

УДК 621.039.50
PACS 28.41.–i

ОПЕРАТИВНАЯ ОЦЕНКА СХОДИМОСТИ АКСИАЛЬНЫХ КСЕНОНОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ ВВЭР-1000 И ВВЭР-1200

Крипак В.Р., Тиунов Г.А., Филимонов П.Е.
(НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва)

Контакты: Василий Романович Крипак; vrkripak@gmail.com

Переходные ксеноновые процессы в активной зоне водо-водяных энергетических реакторов ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 могут приводить к возникновению аксиальных колебаний мощности. Оперативная оценка сходимости колебаний – актуальная и не решенная в настоящее время задача эксплуатации АЭС.

Цель работы – разработка усовершенствованного метода онлайн-прогноза ксеноновых колебаний и его теоретическое обоснование.

Материалы и методы. Использованы данные экспериментов, проведенных на энергоблоке Нововоронежской АЭС, и расчетное моделирование в модифицированной программе «Имитатор реактора».

Результаты и обсуждение. Разработанный метод позволяет прогнозировать аксиальные колебания с погрешностью не более 18%. Уровень отклонений приемлемый, достоверность онлайн-прогноза была значительно повышена за счет учета затухания аксиальных колебаний. Представлено аналитическое и расчетное обоснование метода, а также результаты сравнения расчетного прогноза с экспериментальными данными.

Заключение. Усовершенствованный метод расчетного прогнозирования колебаний с учетом сходимости, интегрированный в программу «Имитатор реактора», предполагается использовать на АЭС.

Ключевые слова: ВВЭР, ксеноновая устойчивость, ксеноновые колебания, аксиальный офсет, энерговыделение, активная зона, нейтронно-физический расчет, расчетное моделирование, устойчивость реактора, энергетический реактор

Для цитирования: Крипак В.Р., Тиунов Г.А., Филимонов П.Е. Оперативная оценка сходимости аксиальных ксеноновых колебаний энерговыделения ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200. – Атомная энергия, 2024, т. 137, вып. 3–4, с. 143–146.

Финансирование. Работы выполнялись без внешнего финансирования.

Потенциальный конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Оперативное управление энерговыделением активной зоны водо-водяных энергетических реакторов ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 на практике сводится к поддержанию устойчивости реактора, определяемой технологической характеристикой равномерности энерговыделения – аксиальным офсетом (АО), в границах, зависящих от интегральной мощности W и момента топливной кампании T [1]. Вычисляют АО по формуле:

$$AO = \frac{W_v - W_n}{W} \cdot 100\%,$$

где W_v и W_n – мощность верхней и нижней половины реактора соответственно.

В случае постоянной мощности и фиксированного положения органов регулирования системы управления и защиты изменение офсета имеет характер синусоидальных колебаний – это свободные аксиальные ксеноновые колебания (далее – ксеноновые колебания), в некотором приближении их можно представить в следующем виде:

$$AO = AO^* + A \exp(\alpha t) \cos(2\pi t / T_k),$$

где t – время, ч; α – индекс стабильности; T_k – период колебаний, ч; A – начальная амплитуда колебаний, %; AO^* – равновесный офсет, отвечающий равносному распределению ксенона, %.

Ксеноновые колебания могут иметь сходящийся ($\alpha < 0$) и расходящийся ($\alpha > 0$) характер. В ряде случаев ксеноновые колебания подавляют, чтобы предупредить возможное превышение допустимых зна-

чений локальной мощности. В связи с этим штатная система внутриреакторного контроля обеспечивает расчетное прогнозирование ксеноновых колебаний. Такие расчеты выполняет входящая в ее состав программа «Имитатор реактора» версии 3.2.9 (далее – Программа) [2].

Программа работает в режиме реального времени (онлайн), рассчитывая для текущего состояния реактора распределение мощности энерговыделения в объеме активной зоны с учетом ксеноновых переходных процессов. В числе прочего вычисляется текущее значение офсета и прогнозируется его изменение в ходе ксеноновых колебаний на ближайший период времени (онлайн-прогноз).

Онлайн-прогноз выполняется на основе текущих значений АО, AO^* и dAO/dt : вычисляется амплитуда A , исходя из предположения, что индекс стабильности $\alpha = 0$ (амплитуда колебаний не меняется), а период колебаний $T = 28$ ч (опытные данные эксплуатации реактора).

Онлайн-прогноз предоставляет оператору возможность оперативно оценить текущую фазу, амплитуду и интенсивность колебаний офсета, вероятность выхода офсета за пределы рекомендуемой области. Однако точность прогноза существенно ограничена из-за условия постоянства амплитуды колебаний, тогда как на практике амплитуда может уменьшаться или увеличиваться в зависимости от мощности реактора и момента кампании.

Более точный прогноз, учитывающий сходимость колебаний, можно получить с помощью Программы в автономном режиме (офлайн), когда выполняется

пошаговый расчет изменения во времени состояния активной зоны реактора, в том числе изменения офсета (офлайн-прогноз). Испытания на АЭС [2] подтверждают, что офлайн-прогноз обладает достаточно высокой точностью, но он недоступен оператору в любой момент времени (в отличие от онлайн-прогноза), поскольку его расчет довольно продолжительный.

Цель настоящего исследования состояла в разработке усовершенствованного метода онлайн-прогноза ксеноновых колебаний и его теоретическом обосновании.

РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для определения ненулевых значений индекса стабильности проведен анализ уравнений ксеноновых процессов. В работе иностранных авторов [3] отмечается близость значений, получаемых при нейтронном расчете реактора ВВЭР в одно- и двухгрупповых моделях, поэтому для простоты была рассмотрена одnogрупповая модель активной зоны в одноточечном и двухточечном приближениях.

В ходе решения системы уравнений для одноточечной модели получена зависимость индекса стабильности α от средней плотности нейтронного потока Φ^* :

$$\alpha = \frac{A_2(\beta\sigma_x\Phi^*)^2 + A_1(\beta\sigma_x\Phi^*) + A_0}{\lambda_x + \beta\sigma_x\Phi^*} \quad (1)$$

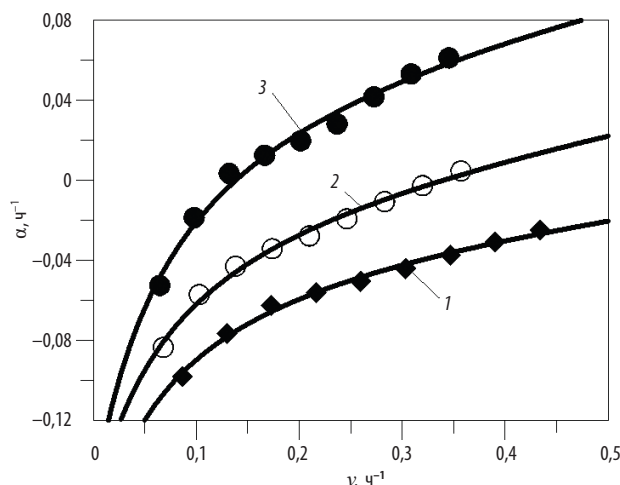
где A_0, A_1, A_2 – постоянные коэффициенты, зависящие от параметров активной зоны; Φ^* – средняя плотность потока тепловых нейтронов, н/(см²·с); λ_x – постоянная распада ¹³⁵Xe, ч⁻¹; σ_x – эффективное сечение захвата нейтронов ¹³⁵Xe, см²; β – коэффициент, учитывающий уменьшение эффективности поглощения нейтронов ксеноном за счет конкурирующих процессов поглощения на ядрах других элементов.

Рассмотрена также система уравнений ксеноновых процессов в двухточечном приближении активной зоны.

Решение уравнений относительно индекса стабильности дает выражение, аналогичное формуле (1), но зависимость коэффициентов A_0, A_1, A_2 от параметров активной зоны отлична.

Выражения для индекса стабильности, в зависимости от средней плотности нейтронного потока, полученные в ходе рассмотрения двух различных моделей активной зоны, совпадают с точностью до постоянных коэффициентов в числителе и дают реалистичные значения при подстановке характерных значений, предложенных в работе [4].

Для проверки полученных выражений в Программе выполнен расчет коэффициентов стабильности реактора ВВЭР-1000 на разных уровнях мощности и для различных моментов первой кампании. Как и в работе [5], рассматривающей ксеноновые переходные процессы, колебания возбуждались погружением и извлечением рабочей группы. На рис. 1 пред-



Графики составлены авторами на основе собственных данных

Рис. 1. Расчетные зависимости индекса стабильности (α) от величины пропорциональной средней плотности потока нейтронов (ν) для начала (1) середины (2) и конца (3) топливной кампании и их аппроксимация

ставлены рассчитанные в Программе зависимости индекса стабильности (α) от величины, пропорциональной средней плотности потока нейтронов ($\nu = \beta\sigma_x\Phi^*$), для начала, середины и конца топливной кампании вместе с их аппроксимацией функцией (1) (при условии, что A_0, A_1, A_2 – свободные коэффициенты). Пригодность функции для аппроксимации была подтверждена при помощи статистического критерия хи-квадрат с уровнем значимости 0,05.

Сопоставление расчетных зависимостей с результатами теоретического анализа показало, что теория подтверждает общую тенденцию изменения индекса стабильности в зависимости от мощности, но применение лишь одной из рассмотренных моделей не позволяет учесть некоторые характерные особенности этой зависимости. В связи с этим было принято решение искать коэффициенты A_0, A_1, A_2 путем вариантных расчетов в офлайн-режиме с последующей аппроксимацией результатов.

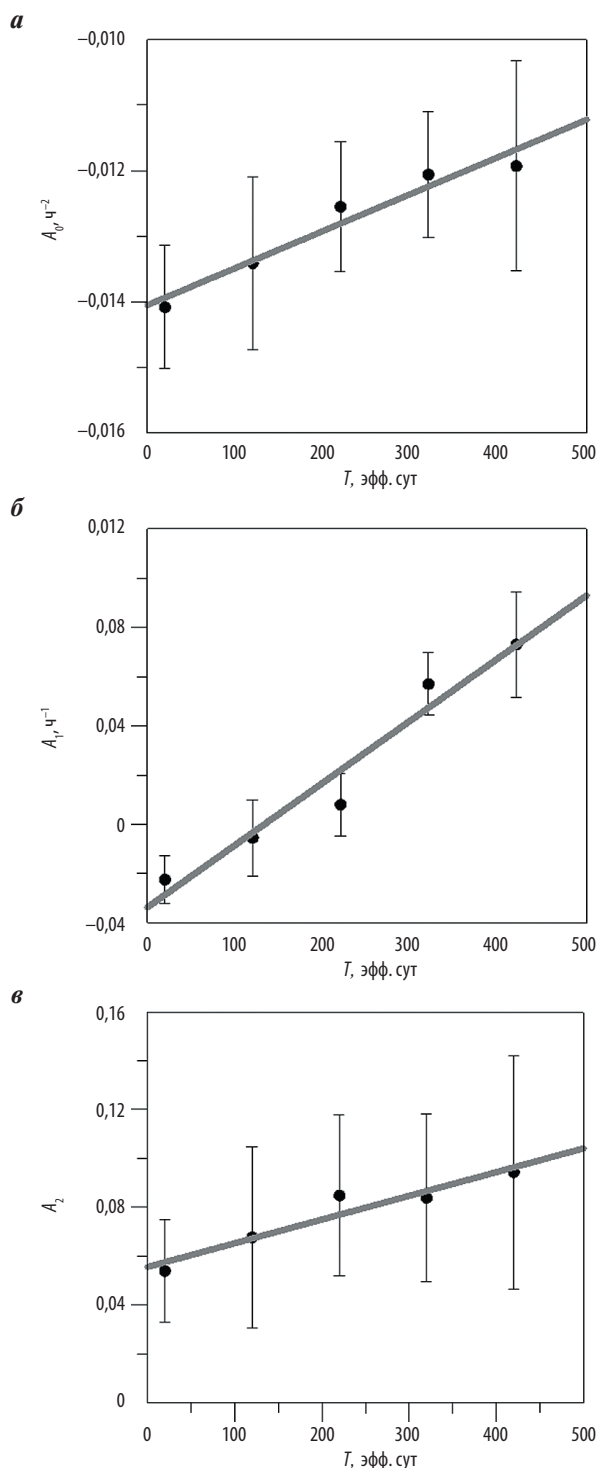
Такой подход позволяет однозначно связать индекс стабильности реактора со средней плотностью нейтронного потока в заранее определенный момент топливной кампании, которому соответствует собственный набор коэффициентов A_0, A_1, A_2 . Обобщение метода на произвольный момент топливного цикла возможно, если принять гипотезу о линейном характере изменения коэффициентов. Таким образом, проведение предварительных расчетов в офлайн-режиме позволяет функционально связать индекс стабильности реактора с моментом топливного цикла и текущим уровнем мощности при помощи следующей формулы:

$$\alpha = \frac{A_2(\sigma_x\Phi^*)^2 + A_1(\sigma_x\Phi^*) + A_0}{\lambda_x + \sigma_x\Phi^*}$$

где $A_i = k_i T + b_i$ (i – индекс, принимающий значения 1, 2, 3), где T – момент топливного цикла в эффективных сутках (эфф. сут); k_i и b_i – аппроксимационные

коэффициенты, определяемые в ходе обработки результатов предварительных расчетов.

На рис. 2 представлены зависимости A_i от момента топливной кампании, полученные путем аппроксимации результатов, рассчитанных в Программе. Их пригодность для аппроксимации была подтверждена при помощи статистического критерия хи-квадрат с уровнем значимости 0,05.



Графики составлены авторами на основе собственных данных

Рис. 2. Расчетные зависимости коэффициентов A_0 (а), A_1 (б), A_2 (в) от момента топливной кампании (T) и их линейные аппроксимации

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Свободные аксиальные ксеноновые колебания, как правило, не происходят в ходе штатной эксплуатации энергоблока ВВЭР, поэтому для их изучения проводят специальные эксперименты. Для подтверждения эффективности предлагаемого в данной работе метода рассмотрим эксперимент, проведенный на энергоблоке № 6 Нововоронежской АЭС с ВВЭР-1200 в начале первой кампании [2]. Эксперимент проводился при мощности реактора 75%. После этапа возбуждения ксеноновых колебаний (9 ч) наблюдались свободные аксиальные колебания (57 ч). В начале и через 27 ч после начала регистрации колебаний в Программе были выполнены в офлайн-режиме два расчетных прогноза дальнейшего развития колебаний.

Для условий представленного выше эксперимента были рассчитаны коэффициенты A_0, A_1, A_2 , проведен расчетный прогноз в модифицированной Программе в зависимости от состояний реактора, записанных в ходе проведения эксперимента. На рис. 3, 4 представлены зависимости АО от времени, полученные в ходе эксперимента, рассчитанные в Программе в офлайн-режимах, а также спрогнозированные предложенным нами методом.

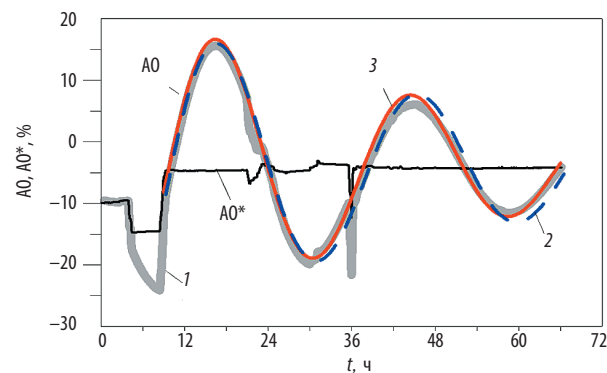


Рисунок составлен авторами на основе собственных расчетов и экспериментальных данных [2]

Рис. 3. Свободные ксеноновые колебания во времени (t) на всех этапах эксперимента: 1 – полученные на практике; 2 – в офлайн-прогнозе; 3 – в онлайн-прогнозе с учетом затухания. АО – аксиальный офсет; АО* – равновесный офсет, отвечающий равновесному распределению ксенона

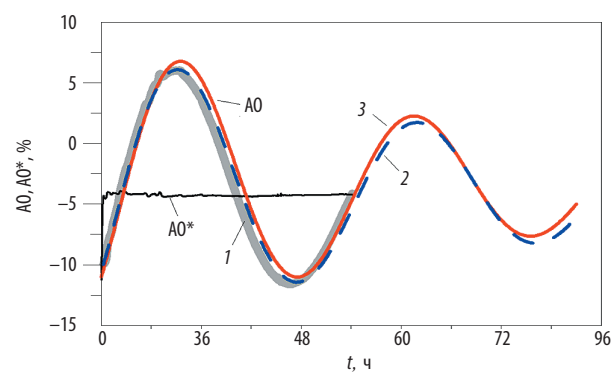


Рисунок составлен авторами на основе собственных расчетов и экспериментальных данных [2]

Рис. 4. Свободные ксеноновые колебания во времени (t) на заключительном этапе эксперимента: 1 – полученные на практике; 2 – в офлайн-прогнозе; 3 – в онлайн-прогнозе с учетом затухания. См. экспликацию под рис. 3

ПРОВЕРКА ДОСТОВЕРНОСТИ МЕТОДА

Проведено сравнение прогноза, полученного в Программе, с данными эксперимента на энергоблоке № 6 Нововоронежской АЭС (табл. 1, 2). Анализ показал достаточно высокую точность предложенного метода. В связи с отсутствием у авторов настоящей работы показательных экспериментальных или эксплуатационных данных, иллюстрирующих развитие незатухающих ксеноновых колебаний, для обоснования предлагаемого метода в данном случае был проведен офлайн-расчет в модуле Программы, настроенном на конец первой топливной кампании. Относительное отклонение амплитуды в экстремумах АО за два полных периода не превысило 13% в случае сходимости колебаний и 18% — в случае расходимости.

Таблица 1. Амплитуды ксеноновых колебаний на момент начала эксперимента

Номер экстремума	$A_{\text{real}}, \%$	$A_{\text{off}}, \%$	$A_{\text{on}}, \%$
1	20,27	20,31	20,39
2	15,31	15,14	15,19
3	10,32	11,82	11,31
4	7,40	8,99	8,42

Таблица составлена авторами на основе собственных расчетов и экспериментальных данных [2]

Примечание. Амплитуда ксеноновых колебаний: A_{real} — на практике за время всего эксперимента; A_{off} — в офлайн-расчете на момент начала эксперимента; A_{on} — в онлайн-прогнозе с учетом затухания на момент начала эксперимента. Без учета затухания показатель в онлайн-прогнозе составил 22,69%.

Таблица 2. Амплитуды ксеноновых колебаний через 27 ч от начала эксперимента

Номер экстремума	$A_{\text{real}}, \%$	$A_{\text{off}}, \%$	$A_{\text{on}}, \%$
1	10,32	10,24	10,18
2	7,40	7,38	7,60
3	—	5,73	5,67
4	—	4,29	4,23

Таблица составлена авторами на основе собственных расчетов и экспериментальных данных [2]

Примечание. Амплитуда ксеноновых колебаний: A_{real} — на практике за время всего эксперимента; A_{off} — в офлайн-прогнозе, определены на момент через 27 ч от начала эксперимента; A_{on} — в онлайн-прогнозе с учетом затухания (момент тот же — через 27 ч от начала эксперимента). Без учета затухания показатель в онлайн-прогнозе составил 14,06%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан метод оценки индекса стабильности реактора относительно аксиальных ксеноновых колебаний. Предложено аналитическое и расчетное обоснование метода. Для проверки достоверности метода проведено сравнение расчетного прогноза с реальными данными эксперимента на энергоблоке № 6 Нововоронежской АЭС. Относительное отклонение амплитуды колебаний не превысило 13% в случае сходимости колебаний и 18% — в случае расходимости. Метод интегрировали в программу «Имитатор реактора», что позволило повысить точность расчетного прогнозирования ксеноновых колебаний в режиме онлайн. Предполагается, что в дальнейшем предложенный метод оперативной оценки индекса стабильности будет использоваться на АЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Выговский С.Б., Аль Малкави Р.Т., Хачатрян А.Г. Исследование алгоритмов управления ЯЭУ с ВВЭР-1200 для реализации суточных маневренных режимов на АЭС. — Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика, 2019, вып. 2, с. 67–79. DOI: 10.26583/npe.2019.2.06
2. Averyanova S.P., Vokhmyanina N.S., Zlobin D.A. et al. Investigation of transient Xenon processes in VVER-1200 at the Novovoronezh NPP. — Atomic Energy, 2018, v. 124, iss. 4, p. 215–220. DOI: 10.1007/s10512-018-0400-y
3. Mercier B., Zeng Z., Chen L., Nuoya S. Modeling and control of Xenon oscillations in thermal neutron reactors. — EPJ Nucl. Sci. Technol., 2020, № 6, p. 48. DOI: 10.1051/epjn/2020009
4. Семенов В.В. Основные физико-технические характеристики реакторных установок ВВЭР. М.: Институт атомной энергии имени И.В. Курчатова, 1979. 48 с.
5. Соловьев Д.А., Хачатрян А.Г., Чернов Е.В., Аль Малкави Р.Т. Исследование алгоритмов подавления ксеноновых колебаний в реакторе ВВЭР-1200. — Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика, 2022, № 2, с. 37–48. DOI: 10.26583/npe.2022.2.04

Вклад авторов

Все авторы подтверждают соответствие своего авторства критериям ICMJE. Все авторы участвовали в разработке концепции исследования, написании текста рукописи, формулировке выводов. Окончательный вариант рукописи прочтен и одобрен всеми авторами.

Идентификаторы авторов

Крипак Василий Романович: SPIN-код 5566-0884
Филимонов Павел Евгеньевич: Author ID 204284

Поступила в редакцию: 16.09.2024

После доработки: 14.10.2024

Принята к публикации: 18.10.2024