

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЦИОНАРНОГО СОСТОЯНИЯ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ВВЭР-1000 (1200) НА УСТОЙЧИВОСТЬ РЕАКТОРА К КСЕНОНОВЫМ КОЛЕБАНИЯМ

Р.Т. Аль Малкави, С.Б. Выговский, О.В. Батайне

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, Москва, Каширское шоссе, 31*



Приведена методика получения аналитического выражения для критерия устойчивости реактора ВВЭР-1000 (1200) по отношению к ксеноновым колебаниям локальной мощности в активной зоне, содержащая явную зависимость коэффициентов критериального соотношения от произвольного высотного распределения нейтронного поля в стационарных состояниях активной зоны. На основании данных численных экспериментов с использованием полномасштабной модели энергоблоков Калининской АЭС приводятся результаты проверки справедливости этого выражения для критерия устойчивости реактора по отношению к ксеноновым колебаниям для разных АЭС с ВВЭР-1000 (1200).

Ключевые слова: устойчивость реактора, ксеноновые колебания, аксиальный офсет, ВВЭР-1000 (1200), маневренные режимы.

СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

Впервые получены аналитические выражения для критерия устойчивости реактора ВВЭР-1000 (1200) по отношению к ксеноновым колебаниям локальной мощности в активной зоне, содержащие явную зависимость коэффициентов критериального соотношения от произвольного высотного распределения нейтронного поля в стационарных состояниях активной зоны.

В условиях реализации маневренных режимов с изменением мощности в течение суток возникает нестационарное отравление активной зоны ксеноном, что может привести к возникновению ксеноновых колебаний локальной мощности по объему активной зоны реактора ВВЭР-1000 (1200) [1, 2]. В этом случае стоит задача обеспечить устойчивость реактора по отношению к ксеноновым колебаниям локальной мощности в активной зоне. Без решения задачи обеспечения устойчивости аксиальные ксеноновые колебания могут иметь незатухающий характер и соответственно сопровождаться неограниченным числом циклов колебаний локальной мощности. Это приведет к циклическим тепловым нагрузкам на топливо и оболочку топлива, что может изменить термомеханические свойства материалов топливного элемента с потерей характеристик, необходимых для безопасной эксплуатации активной зоны [3].

© Р.Т. Аль Малкави, С.Б. Выговский, О.В. Батайне, 2020

Для симметричного распределения нейтронного поля получение аналитического выражения для критерия устойчивости реактора не представляет большой сложности. Аналогичные выражения встречаются во многих работах [4 – 10]. При условии несимметричного высотного распределения нейтронного поля появляется еще один параметр влияния на устойчивость реактора к ксеноновым колебаниям – аксиальный офсет нейтронной мощности или коэффициент неравномерности высотного распределения энерговыделений. Упоминание об этом и описание физической сути этого влияния имеется в [11, 12]. Однако получить конечные аналитические выражения для критерия устойчивости реактора с учетом произвольного высотного распределения нейтронного поля гораздо труднее, и авторам неизвестны публикации, где могли бы быть представлены такие выражения. В этой работе была поставлена такая задача и получены конечные аналитические выражения для критерия соотношения по устойчивости реактора к ксеноновым колебаниям при произвольном высотном распределении.

В [11] приведены простые выкладки, показывающие, что при смещении максимума энерговыделений в верхнюю половину активной зоны при удержании постоянной мощности реактора уменьшается средняя температура воды в реакторе, и температурный коэффициент реактивности по модулю уменьшается, что снижает устойчивость реактора по сравнению с вариантом симметричного высотного распределения нейтронного поля и тем более по сравнению с вариантом смещения максимума энерговыделений в нижнюю половину зоны. Но в этой работе отсутствуют аналитические выражения, отражающие эти выводы.

Полученные нами аналитические выражения подтверждают упомянутые выводы и указывают в явном виде на зависимость температурного коэффициента реактивности от коэффициента высотной неравномерности энерговыделений (или значения аксиального офсета нейтронной мощности), и тем самым позволяют количественно оценить влияние этой зависимости на устойчивость реактора к ксеноновым колебаниям.

В [12] приводится утверждение о том, что, чем равномернее высотное распределение энерговыделений в ядерном реакторе, тем больше вероятность возникновения ксеноновых колебаний. Это не совсем правильно, так как результаты проведенных численных исследований показывают, что при смещении максимума энерговыделений в верхнюю половину активной зоны устойчивость реактора заметно снижается по сравнению с состоянием активной зоны при равномерном распределении.

Значение аксиального офсета на практике для вторых топливных загрузок ВВЭР-1000 (1200) всегда имеет заметное положительное значение, так как нейтронное распределение смещается кверху активной зоны из-за более существенного недовыгорания топлива в верхней части активной зоны по сравнению с нижней для первой топливной загрузки. Выгорание топлива в верхней части активной происходит в меньшей степени по сравнению с нижней частью для первой топливной загрузки по причине смещения высотного распределения нейтронного поля для первой загрузки в нижнюю часть зоны. Для каждой второй загрузки полезно иметь аналитическую оценку устойчивости реактора, учитывающую влияние высотного распределения на нее. В этом и может состоять практика применения полученных аналитических выражений для эксплуатации энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000 (1200). Особенно это важно для принятия решения по проведению испытаний маневренных режимов для второй топливной загрузки седьмого энергоблока НВАЭС и второго блока ЛАЭС-2.

Безусловно полученный критерий полезен для уточнения представления о природе возникновения ксеноновых колебаний в ядерных реакторах на тепловых нейт-

ронах. Целесообразно информацию о полученном критерии использовать в процессе обучения будущих специалистов для атомной отрасли и для переподготовки специалистов атомных станций. Более того, эти материалы уже используются в учебном процессе на кафедрах «Автоматика» в НИЯУ МИФИ и «Оборудование и эксплуатация ЯЭУ» в ИАТЭ НИЯУ МИФИ.

УСТОЙЧИВОСТЬ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НЕЙТРОННОГО ПОЛЯ

Ксеноновые переходные процессы в активной зоне реактора обусловлены нарушением равновесного состояния – динамического равновесия между плотностью потока нейтронов и концентрацией ядер ксенона ^{135}Xe и йода ^{135}I . Под ксеноновой устойчивостью понимается способность активной зоны восстанавливать равновесное состояние пространственного ксенонового распределения и пространственного распределения локальной мощности по объёму активной зоны.

Для эксплуатации реактора практическое значение имеют обусловленные ксеноновыми процессами изменения реактивности (интегральные ксеноновые процессы), а также изменения пространственного распределения энерговыделений в активной зоне (пространственные ксеноновые процессы).

Устойчивость реактора к ксеноновым колебаниям характеризуется индексом стабильности α и периодом колебаний T_{Xe} , которые определяются при анализе свободных ксеноновых колебаний, полученных экспериментально или с помощью расчетного моделирования. При этом рассматривается изменение во времени некоторой скалярной величины, характеризующей распределение энерговыделения в активной зоне. Такой скалярной величиной является значение аксиального офсета – AO (процентное отношение разности мощностей верхней и нижней половин активной зоны к полной мощности). Свободные пространственные ксеноновые колебания имеют синусоидальный характер с периодическим чередованием восходящей и нисходящей фаз, соответствующих увеличению и уменьшению значений параметра, характеризующего ксеноновые колебания. Отклонение величины AO от ее равновесного значения AO^* , соответствующего равновесному распределению ксенона, представляется в виде [13, 14]

$$A(t) = A(t_0)\exp(\alpha t)\cos(\omega t), \quad (1)$$

где $A = AO - AO^*$; $\omega = 2\pi/T$; $\tau = t - t_0$ (t_0 – момент достижения первого экстремума); T – период свободных ксеноновых колебаний; $\alpha = T^{-1} \cdot \ln(A_2/A_1)$, A_1 – амплитуда первого максимума, A_2 – амплитуда второго максимума.

Поведение аксиального офсета AO во времени контролирует устойчивость реактора. Эффективность эксплуатации энергоблока с ВВЭР-1000 (1200) определяется минимизацией отклонения AO от их стационарных значений [15].

Характеристикой устойчивости стационарных состояний служит такой параметр, как индекс стабильности α реактора по отношению к свободным ксеноновым колебаниям локальной мощности в активной зоне [14].

При $\alpha < 0$ реактор устойчив – колебания затухают, при $\alpha \geq 0$ реактор неустойчив – колебания не затухают.

МЕТОДИКА ПОЛУЧЕНИЯ АНАЛИТИЧЕСКОГО ВЫРАЖЕНИЯ

Для получения выражения, определяющего критерий устойчивости реактора к ксеноновым колебаниям, используется двухточечное приближение модели нейтронной кинетики. Данное приближение описывается системой обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений баланса ксенона и йода, дополненной алгебраическим уравнением баланса нейтронов в однопиковом по энергии нейтронов и од-

номерном по геометрии приближениях, и упрощенными выражениями для обратных связей по реактивности при небольших отклонениях средней мощности. Для анализа устойчивости реактора к ксеноновым колебаниям исходная система обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений приводится к сводной системе линеаризованных уравнений. Далее к данной сводной системе применяется преобразование Лапласа. Это преобразование позволяет получить окончательный вид характеристического уравнения третьего порядка. На основе критерия Гурвица выводится критерий устойчивости реактора по отношению к ксеноновым колебаниям в случае несимметричного высотного распределения нейтронного поля:

$$\left[\frac{\left(\frac{\langle \Sigma_f \rangle V_0}{\sigma_{Xe} N_0} \right)^2 \left[2\lambda_{Xe}^3 + \lambda_J \lambda_{Xe}^2 \right] + \left(\frac{\langle \Sigma_f \rangle V_0}{\sigma_{Xe} N_0} \right) \left[6\lambda_{Xe}^2 + 2\lambda_J \lambda_{Xe} \right]}{\left(\frac{\sigma_{Xe} N_0}{\langle \Sigma_f \rangle V_0} \right) A + \lambda_{Xe} B} + \frac{[4\lambda_J + 16\lambda_{Xe}]}{\left(\frac{8\sigma_{Xe} N_0}{\langle \Sigma_f \rangle V_0} \right) + 4\lambda_{Xe} C} + 1 \right] \times$$

$$\times \left[b \left| \frac{d\rho}{dN} \right|_{N_0} + 0.5a N_0 \left| \frac{d\rho}{dT} \right|_2 + 0.25a k_z N_0 \left(\left| \frac{d\rho}{dT} \right|_2 - \left| \frac{d\rho}{dT} \right|_1 \right) + v^{-1} \frac{4D_1 D_2}{(D_1 + D_2) \langle \Sigma_f \rangle H^2} C \right] > \gamma; \quad (2)$$

$$A = [4k_z^2 - 2k_z^2]; B = [2k_z^2 - 4k_z + 4]; C = \left[\frac{0.5k_z^2 - k_z + 1}{0.5k_z - 0.25k_z^2} \right]; \left| \frac{d\rho}{dT} \right|_2 > \left| \frac{d\rho}{dT} \right|_1 \text{ при } T_2 > T_1,$$

где b – коэффициент перевода из МВт в дел/(с·см³); $\gamma = \gamma_I + \gamma_{Xe}$, $\gamma_I \approx \gamma_{Te}$; γ_I – суммарная доля выхода ¹³⁵I на одно деление тяжелого изотопа (²³⁵U, ²³⁹Pu, ²⁴¹Pu); γ_{Xe} – суммарная доля выхода ¹³⁵Xe на одно деление тяжелого изотопа (²³⁵U, ²³⁹Pu, ²⁴¹Pu); γ_{Te} – суммарная доля выхода ¹³⁵Te на одно деление тяжелого изотопа (²³⁵U, ²³⁹Pu, ²⁴¹Pu); D_1 – коэффициент диффузии по объему нижней части активной зоны; D_2 – коэффициент диффузии по объему верхней части активной зоны; aN_0 – подогрев теплоносителя, град; $\langle \Sigma_f \rangle$ – среднее макроскопическое сечение деления урана; σ_{Xe} – среднее микроскопическое сечение поглощения тепловых нейтронов ¹³⁵Xe; H – высота активной зоны реактора; V_0 – объем активной зоны реактора; λ_{Xe} – постоянная радиоактивного распада ксенона; λ_J – постоянная радиоактивного распада йода; k_z – коэффициент неравномерности по высоте активной зоны, $k_z = N_{10}/(0,5N_0)$; N_0 – среднее число делений (или средняя мощность), $N_0 = N_{10} + N_{20}$; N_{10} – среднее число делений в нижней части активной зоны (или средняя мощность); N_{20} – среднее число делений в верхней части активной зоны (или средняя мощность); $d\rho/dN$ – мощностной коэффициент реактивности; $|d\rho/dT|_1$ – коэффициент реактивности по температуре в нижней части активной зоны; $|d\rho/dT|_2$ – коэффициент реактивности по температуре в верхней части активной зоны; v – число вторичных нейтронов.

Отметим, что температура теплоносителя в нижней части активной зоны меньше, чем в верхней части. Известно, что температурный коэффициент реактивности складывается из двух частей. Одна из них определяется плотностным эффектом реактивности и зависит от производной плотности воды по её температуре, причем данная часть коэффициента прямо пропорциональна значению этой производной. Значение производной плотности воды по температуре (по модулю) снижается с уменьшением температуры воды, что следует из термодинамических свойств воды и пара, и это приводит к снижению величины температурного коэффициента реактивности по модулю. По этой причине температурный коэффициент реактивности в нижней половине активной зоны по модулю меньше, чем в верхней.

Левую часть (2) можно представить в виде функции F от параметров k_z и

$\sigma_{Xe}N_0/(\lambda_{Xe}\langle\Sigma_f\rangle V_0)$: $F(k_z, \sigma_{Xe}N_0/(\lambda_{Xe}\langle\Sigma_f\rangle V_0))$. При условии $\sigma_{Xe}N_0/(\lambda_{Xe}\langle\Sigma_f\rangle V_0) > 1$ производная F по параметру k_z оказывается положительной, т.е. $\partial F/\partial k_z > 0$. Для реакторов ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 при номинальной мощности параметр $\sigma_{Xe}N_0/(\lambda_{Xe}\langle\Sigma_f\rangle V_0)$ заметно больше единицы, а это позволяет утверждать, что увеличение параметра k_z ведёт к росту величины левой части неравенства (2) и способствует повышению устойчивости реактора к ксеноновым колебаниям. В противном случае при уменьшении k_z и смещении высотного распределения нейтронного поля в верхнюю часть активной зоны устойчивость реактора к ксеноновым колебаниям будет снижаться.

ТОЧНОСТЬ РАСЧЕТА КСЕНОНОВЫХ ПРОЦЕССОВ

Для проверки справедливости выражения, приведенного выше, были проведены расчетные исследования ксеноновой устойчивости ВВЭР-1000 по программному комплексу ПРОСТОР [16] с библиотекой констант, подготовленной по программе UNK [17]. Программный комплекс ПРОСТОР является программным ядром моделей реактора и оборудования первого контура в составе полномасштабных тренажеров (ПМТ) энергоблоков № 2 – 4 Калининской АЭС и энергоблоков № 3, 4 Ростовской АЭС. Программный комплекс ПРОСТОР используется также в составе анализатора режимов реакторной установки с реактором ВВЭР в ядерно-физической лаборатории (ЯФЛ) Калининской АЭС и в учебно-тренировочном центре (УТЦ) НВАЭС.

Комплекс ПРОСТОР прошел верификацию на многих экспериментальных и расчетных данных АЭС при выполнении программ приемо-сдаточных испытаний указанных ПМТ и анализаторов [18]. Результаты верификации модели РУ в полном объеме находятся в аттестационных материалах Ростехнадзора. Что касается погрешностей расчета основных нейтронно-физических характеристик активной зоны, то можно утверждать, что они не превышают погрешностей расчета по программам БИПР-7А, NOSTRA и ИР. На рисунках 1, 2 приводятся результаты верификации программного комплекса ПРОСТОР на основании сопоставления расчетных данных, полученных по этому комплексу, с экспериментальными данными, полученными для различных энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000 [18].

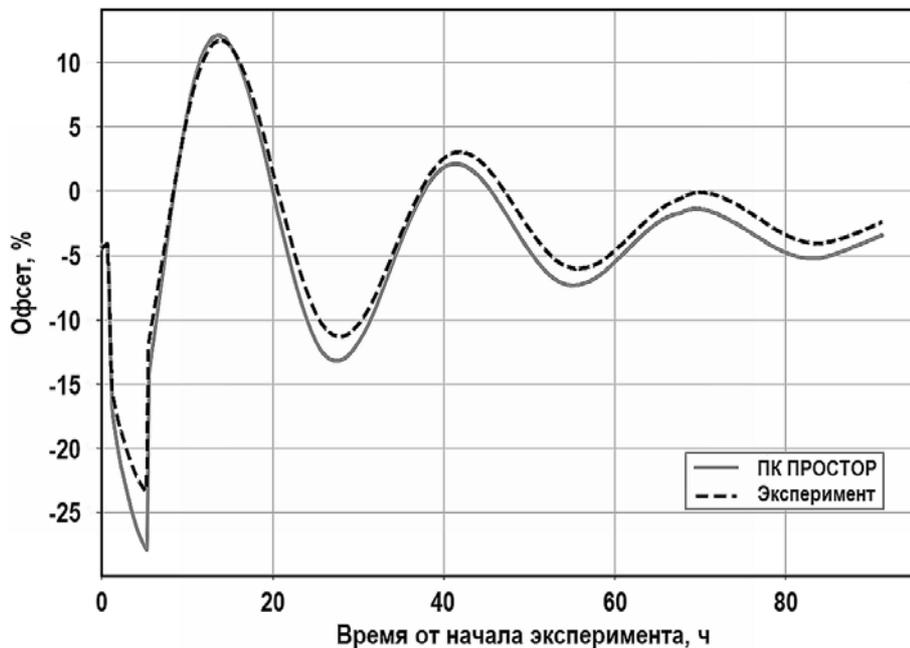


Рис. 1. Результаты моделирования свободных ксеноновых колебаний на мощности, равной 75% от номинального значения, для первой кампании блока № 3 Калининской АЭС. Поведение аксиального офсета

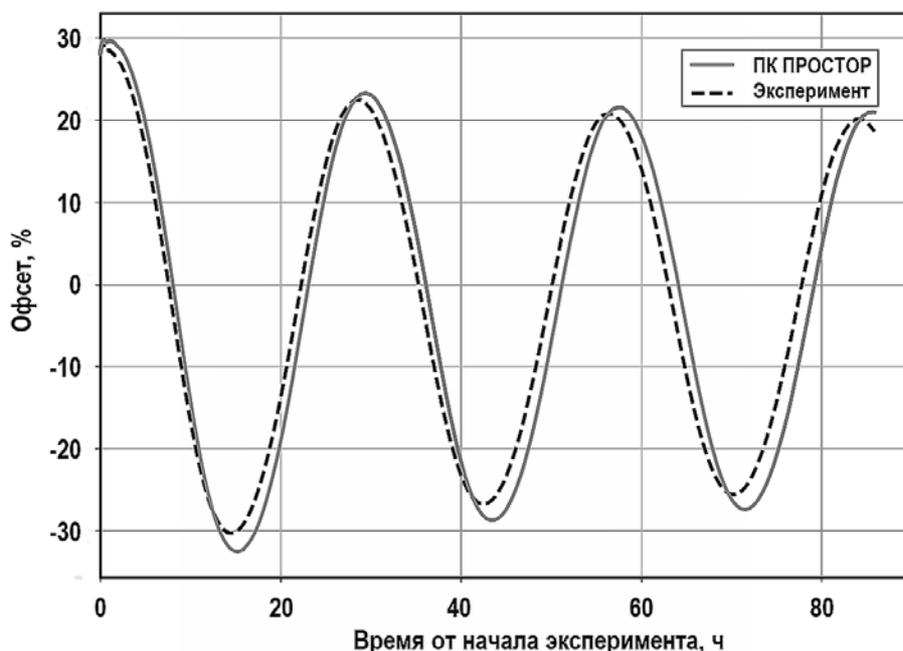


Рис. 2. Результаты моделирования свободных ксеноновых колебаний на мощности, равной 75% от номинального значения, для первой кампании блока № 4 Калининской АЭС. Поведение аксиального офсета

Кроме указанных рисунков с графиками поведения аксиального офсета нейтронной мощности в зависимости от времени приводятся расчетные и экспериментальные интегральные параметры ксеноновых колебаний – индекс стабильности и период колебаний, которые подтверждают удовлетворительную точность расчета по комплексу ПРОСТОР. Интегральные параметры колебаний даны в таблице 1.

Таблица 1
Индекс стабильности и период аксиальных ксеноновых колебаний для первой кампании блоков № 3, 4 Калининской АЭС на 0 эфф. сут

Параметры колебаний	Индекс стабильности α , ч ⁻¹	Период колебаний T , ч
Расчет для блока № 3 Калининской АЭС	$-34 \cdot 10^{-3}$	27.7
Эксперимент на блоке № 3 Калининской АЭС	$-(33.4 \pm 0.7) \cdot 10^{-3}$	27.9 ± 0.5
Расчет для блока № 4 Калининской АЭС	$-1.91 \cdot 10^{-3}$	28.0
Эксперимент на блоке № 4 Калининской АЭС	$-(1.93 \pm 0.04) \cdot 10^{-3}$	27.7 ± 0.5

РАСЧЕТЫ ДИНАМИКИ КСЕНОНОВЫХ ПРОЦЕССОВ

Колебания возбуждались погружением рабочей (десятой) группы органов регулирования системы управления и защиты реактора (ОР СУЗ) из начального положения 90%-го извлечения по высоте зоны при исходном стационарном состоянии реактора. На протяжении всего процесса поддерживалось критическое состояние реактора на постоянном уровне мощности за счет изменения концентрации борной кислоты в теплоносителе.

В таблицах 2, 3 приведены результаты численных расчетов по программному комплексу ПРОСТОР значений индексов стабильности и периодов свободных аксиальных ксеноновых колебаний в начале и конце 22-ой кампании блока № 2 Калининской АЭС.

Таблица 2

Индекс стабильности и период аксиальных ксеноновых колебаний в зависимости от мощности для 22-ой кампании блока № 2 Калининской АЭС на 0 эфф. сут

Мощность реактора, %	α , ч ⁻¹	$T_{хе}$, ч	H_k , %	AO'	$\sigma_{хе}$, барн	$\langle \Sigma f \rangle$, см ⁻¹	ν	$\partial\rho/\partial N \cdot 10^3$, %/МВт
95	-0,030	30,08	70	2,07	150393	0,00944	2,58	-0,4285
85	-0,040	31,27	70	3,66	150922	0,00946	2,58	-0,4413
75	-0,045	32,56	70	5,15	151596	0,00949	2,58	-0,4593
65	-0,050	34,05	70	6,57	152210	0,00952	2,58	-0,4816
55	-0,053	35,74	70	8,00	152798	0,00954	2,58	-0,5036
45	-0,056	37,42	70	9,48	153221	0,00956	2,58	-0,5095

Примечание: H_k – конечное положение группы 10 (начальное положение группы 90%)

Таблица 3

Индекс стабильности и период аксиальных ксеноновых колебаний в зависимости от мощности для 22-ой кампании блока № 2 Калининской АЭС на 305 эфф. сут

Мощность реактора, %	α , ч ⁻¹	$T_{хе}$, ч	H_k , %	AO'	$\sigma_{хе}$, барн	$\langle \Sigma f \rangle$, см ⁻¹	ν	$\partial\rho/\partial N \cdot 10^3$, %/МВт
95	0,027	27,7	80	0,74	173338	0,00899	2,66	-0,6761
85	0,012	28,44	80	4,15	174073	0,00902	2,66	-0,6787
75	-0,002	29,32	80	7,33	174791	0,00905	2,66	-0,6940
65	-0,012	30,36	80	10,40	175481	0,00907	2,66	-0,7015
55	-0,022	31,57	80	13,57	176137	0,00910	2,66	-0,7082
45	-0,030	33,15	80	16,90	176757	0,00913	2,66	-0,7130

Из анализа данных таблиц следует, что изменение индекса стабильности происходит в соответствии с изменениями параметров, определяющих условие возникновения ксеноновых колебаний аксиального оффсета в активной зоне. Этими параметрами являются мощность реактора, среднее макроскопическое сечение деления нейтронов в топливе, число вторичных нейтронов на деление и полный мощностной коэффициент реактивности.

В таблицах 4, 5 приведены значения индексов стабильности и периодов свободных аксиальных ксеноновых колебаний в начале первой кампании блока № 3 Калининской АЭС и в начале второй кампании этого же блока.

Несмотря на то, что обогащение топлива и мощностной коэффициент реактивности увеличиваются, а микроскопическое сечение поглощения нейтронов ксеноном уменьшается для второй топливной загрузки, первая загрузка в начале кампании оказывается устойчивее, чем вторая загрузка, при одних и тех значениях мощности. Это происходит за счет изменения высотного профиля нейтронной мощности для второй кампании по сравнению с пусковой загрузкой. Анализ выражения (2) доказывает этот, на первый взгляд, парадоксальный результат. Как видно из значений величин k_z ($k_z = N_{10}/(0,5N_0)$), указанных в табл. 4 и 5, для первой загрузки $k_z > 1$ и нейтронное поле оказывается сдвинутым в сторону нижней части активной зоны; для второй загрузки $k_z < 1$ и поле

сдвигается к верхней части активной зоны. Снижение величины k_z , как следует из (2), уменьшает левую часть этого неравенства и, как минимум, уменьшает по модулю индекс стабильности свободных ксеноновых колебаний аксиального офсета нейтронной мощности. Все это ослабляет способность реактора в данном состоянии активной зоны к обеспечению устойчивости ксеноновых процессов в активной зоне.

Таблица 4

Индекс стабильности и период аксиальных ксеноновых колебаний в активной зоне в начале первой кампании блока № 3 Калининской АЭС

Мощность реактора, %	α , ч^{-1}	$T_{\text{хе,ч}}$	H_k , %	k_z	$\sigma_{\text{хе}}$, барн	$\langle \Sigma f \rangle$, см^{-1}	ν	$\partial \rho / \partial N \cdot 10^3$, %/МВт
105	-0,027	27,09	70	1,072	209455	0,00888	2,55	-0,3059
95	-0,033	27,98	70	1,064	209964	0,00891	2,55	-0,3245
85	-0,039	29,18	70	1,056	210436	0,00894	2,55	-0,3455
75	-0,045	30,55	70	1,049	210868	0,00897	2,55	-0,3692
65	-0,049	32,49	70	1,043	211240	0,00900	2,55	-0,3978
55	-0,054	34,82	70	1,036	211543	0,00902	2,55	-0,4262
45	-0,058	37,80	70	1,031	211744	0,00902	2,55	-0,4462

Таблица 5

Индекс стабильности и период аксиальных ксеноновых колебаний в активной зоне в начале второй кампании блока № 3 Калининской АЭС

Мощность реактора, %	α , ч^{-1}	$T_{\text{хе,ч}}$	H_k , %	k_z	$\sigma_{\text{хе}}$, барн	$\langle \Sigma f \rangle$, см^{-1}	ν	$\partial \rho / \partial N \cdot 10^3$, %/МВт
105	0,009	27,38	70	0,983	187955	0,00908	2,56	-0,3618
95	-0,001	27,94	70	0,970	188697	0,00911	2,56	-0,3736
85	-0,012	28,88	70	0,957	189416	0,00913	2,56	-0,3882
75	-0,023	29,82	70	0,946	190113	0,00916	2,56	-0,3930
65	-0,032	31,15	70	0,935	190776	0,00918	2,56	-0,4042
55	-0,039	32,56	70	0,924	191392	0,00921	2,56	-0,4510
45	-0,044	34,59	70	0,912	191957	0,00923	2,56	-0,4573

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получен аналитический вид критерия устойчивости ВВЭР-1000 (1200) по отношению к ксеноновым процессам в активной зоне при учете произвольного высотного распределения нейтронного поля в стационарных состояниях реактора. Качество данного критерия было проверено на основании результатов численных экспериментов с использованием программного комплекса ПРОСТОР по данным ряда энергоблоков Российских АЭС с ВВЭР-1000.

Литература

1. Выговский С.Б., Аль Малкави Р.Т., Хачатрян А.Г. Оптимизация алгоритмов управления ЯЭУ с ВВЭР-1200 для минимизации водообмена в первом контуре при реализации суточ-

- ных маневренных режимов. / Тезисы докладов XV Международной конференции «Безопасность АЭС и подготовка кадров». – Обнинск: ИАТЭ НИЯУ МИФИ, 2018. – С. 117-119.
2. Аверьянова С.П., Дубов А.А., Косоуров К.Б., Семченков Ю.М., Филимонов П.Е. Работа ВВЭР-1200/1300 в суточном графике нагрузки. // Атомная энергия. – 2012. – Т. 113. – № 5. – С. 247-252.
3. Аверьянова С.П., Вохмянина Н.С., Злобин Д.А., Филимонов П.Е., Кузнецов В.И., Лаговский В.Б. Метод офсет-мощностной фазовой диаграммы для управления энерговыделением реактора. // Атомная энергия. – 2016. – Т. 121. – № 3. – С. 123-127.
4. Белл Д., Глестон С. Теория ядерных реакторов. – М.: Мир, 2001. – 301 с.
5. Хитчкок А. Устойчивость ядерных реакторов. – М.: Госатомиздат, 1963. – 68 с.
6. Рудик А.П. Ксеноновые переходные процессы в ядерных реакторах. – М.: Атомиздат, 1974. – 117 с.
7. Семенов В.К., Вольман М.А. К вопросу о ксеноновых колебаниях в ядерном реакторе. // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2015. – Т. 2. – С. 15-20.
8. Рябов Н.А., Семенов А.А. Исследование точечной модели ксеноновых колебаний // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2006. – № 2. – С. 66-73.
9. Выговский С.Б., Рябов Н.О., Семенов А.А., Чернов Е.В., Богачек Л.Н. Физические и конструкционные особенности ядерных энергетических установок с ВВЭР. – М.: НИЯУ МИФИ, 2011. – 376 с.
10. Поваров В.П., Лебедев О.В., Макеев В.В. Предупреждение и подавление аксиальных ксеноновых колебаний в активной зоне ВВЭР-1000. // Теплоэнергетика. – 2003. – Т. 5. – С. 11-15.
11. Аверьянова С.П., Косоуров К.Б., Семченков Ю.М. Исследование ксеноновых переходных процессов в ВВЭР-1000 на Тяньваньской АЭС (Китай). // Атомная энергия. – 2008. – Т. 105. – № 4. – С. 183-190.
12. Андрушечко С.А., Афров А.М., Васильев Б.Ю., Генералов В.Н., Косоуров К.Б., Семченков Ю.М., Украинцев В.Ф. АЭС с реактором типа ВВЭР-1000 от физических основ эксплуатации до эволюции проекта. – М.: Логос, 2010. – 604 с.
13. Аверьянова С.П., Филимонов П.Е. Ксеноновая устойчивость ВВЭР-1200. // Атомная энергия. – 2009. – Т. 107. – № 6. – С. 348-351.
14. Косоуров К.Б., Паплов В.И., Аверьянова С.П., Алешин С.С. и др. Разработка технического проекта РУ АЭС-2006. – Отчет о научно-исследовательской работе НИЦ «Курчатовский институт». Инв. № 32/1-79-310 от 26.08.2010. – С. 324-378.
15. Максимов М.В., Беглов К.В., Каназирский Н.Ф. Управление аксиальным офсетом ядерного реактора при маневрировании мощностью. // Автоматизация технологических и бизнес-процессов. – 2015. – Т. 7. – № 1. – С. 54-61.
16. Будникова О.А., Выговский С.Б., Зимин В.Г., Кориковский К.П., Краюшкин Ю.А., Мищеврин С.А., Осадчий М.А., Семенов А.А., Страшных В.П., Чернов Е.В., Чернаков В.А. Программный комплекс «ПРОСТОР» (версия 1). Приложение к аттестационному паспорту № 182 от 28.10.2004. – М.: ВНИИАЭС, 2004. – 8 с.
17. Анохин А.Ю., Цибульский В.Ф., Давиденко В.Д. Программный комплекс UNK для детального расчета спектра нейтронов в ядерных реакторах. – Отчет ИЯР/РНЦ «КИ». Инв. № 35-410-4/81 от 18.05.2001. – М.: ИЯР/РНЦ «Курчатовский институт», 2001.
18. Выговский С.Б., Королев С.А., Чернов Е.В., Семенов А.А., Чернаков В.А. Опыт использования программного комплекса «ПРОСТОР» в расчетной поддержке эксплуатации АЭС с ВВЭР. // Ядерная физика и инжиниринг. – 2014. – Т. 5. – № 1. – С. 15-28.

Поступила в редакцию 01.04.2019 г.

Авторы

Аль Малкави Рашдан Талал, канд. техн. наук.

E-mail: rashdanmalkawi@gmail.com

Выговский Сергей Борисович, доцент, канд. техн. наук

E-mail: vigovskii@mail.ru

Батайне Осамэ Васеф, магистр

E-mail: batainehosama@yahoo.com

UDC 621.039.50

INVESTIGATION OF THE IMPACT OF STEADY-STATE VVER-1000 CORE CHARACTERISTICS ON THE REACTOR STABILITY WITH RESPECT TO XENON OSCILLATIONS

Al Malkawi R.T., Vygovsky S.B., Batayneh O.W.

National Research Nuclear University «MEPhI»
31 Kashirskoe Hwy, 115409 Moscow, Russia

ABSTRACT

The article presents a method for obtaining an analytical expression for the criterion of stability of a VVER-1000 (1200) reactor with respect to xenon oscillations of the local power in the core, containing an explicit dependence of the criterion ratio coefficients on the arbitrary axial neutron field distribution in steady states of the core. Based on the data of numerical experiments using a full-scale model of the Kalinin NPP power units, the authors present the results of checking the validity of this expression for the reactor stability criterion with respect to xenon oscillations for different NPPs with VVER-1000 (1200) reactors in the conditions of load-following modes and non-steady-state reactor xenon poisoning, which can lead to xenon oscillations of the local power throughout the reactor core with VVER-1000 (1200). In this case, the task is to ensure the reactor stability in relation to xenon oscillations of the local power in the core. If the stability problem is not solved, the axial oscillations of xenon can become continuous and, accordingly, be accompanied by an unlimited number of cycles of local power oscillations. This will lead to cyclic thermal loads on the fuel element claddings, which can change the thermomechanical properties of the cladding material, since this affects safe operation of the reactor core.

Key words: reactor stability, xenon oscillations, axial offset, VVER-1000 (1200), flexible (load tracing) operating modes.

REFERENCES

1. Vygovsky S.B., Al Malkawi R.T., Khachatryan A.G. A research of control algorithms for the VVER-1200 reactor core in the condition of maneuvering (load following) modes. *Proc. of the XVth International Conference on the Safety of Nuclear Power Plants and Personnel Training*. Obninsk. IATENIYaU MIFI Publ., 2018, pp. 117-119 (in Russian).
2. Averyanova S.P., Dubov A. A., Kosourov K. B., Semchenkov Yu. M., Filimonov P. E. VVER-1200/1300 operation in a daily load schedule. *Atomnaya Energiya*. 2012, v. 113, no. 5, pp. 247-252 (in Russian).
3. Averyanova S.P., Vohmyanina N.S., Zlobin D.A., Filimonov P.E., Kuznetsov V.I., Lagovsky V.B. Offset-power phase diagram method to control the energy release of the reactor. *Atomnaya Energiya*. 2016, v. 121, no. 3, pp. 123-127 (in Russian).
4. Bell G.J., Glasstone S. *Theory of Nuclear Reactors*. Moscow. Mir Publ., 2001, 301 p. (in Russian).
5. Hitchcock A. *Stability of Nuclear Reactors*. Moscow. Gosatomizdat Publ., 1963, 68 p. (in Russian).
6. Rudik A.P. *Xenon Transients in Nuclear Reactors*. Moscow. Atomizdat Publ., 1974, 117 p. (in Russian).
7. Semenov V.K., Volman M.A. On the question of xenon oscillations in a nuclear reactor. *Vestnik Ivanovskogo Gosudarstvennogo Energeticheskogo Universiteta*. 2015, v. 2, pp. 15-20 (in Russian).
8. Ryabov N.A., Semenov A.A. Study of point model for xenon oscillations. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zavedenij. Yadernaya Energetika*. 2006, no. 2, pp. 66-73 (in Russian).

9. Vygovsky S.B., Ryabov N.O., Semenov A.A., Chernov E.V., Bogachek L.N. *Physical and Structural Features of Nuclear Power Plants with VVER*. Moscow. NRNU MEPhI Publ., 2011. 376 p. (in Russian).
10. Povarov V.P., Lebedev O.V., Makeev V.V. Prevention and Suppression of Axial Xenon Oscillations in the VVER-1000 Core. *Teploenergetika*. 2003, v. 5, pp. 11-15 (in Russian).
11. Averyanova S.P., Kosourov K. B., Semchenkov Yu. M. Study of xenon transients in VVER-1000 at Tianwan NPP (China). *Atomnaya Energiya*. 2008, v. 105, no. 4, pp. 183-190 (in Russian).
12. Andrushechko S.A., Afrov A.M., Vasilyev B.Yu., Generalov V.N., Kosourov K.B., Semchenkov Yu.M., Ukraintsev V.F. *NPP with the VVER-1000 Reactor from the Physical Foundations of the Operation Until the Evolution of the Project*. Moscow. Logos Publ., 2010, 604 p. (in Russian).
13. Averyanova S.P., Filimonov P.E. Xenon stability of VVER-1200. *Atomnaya Energiya*. 2009, v. 107, no. 6, pp. 348-351 (in Russian).
14. Kosourov K.B., Paplov V.I., Averyanova S.P., Aleshin S.S. *Development of the Technical Project of NPP-2006*. Report of NRC Kurchatov Institute. Inventory No. 32/1-79-310, August 26, 2010, pp. 324-378 (in Russian).
15. Maksimov M.V., Beglov K.V., Kanazirsky N.F. Control of the Axial Offset in a Nuclear Reactor in the Condition of Maneuvering Regimes. *Avtomatizatsiya Tekhnologicheskikh i Biznes-Processov*. 2015, v. 7, no. 1, pp. 54-61 (in Russian).
16. Vygovsky S.B., Zimin V.G., Chernov Ye.V., Korikovskiy K.P., Krayushkin Yu.A., Mishcherin S.A., Osadchy M.A., Semyonov A.A., Strashnykh V.P., Chernov E.V., Chernakov V.A. *PROSTOR Software Complex (Ver. 1)*. The Appendix to the Certification Passport № 182 from October 28, 2004. Moscow. VNIIAES Publ., 8 p. (in Russian).
17. Anokhin A. Yu., Tsibulsky V.F., Davidenko V.D. *The UNK Program Complex for Detailed Calculation of the Neutron Spectrum in Nuclear Reactors*. Moscow. Report of NRC «Kurchatov Institute». Inventory No. 35-410-4/81, May 18, 2001 (in Russian).
18. Vygovsky S.B., Korolev S.A., Chernov E.V., Semenov A.A., Chernakov V.A. Experience of using the PROSTOR software package in the calculation support for the operation of nuclear power plants with VVER. *Yadernaya Fizika i Inzhiniring*, 2014, v. 5, no. 1, pp. 15-28 (in Russian).

Authors

Al Malkawi Rashdan Talał, Cand. Sci. (Engineering)
E-mail: rashdanmalkawi@gmail.com

Vygovsky Sergey Borisovich, Associate Professor, Cand. Sci. (Engineering)
E-mail: vigovskii@mail.ru

Batayneh Osama Wasef, Master Student
E-mail: batainehosama@yahoo.com