

# Повышение экономической эффективности эксплуатации энергоблоков атомных станций с учетом обеспечения безопасности

**А.В. Антонов**, декан факультета кибернетики, д-р техн. наук, профессор <sup>1</sup>

**Г.А. Ершов**, главный инженер проекта, д-р техн. наук, профессор <sup>2</sup>

**О.И. Морозова**, аспирант <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Обнинский институт атомной энергетики – филиал Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

<sup>2</sup> ОАО «Головной институт ВНИПИЭТ» «Санкт-Петербургский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт»

**e-mail:** antonov@iate.obninsk.ru, g\_ershov@bgip3.spbaep.ru, OIMorozova@yandex.ru

## Ключевые слова:

энергоблок,  
атомная станция,  
безопасность,  
экономическая эффективность,  
эксплуатация.

*К энергоблокам атомных станций предъявляются высокие требования по экономической эффективности их эксплуатации. Очевидным способом повышения экономической эффективности их эксплуатации является увеличение объема вырабатываемой на них электроэнергии. Описан метод повышения экономической эффективности эксплуатации энергоблоков атомных станций путем сокращения срока их простоя при плановом техническом обслуживании и ремонте оборудования. Отличительная черта представленного метода в том, что повышение экономической эффективности эксплуатации энергоблоков атомных станций предлагается осуществлять с точки зрения обеспечения требуемого уровня их безопасности, так как обеспечение безопасности является приоритетной задачей.*

## 1. Введение в проблему

Каждый энергоблок атомной станции (ЭБ АС) — это элемент топливно-энергетического комплекса, основной задачей которого является выработка электроэнергии. Доля «атомной» электроэнергии в топливно-энергетическом комплексе зависит от уровня экономической эффективности эксплуатации ЭБ АС.

Уровень экономической эффективности эксплуатации ЭБ АС оценивается различными коэффициентами [1], среди которых наибольшее распространение получил коэффициент использования установленной мощности (КИУМ). КИУМ учитывает отношение фактически выработанной электроэнергии на ЭБ АС за отчетный период к электроэнергии, которую ЭБ АС мог бы выработать в условиях непрерывной работы на номинальном уровне мощности:

$$\text{КИУМ} = \frac{E}{N_y \times T_{\text{пер}}} \times 100\%, \quad (1)$$

где:  $E$  — фактическая выработка электроэнергии на ЭБ АС за отчетный период, МВт·ч;  $N_y$  — номинальная

электрическая мощность ЭБ АС, МВт;  $T_{\text{пер}}$  — продолжительность отчетного периода, ч.

Величина КИУМ напрямую зависит от технических и технологических решений, реализованных в проекте ЭБ АС, особенностей проведения планового и внепланового технического обслуживания и ремонта (ТОиР) оборудования ЭБ АС, числа нарушений в работе ЭБ АС (ошибочные действия персонала и/или дефекты/отказы оборудования), внешних факторов, объективно влияющих на условия работы ЭБ АС (например, специальные испытания, выполняемые в целях проверки опыта эксплуатации других ЭБ АС) [1].

Любой ЭБ АС — это опасный производственный объект, наличие которого в топливно-энергетическом комплексе определяется общественным мнением о приемлемости уровня безопасности ЭБ АС. Дело в том, что по мнению широкой общественности, эксплуатация ЭБ АС связана не с выработкой электрической энергии, относительно дешевой по сравнению с использованием традиционных энергоресурсов, а с тяжестью биологического ущерба, наступающего

вследствие возможных аварий, сопровождающихся выходом радиоактивных веществ в окружающую среду [2, 3]. В конечном счете, именно безопасность ЭБ АС, а не экономическая эффективность их эксплуатации представляет наибольший интерес для широкой общественности. Поэтому наличие ЭБ АС в топливно-энергетическом комплексе во многом зависит от приемлемости уровня безопасности ЭБ АС. Следовательно, конкурентоспособность ЭБ АС на рынке производства электрической энергии в равной мере определяется как экономической эффективностью эксплуатации ЭБ АС, так и уровнем безопасности.

## 2. Повышение экономической эффективности эксплуатации ЭБ АС

На практике наибольший вклад в снижение КИУМ вносят остановки ЭБ АС на проведение планового ТОиР оборудования, особенно на проведение планово-предупредительного ремонта (ППР) [4, 5]. Следовательно, очевидным способом повышения экономической эффективности эксплуатации ЭБ АС (соответственно, повышения КИУМ) является сокращение времени их простоя в плановом ТОиР (ППР).

Сократить времена простоя ЭБ АС можно путем уменьшения срока проведения планового ТОиР (ППР). Это можно осуществить посредством вывода в параллельные ТОиР (ППР) большего числа оборудования по сравнению с действующей стратегией проведения планового ремонта. Например, можно одновременно вывести в плановый ТОиР (ППР) либо сразу несколько каналов безопасности какой-либо системы, либо часть оборудования одного канала данной системы и часть оборудования другого канала той же системы.

Рассматривая возможность повышения экономической эффективности эксплуатации ЭБ АС за счет сокращения времени простоя ЭБ АС в плановом ТОиР (ППР), необходимо уделять особое внимание безопасности энергоблоков.

## 3. Влияние планового ТОиР (ППР) оборудования на безопасность ЭБ АС

Основная цель проведения планового (как и внепланового) ТОиР заключается в поддержании заданного уровня надежности систем безопасности ЭБ АС, чтобы в необходимый момент времени требуемая система (оборудование) находилась в работоспособном состоянии и выполнила поставленную задачу (функцию). Это достигается путем выявления и устранения возникающего отказа оборудования ЭБ АС [3, 6, 7].

Периодический контроль работоспособности оборудования ЭБ АС производится через определенные промежутки времени. Периодический контроль выполняется как при функционировании ЭБ АС на

мощности, так и во время проведения ППР. Периодический контроль работоспособности реализуется путем перевода проверяемого оборудования из режима ожидания в режимы работы. Например, запускаются насосы, закрывается или открывается арматура, инициируется срабатывание элементов управляющих систем и др.

Как правило, для предотвращения срабатывания систем безопасности во время периодической проверки работоспособности оборудования выполняются специальные мероприятия, которые исключают функционирование проверяемых систем безопасности по их прямому назначению. В подобных ситуациях проверяемое оборудование переводится в неработоспособное состояние (из эксплуатации выводится, например, весь канал безопасности, к которому относится проверяемое оборудование). Как следствие, в период проверки снижается кратность резервирования оборудования проверяемой системы безопасности. В результате подобные манипуляции ведут к ухудшению показателей надежности проверяемой системы безопасности и, соответственно, к снижению безопасности ЭБ АС в целом [3, 6, 7].

Важнейшим видом планового ТОиР ЭБ АС является ППР. Как правило, проведение ППР совмещается с проведением перегрузки (частичной или полной) активной зоны реактора, что обуславливает особые режимы функционирования АС. Например, на ЭБ АС с реактором типа ВВЭР работы по перегрузке активной зоны ведутся на разуплотненном первом контуре, то есть в условиях отсутствия третьего физического барьера безопасности. Возрастает вероятность снижения концентрации бора в теплоносителе первого контура и вероятность ошибок персонала при обращении с отработавшим и новым ядерным топливом (ЯТ). В этих условиях особое внимание уделяется контролю и обеспечению подкритичности ЭБ АС (первой фундаментальной функции безопасности), а также выполнению производимых работ в соответствии с правилами ядерной и радиационной безопасности.

Проводимые во время ППР разнообразные работы на оборудовании ЭБ АС, а также выполняемые технические и технологические операции на контурах охлаждения ЭБ АС могут привести к потере охлаждения ЯТ. По этой причине при проведении ППР и изменении состояния систем теплоотвода от ЯТ постоянно контролируется и обеспечивается вторая фундаментальная функция безопасности — охлаждение ЯТ. Кроме того, при проведении ППР открываются шлюзы и разуплотняется герметичное ограждение ЭБ АС (четвертый барьер безопасности), что ведет к возрастанию важности обеспечения третьей фундаментальной функции безопасности —

локализации и удержанию радиоактивных веществ [3, 7, 8]. Иными словами, проведение ППР, особенно совмещаемого с перегрузкой активной зоны реактора (частичной или полной), представляет собой одно из самых ядерно-опасных состояний ЭБ АС.

Можно заключить, что в общем случае плановые ТОиР (ППР) оборудования оказывают своего рода «двойное» влияние на безопасность ЭБ АС. С одной стороны, плановые ТОиР (ППР) имеют своей целью обеспечить безопасность ЭБ АС в любой момент времени. С другой стороны, плановые ТОиР оборудования, особенно ППР, уже сами по себе влияют на уровень безопасности ЭБ АС, так как их проведение связано со снижением кратности резервирования систем безопасности ЭБ АС, с изменением числа блокировок и защит и т.д.

Учитывая вышесказанное, становится очевидным, что по сравнению с проведением планового ТОиР (ППР) в соответствии с действующими стратегиями, проведение планового ТОиР (ППР), направленного на повышение экономической эффективности эксплуатации ЭБ АС, еще больше снижает уровень безопасности ЭБ АС. Это происходит потому, что проведение планового ТОиР (ППР), направленного на повышение экономической эффективности эксплуатации ЭБ АС, «провоцирует» дополнительное снижение кратности резервирования оборудования ЭБ АС.

#### 4. Оценка приемлемости уровня безопасности ЭБ АС

Оценка уровня безопасности ЭБ АС основана на сравнении фактических значений вероятностных показателей безопасности (ВПБ) анализируемого ЭБ АС с установленными в нормативных документах целевыми значениями ВПБ [9]. Подробнее о методах оценки уровня безопасности ЭБ АС см. в [3, 7, 10, 11, 12, 13]. Уровень безопасности ЭБ АС оценивается как приемлемый, если фактические значения ВПБ ЭБ АС не превышают установленные целевые значения [7, 9].

Следует отметить, что целевые значения ВПБ [9] обязательны к применению для ЭБ АС, проекты которых разрабатываются после ввода в действие документа [9] (так называемые «новые» ЭБ АС). Аналогичные целевые значения ВПБ для действующих ЭБ АС, проекты которых были разработаны до введения в действие документа [9] (так называемые «старые» ЭБ АС), в нормативных документах отсутствуют. На практике это означает, что при эксплуатации «новых» ЭБ АС необходимо стремиться к тому, чтобы фактические значения ВПБ соответствовали требованиям [9] или были лучше, а при эксплуатации «старых» ЭБ АС — чтобы фактические значения ВПБ были как можно ближе к установленным целевым значениям.

#### 5. Метод повышения экономической эффективности эксплуатации ЭБ АС

Действующие стратегии проведения планового ТОиР (ППР) оборудования ЭБ АС хорошо выверены с точки зрения как периодичности и объема выполняемых работ, так и последовательности производимых технических и технологических операций [3, 7]. Учитывая это, вносить изменения в действующие стратегии проведения плановых ТОиР (ППР) с целью сократить время простоя ЭБ АС в плановом ТОиР (ППР) предлагается «по безопасности», а не «по технологии», так как технология проведения планового ТОиР (ППР) представляет собой чисто инженерную задачу, как правило, связанную с применением новых методик, способов, подходов и т.п.

Необходимо подчеркнуть, что реализация предлагаемого метода повышения экономической эффективности ЭБ АС (далее — метод) подразумевает отступление от требований технологического регламента в части кратности резервирования оборудования во время проведения планового ТОиР (ППР). А это приводит к снижению надежности рассматриваемой системы при выполнении заданных функций, о чем было сказано выше.

Оценка приемлемости изменений в уровне безопасности ЭБ АС, связанных с выводом в плановый ТОиР (ППР) дополнительного оборудования, может осуществляться по значению фактора повышения риска  $RIF$  (*Risk Increase Factor*). Этот фактор представляет собой отношение результатов расчета ВПБ ЭБ АС при реализации предлагаемого метода и результатов их расчета при проведении ТОиР (ППР) в соответствии с действующими стратегиями:

$$RIF_i = ВПБ_i / ВПБ_0 \quad (2)$$

где:  $ВПБ_i$  — ВПБ ЭБ АС при выводе в ТОиР (ППР) дополнительного оборудования;  $ВПБ_0$  — ВПБ ЭБ АС при реализации действующих стратегий проведения ТОиР (ППР).

Формула (2) позволяет учитывать фактическое состояние оборудования ЭБ АС (например, нахождение оборудования в работе, в резерве, в режиме испытаний, в ремонте или на техобслуживании) [3, 6, 7]. Значения фактора  $RIF$  меняются во времени в зависимости от конкретных конфигураций ЭБ АС (конфигурация — взаимное расположение каких-либо объектов, соотношение отдельных частей сложного объекта [14]).

В табл. 1 представлены критерии значений фактора  $RIF$ , по которым производится оценка приемлемости изменений в уровне безопасности ЭБ АС при реализации предлагаемого метода. Следует отметить, что представленные диапазоны значе-

Таблица 1.

Зависимость уровня безопасности «старых» и «новых» ЭБ АС от диапазона значений  $RIF$  при проведении ТОиР (ППР) оборудования

Диапазон значений $RIF$		Уровень безопасности
для «старых» ЭБ АС	для «новых» ЭБ АС	
$RIF \geq \frac{10^{-3}}{ВПБ_6}$	$RIF \geq \frac{10^{-4}}{ВПБ_6}$	Неприемлемо низкий уровень безопасности
$\frac{10^{-4}}{ВПБ_6} < RIF < \frac{10^{-3}}{ВПБ_6}$	$\frac{10^{-5}}{ВПБ_6} < RIF < \frac{10^{-4}}{ВПБ_6}$	Приемлемо низкий уровень безопасности
$RIF \leq \frac{10^{-4}}{ВПБ_6}$	$RIF \leq \frac{10^{-5}}{ВПБ_6}$	Приемлемый уровень безопасности

ний  $RIF$ , во-первых, разработаны как для «старых», так и для «новых» ЭБ АС, а во-вторых, приемлемы с точки зрения рекомендуемых в международной практике критериев оценки уровня безопасности ЭБ АС [10, 11].

Для оценки изменений в уровне безопасности ЭБ АС при реализации предлагаемого метода необходимо использовать логико-вероятностную модель ЭБ АС. Данная модель представляет собой взаимосвязанную совокупность математических моделей аварийных последовательностей, систем, элементов, действий персонала, а также баз данных с вероятностными характеристиками иницирующих событий, надежности элементов, систем, отказов общего вида, надежности персонала и других исходных данных, необходимыми для оценки ВПБ ЭБ АС [15]. В логико-вероятностной модели ЭБ АС необходимо изменить параметр «время» проверяемого оборудования ЭБ АС. Параметр «время» — это длительность периода, в течение которого:

- производится контроль или восстановление работоспособности проверяемого оборудования ЭБ АС;
- снижается кратность резервирования проверяемого оборудования, так как данное оборудование выводится из эксплуатации.

Параметр «время» входит в показатель безопасности выведенного в ТОиР (ППР) оборудования.

Для примера рассмотрим экспоненциальный закон распределения времени безотказной работы и времени восстановления оборудования:

$$F(t) = f(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1 - e^{-\lambda t}, & t \geq 0 \end{cases}, \quad (3)$$

где  $t$  — параметр «время», ч.

Очевидно, что при экспоненциальном законе распределения, чем больше время  $t$ , тем хуже ВПБ

ЭБ АС (выше частота повреждения ЯТ), и наоборот, чем меньше время  $t$ , тем лучше ВПБ ЭБ АС (меньше частота повреждения ЯТ). Соответственно, если при выводе оборудования в плановый ТОиР (ППР) на некое время  $t_1$  уровень безопасности ЭБ АС значительно ухудшится ( $F(t_1)$ ), то, сокращая время  $t_1$  до некоторого времени  $t_2$ , можно повысить уровень безопасности ЭБ АС ( $F(t_2)$ ). Таким образом, «управление» временем  $t$  позволяет «управлять» уровнем безопасности ЭБ АС при проведении планового ТОиР (ППР).

В общем случае сказанное выше справедливо и для других законов распределения времени безотказной работы и времени восстановления оборудования (логарифмически-нормального закона, закона Вейбулла—Гнеденко, закона Релея и проч.), так как чем дольше ЭБ АС эксплуатируется с меньшей кратностью резервирования проверяемого оборудования, тем хуже это для безопасности ЭБ АС. Характерная черта предлагаемого метода в том, что повышение экономической эффективности эксплуатации ЭБ АС предлагается осуществлять с точки зрения соблюдения требований [9] при любой конфигурации ЭБ АС.

## 6. Анализ результатов применения метода

После необходимых изменений в логико-вероятностной модели ЭБ АС по формуле (2) рассчитываются значения  $RIF$ . Затем определяется, в какой из указанных в табл. 1 диапазонов значений  $RIF$  попадает полученное значение фактора. Если оцененное значение  $RIF$  попадает в диапазон:

- $RIF \leq \frac{10^{-4}}{FDF_6}$  для «старых» ЭБ АС и  $RIF \leq \frac{10^{-5}}{FDF_6}$  для

«новых» ЭБ АС — подтверждается допустимость реализации предлагаемого метода;

- $RIF \geq \frac{10^{-3}}{FDF_6}$  для «старых» ЭБ АС и  $RIF \geq \frac{10^{-4}}{FDF_6}$  для

«новых» ЭБ АС — реализация предлагаемого метода не допустима с точки зрения обеспечения безопасности ЭБ АС;

- $\frac{10^{-4}}{FDF_6} < RIF < \frac{10^{-3}}{FDF_6}$  для «старых» ЭБ АС и

$\frac{10^{-5}}{FDF_6} < RIF < \frac{10^{-4}}{FDF_6}$  для «новых» ЭБ АС — реали-

зация предлагаемого метода допустима при условии внедрения компенсирующих мер, направленных на повышение уровня безопасности ЭБ АС при проведении планового ТОиР (ППР) оборудования.

## 7. Выводы

Применение разработанного метода позволяет вносить обоснованные изменения в действующие стратегии проведения ТОиР (ППР) оборудования ЭБ АС на основании информации об уровне безопасно-

сти ЭБ АС при любой конфигурации последнего. Отличительная черта предлагаемого метода в том, что повышение экономической эффективности эксплуатации ЭБ АС предлагается осуществлять при условии обеспечения требуемого уровня безопасности ЭБ АС.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Сигал Е.М. Эффективность использования установленной мощности на АЭС России и пути ее повышения. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. — М., 2003 — 164 с.
2. Акимов В.А., Лесных В.В., Радаев Н.Н. Основы анализа и управления риском в природной и техногенной сферах / Учебное пособие в системе образования МЧС России и РСЧС. — М.: Деловой экспресс, 2004. — 352 с.
3. Острейковский В.А. Эксплуатация атомных станций. — М.: Энергоатомиздат, 1999. — 928 с.
4. Асмолов В.Г. Атомная энергетика России в изменяющемся мире / Седьмая Международная научно-техническая конференция (МНТК-2010). — М., 2010.
5. Асмолов В.Г. Опыт эксплуатации АЭС ОАО «Концерн Росэнергоатом». Обеспечение безопасности и повышение эффективности атомной энергетики России / Восьмая Международная научно-техническая конференция (МНТК-2012). — М., 2012.
6. Ершов Г.А., Ермакович Ю.Л., Калинин А.А., Козлов М.А., Парфентьев М.А. Обоснование периодичности проверок систем безопасности АЭС с помощью программного комплекса БАРС. [http://www.remmag.ru/admin/upload\\_data/remmag/10-2/AEP.pdf](http://www.remmag.ru/admin/upload_data/remmag/10-2/AEP.pdf).
7. Острейковский В.А., Швыряев Ю.В. Безопасность атомных станций. Вероятностный анализ. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. — 352 с.
8. Перегрузка ЯТ. [http://www.aes.bezkz.su/NuclFuel/P08\\_01.htm](http://www.aes.bezkz.su/NuclFuel/P08_01.htm).
9. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. (ОПБ-88/97). НП-001-97. Утверждены постановлением Госатомнадзора России от 14 ноября 1997 г. № 9. Введены с 1 июля 1998 г.
10. NSAG-25 «A Framework for an Integrated Risk-informed Decision-Making Process» / International Atomic Energy Agency. Vienna. 2011.
11. Regulatory Guide 1.174. An Approach for Using Probabilistic Risk Assessment in Risk-Informed Decisions on Plant-Specific Changes to the Licensing Basis, US NRC RG 1.174, Rev. 1. 2002.
12. Антонов А.В., Ершов Г.А., Морозова О.И. Риск-информативный подход к обеспечению безопасности эксплуатации энергоблоков атомных станций // Безопасность в техносфере. — 2013. — № 1 — С. 14–19.
13. Заявление о политике по применению вероятностного анализа безопасности и риск-информативных методов для атомных станций // Журнал Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору. 2012. № 1(63).
14. Кузнецов С.А. Большой толковый словарь русского языка. Первое издание. Публикуется в авторской редакции 2009 г. СПб.: Норинт, 1998.
15. Положение об основных рекомендациях к разработке вероятностного анализа безопасности уровня 1 для внутренних иницирующих событий для всех режимов работы энергоблока атомной станции (РБ-024-11). Утверждено приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 09.09.2011 г. № 519.

## Increase of Economic Efficiency of Nuclear Power Plant Unit Operation with Consideration of Safety

**A.V. Antonov**, Dean of Cybernetics Faculty, Ph.D. in Engineering, Professor, The Obninsk State Technical University for Nuclear Power Engineering, Branch of MIFI National Nuclear Research University

**G.A. Ershov**, Chief Project Engineer, Ph.D. in Engineering, Professor, «Leading Institute VNIPIET» «Saint-Petersburg Research and Design Institute»

**O.I. Morozova**, postgraduate student, The Obninsk State Technical University for Nuclear Power Engineering, Branch of MIFI National Nuclear Research University

*High requirements are imposed on economic efficiency of nuclear power plant units operation. Obvious way of increasing economic benefit of nuclear power plant units operation is increasing the amount of generated electricity. The article describes a method of increasing economic benefit of nuclear power plant units by shortening its downtime due to scheduled maintenance and repair. As safety assurance is the top priority during nuclear power plant units operation, increase of economic viability of nuclear power plant units should be carried out with this consideration, which is the distinctive feature of the proposed method.*

**Keywords:** nuclear power plant unit, nuclear power plant NPP, safety, economic viability, operation.