

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ
ТОПЛИВНЫХ ЗАГРУЗОК РЕАКТОРОВ ВВЭР-1000****А. А. Коренной¹, Н. А. Фридман²***Хмельницкая АЭС, Нетешин
НАЭК "Энергоатом", Киев*

На примере типичных топливных циклов реактора ВВЭР-1000 рассматриваются подходы и критерии, позволяющие провести оценку их эффективности. Особое внимание уделено тому факту, что за время эксплуатации топливной загрузки средний уровень тепловой мощности реактора ниже номинального.

Анализ концептуальных топливных циклов для АЭС с ВВЭР-1000

Рассмотрим возможные пути модернизации топливных циклов АЭС с реакторами ВВЭР-1000, направленные на повышение эффективности топливоиспользования как одного из важнейших критериев их эффективности.

Для решения поставленной задачи необходимо воспользоваться математическим аппаратом, позволяющим с высокой достоверностью предсказывать длительность моделируемых топливных кампаний и глубину выгорания выгружаемого ядерного топлива.

Наиболее подходящим инструментом для этих целей являются штатные программы сопровождения эксплуатации АЭС. Приведенные в этой работе данные были получены расчетным путем по аттестованной программе сопровождения эксплуатации АЭС с ВВЭР-1000 БИПР-7А. Эта программа является математическим имитатором реактора ВВЭР-1000. В ее основе лежит трехмерное представление активной зоны (АКЗ) реактора с возможностью моделирования процессов выгорания ядерного топлива. Программа решает систему уравнений диффузии для нейтронов конечно-разностным методом. Этот подход в настоящее время является традиционным для подобных программ в мировой практике. Особо отметим достаточно высокий уровень верификации данного программного продукта.

Программа БИПР-7А позволяет с относительной погрешностью не более $\pm 5\%$ рассчитать глубину выгорания отработавшего ядерного топлива. Погрешность определения эффективной длительности кампании реактора ($t_{эф}$) составляет приблизительно $\pm 1\%$. Данные о погрешностях приведены на основе паспортно-аттестационных данных программы БИПР-7А.

Рассмотрим основные варианты топливных циклов реактора ВВЭР-1000.

Вариант № 1 – проектный трехгодичный стационарный топливный цикл.

Вариант № 2 – проектный стационарный цикл с использованием 36 ТВС на четвертый год эксплуатации.

Вариант № 3 – модернизированный стационарный топливный цикл с использованием 36 ТВС на четвертый год эксплуатации и установкой 12 из этих ТВС в угловые ячейки периферийного ряда.

Варианты № 4, 5, 6 – близки вариантам № 1, 2, 3 соответственно по схемам перестановок и по нейтронно-физическим характеристикам, но в конце каждого из них используется режим работы с использованием отрицательных эффектов реактивности (ОЭР) в течение 10 эффективных суток. Под ОЭР подразумевается увеличение относительного запаса реактивности, вызванное снижением тепловой мощности АКЗ реактора.

В таблице представлены основные результаты расчетного анализа по программе БИПР-7А стационарных топливных циклов реактора ВВЭР-1000 как с точки зрения компоновочных решений, так и влияния продолжительности использования ОЭР – $t_{ОЭР}$. Последняя величина приведена в эффективных сутках.

Общая продолжительность остановок на планово-предупредительный ремонт в каждом случае принималась 80 сут. Заметим, что это достаточно критическая величина с точки зрения эффективности цикла. Однако ее обсуждение выходит за рамки данной работы.

Эффект от внедрения различных топливных циклов

Цикл №	$t_{эф}$	$t_{ОЭР}$	Количество ТВС подпитки, шт.	Относительная глубина выгорания топлива	Относительная годовая выработка энергии
1	300,4	-	55	1,000	1,0000
2	252,4	29	43	1,075	0,9390
3	251,8	-	43	1,073	0,9610
4	304,6	10	55	1,014	1,0007
5	246,6	10	43	1,050	0,9536
6	255,1	10	43	1,087	0,9616

В вариантах № 1 и 4 и № 3 и 6 соответственно использование ОЭР практически не изменяет среднегодовую выработку электроэнергии. Однако при этом повышается глубина выгорания отработавшего ядерного топлива и снижаются удельные затраты на свежее топливо приблизительно на 1,5 %. Проектный цикл № 2 предполагает обязательное использование ОЭР в конце каждой загрузки в течение приблизительно 29 эффективных суток. Переход от варианта № 1 к № 2 можно назвать примером фиктивной модернизации, поскольку положительными результатами такого перехода являются лишь повышение глубины выгорания отработавшего ядерного топлива в ущерб выработке энергии. Другие характеристики загрузок ухудшаются.

Причины отказа от использования проектного цикла № 1 (см. таблицу) на энергоблоках ВВЭР-1000 носят технический характер. Ухудшение экономических показателей работы, а именно годовой выработки энергии, явилось вынужденной мерой. Однако на некоторых энергоблоках Украины, снизив выработку, пока не удалось поднять глубину выгорания выгружаемого топлива и, таким образом, реализуемый цикл по типу является худшей из комбинаций № 1 и № 2.

Переход от цикла № 2 к циклу № 3 характеризуется снижением утечки быстрых нейтронов за пределы АКЗ, увеличением величины запаса реактивности на выгорание и соответственно выработки энергии.

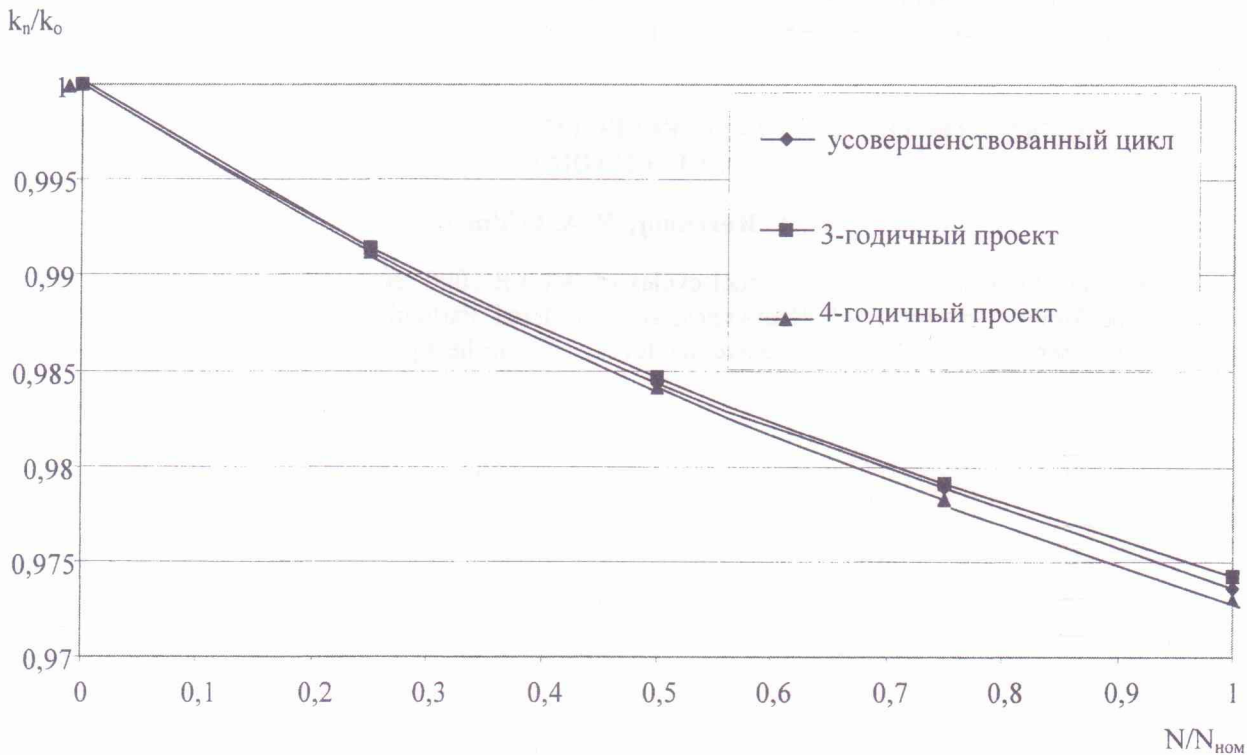
Здесь интересно отметить следующее. Изменение утечки быстрых нейтронов из АКЗ изменяет и их воздействие на конструкционные материалы реактора. Величиной, определяющей срок эксплуатации энергоблока ВВЭР-1000, согласно действующей нормативно-технической документации, является максимальный флюенс быстрых нейтронов на корпус реактора. Использование загрузок с пониженной утечкой нейтронов из АКЗ способно уменьшить динамику набора флюенса быстрых нейтронов корпусом реактора. Это может привести к существенному продлению срока эксплуатации корпуса реактора, а значит, и АЭС в целом.

Работа энергоблока в реальном режиме эксплуатации

Для оценки эффективности работы АЭС традиционно используются относительные коэффициенты. Во-первых, это коэффициент использования установленной мощности (КИУМ), представляющий собой отношение величины реальной энерговыработки установки к номинальной энерговыработке за рассматриваемый временной интервал. Во-вторых, это коэффициент полезного действия, представляющий отношение величины полезно полученной работы к подведенному для производства этой работы количеству теплоты. Этот критерий используется для оценки термодинамической эффективности энергетической установки. В-третьих, это запас реактивности, определяющий работу ядерного реактора при поддержании заданного уровня тепловой мощности.

При работе реактора на пониженном уровне мощности происходит относительное увеличение запаса реактивности, однако снижается КИУМ. Представляет интерес исследование взаимосвязи запаса реактивности и КИУМ на реальных топливных загрузках.

Рассмотренные в данной работе топливные циклы в полной мере отражают весь спектр используемых на АЭС с ВВЭР-1000 топливных загрузок. С использованием программы БИПР-7А были выполнены расчеты зависимости нормированного запаса реактивности от средней относительной мощности реактора, при которой происходит выгорание топлива. Данные расчета приведены на рисунке, на котором приняты следующие обозначения: k_0 – запас реактивности на 0-м уровне мощности; k_n – запас реактивности на уровне мощности N ; $N/N_{\text{ном}}$ – отношение среднего уровня эксплуатации установленной мощности N к номинальной.



Данные расчета концептуальных топливных загрузок.

Выводы

Исследование топливных циклов в «идеальных» условиях эксплуатации реактора дают самую общую картину эффективности топливоиспользования.

Анализ данных рисунка показывает, что в диапазоне относительной мощности 0,7 – 1,0 наблюдаются наибольшие различия в исследуемых показателях. Именно в этот диапазон попадает большинство реально эксплуатируемых топливных загрузок.

Для дополнительной оценки эффективности эксплуатации топливной загрузки достаточно выполнить аналогичный предварительный расчет и определить оптимальную среднюю мощность эксплуатации топливной загрузки. Отличие этой мощности от реально полученной и будет дополнительным критерием эффективности эксплуатации топливной загрузки.

Как следует из приведенного рисунка, наиболее эффективным, с точки зрения сохранения запаса реактивности при пониженной мощности эксплуатации, является вариант топливного цикла № 3.

При относительной мощности реактора ниже 0,7 каких-либо преимуществ одного из вариантов топливных циклов по рассматриваемому критерию не наблюдается.

В целом предлагаемый критерий не носит доминирующий характер. Его следует рассматривать как дополнение к совокупности существующих критериев для более детальной оценки эффективности топливоиспользования на АЭС. На фоне постоянного роста стоимости свежего топлива для энергетических ядерных реакторов это представляется достаточно актуальным.

УДОСКОНАЛЕННЯ КРИТЕРІВ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПАЛИВНИХ ЗАВАНТАЖЕНЬ РЕАКТОРІВ ВВЕР-1000

А. О. Корінний, М. А. Фрідман

На прикладі типових паливних циклів реактора ВВЕР-1000 розглядаються підходи та критерії, що дозволяють провести оцінку їх ефективності. Особливу увагу приділено тому факту, що за час експлуатації паливного завантаження середній рівень теплової потужності реактора нижче номінального.

IMPROVEMENT OF OPERATIONAL EFFECTIVENESS CRITERIA OF WWER-1000 FUEL LOADING

A. A. Korennoj, N. A. Fridman

Based on the examples of typical fuel cycles of WWER-1000 reactor the approaches and criteria allowing to perform the evaluation of effectiveness are considered. Particular attention is focused on the fact that during the operation of fuel loading the average level of reactor heat power is lower to nominal.

Поступила в редакцію 08.05.02,
после доработки – 17.10.02.