтов энергоблоков АЭС с ВВЭР 1000 // *СТП НАЭК «Энергоатом».* - 2004.
5. *Типовые* графики ремонтов энергоблоков АЭС с ВВЭР 440 // *СТП НАЭК «Энергоатом».* - 2004.

Поступила в редакцию 03. 07. 06

27 СКОРОЧЕННЯ ТРИВАЛОСТІ РЕМОНТІВ ЕНЕРГОБЛОКІВ АЕС ІЗ ВВЕР ЗА РАХУНОК ОПТИМІЗАЦІЇ ПЛАНУВАННЯ РЕМОНТІВ ТА ІСПИТІВ СИСТЕМ БЕЗПЕКИ

Ю. Л. Коврижкін, В. І. Скалозубов

Розглянуто методи й результати обґрунтувань по скороченню планових ремонтів і випробувань тепломеханічного устаткування систем безпеки серійних енергоблоків із ВВЕР-1000.

27 REDUCTION OF REPAIR TIME OF NPP POWER UNITS WITH VVER BY OPTIMIZATION OF PLANNING REPAIRS AND TESTS OF SAFETY SYSTEMS

Yu. L. Kovrizhkin, V. I. Skalozubov

The paper considers methods and results of substantiations on reduction of scheduled repairs and tests the heat-mechanic equipment of safety systems of serial power units with VVER-1000.

Уважаемые авторы! Пожалуйста, внимательно вычитайте текст, обратите внимание на фразы, выделенные жирным шрифтом, внесите исправления и верните обратно, дав добро на публикацию.

Редакция