

В. А. Халимончук, А. В. Кучин

Государственный научно-технический центр
по ядерной и радиационной безопасности

Внедрение в эксплуатацию на украинских АЭС новых типов топлива: состояние, конструкционные особенности, преимущества, проблемы, возможность реализации маневренных режимов

Рассмотрены конструкционные особенности новых типов ТВС, внедряемых в эксплуатацию на украинских АЭС, их преимущества по отношению к штатным сборкам, возможность реализации на их основе маневренных режимов эксплуатации ВВЭР и повышения экономичности топливоиспользования. Обсужден ряд проблем, возникающих при разработке обоснований внедрения в эксплуатацию новых типов топлива и самой эксплуатации новых типов ТВС.

В. А. Халимончук, О. В. Кучин

Впровадження в експлуатацію на українських АЕС нових типів палива: стан, конструкційні особливості, переваги, проблеми, можливість реалізації маневрених режимів

Розглянуто конструкційні особливості нових типів ТВЗ, що впроваджуються в експлуатацію на українських АЕС, їх переваги по відношенню до штатних збірок, можливість реалізації на їх основі маневрених режимів експлуатації ВВЕР та зростання економічності паливовикористання. Обговорено низку проблем, що виникають під час розробки обґрунтувань впровадження в експлуатацію нових типів ядерного палива та самої експлуатації нових типів ТВЗ.

Еще недавно основным типом ТВС, применявшихся на АЭС Украины, были ТВСМ. Данные кассеты еще до сих пор находятся в составе загрузки многих энергоблоков с ВВЭР-1000 и представляют собой гибкий пучок твэлов, скрепленных между собой с помощью дистанционирующих решеток из нержавеющей стали, которые, в свою очередь, приварены к направляющим каналам, изготовленным так же из нержавеющей стали. Эксплуатация ТВСМ в течение ряда лет обнаружила их существенный недостаток, связанный с их гибкостью, что привело в составе активной зоны из-за изгиба ТВС и их закрутки к увеличению межкассетного зазора. Увеличение межкассетного зазора приводит к всплеску потока тепловых нейтронов на периферии ТВС и, следовательно, к увеличению энерговыделения периферийных твэлов. Вследствие этого возникла необходимость при рассмотрении технического решения по эксплуатации энергоблоков с ВВЭР-1000 устанавливать более жесткие, чем предусмотренные в Проекте В-320, ограничения на объемные относительные энерговыделения ТВС. Кроме того, из-за искривления ТВС обнаружилась проблема увеличения времени падения ОР СУЗ в активную зону или их частичное невведение (застревание).

Указанные проблемы заставили разработчика топлива сконструировать принципиально новую кассету ТВСА (альтернативную), лишенную перечисленных выше недостатков. ТВСА содержит твэлы с интегрированным выгорающим поглотителем на основе оксида гадолиния и в настоящее время рекомендована к внедрению в промышленную эксплуатацию на всех АЭС Украины с ВВЭР-1000 проекта В-320. Кроме этого, новые ТВС имеют более жесткую конструкцию. Конструкция ТВСА (рис. 1) имеет 6 уголков, что обеспечивает жесткий каркас (расположение уголка жесткости представлено на рис. 2). На основе этого топлива в Украине планируется реализация четырехлетнего топливного цикла, который позволит достичь максимальной глубины выгорания топлива в 55 МВт сут/кг.

Конструкционные особенности ТВСА

К конструкционным особенностям ТВСА относятся:

- 1) использование циркониевых ДР и НК вместо стальных;
- 2) наличие уголков жесткости, укрепляющих каркас ТВСА;
- 3) применение в качестве выгорающего поглотителя Gd, интегрированного в топливо;
- 4) увеличение массы урана в ТВСА за счет снижения центрального осевого отверстия в топливной таблетке;
- 5) использование антидебризного фильтра на входе в ТВСА;
- 6) наличие модернизированной головки ТВСА;
- 7) использование новых ОР СУЗ с титанат-диспрозиевыми наконечниками.

Основные преимущества ТВСА по сравнению с ТВСМ

Использование циркониевых ДР и НК; уменьшение центрального отверстия в топливной таблетке влияет на: 1) улучшение баланса нейтронов в активной зоне за счет уменьшения непродуктивного поглощения и повышения размножающих свойств ТВС; 2) увеличение массы урана в ТВС

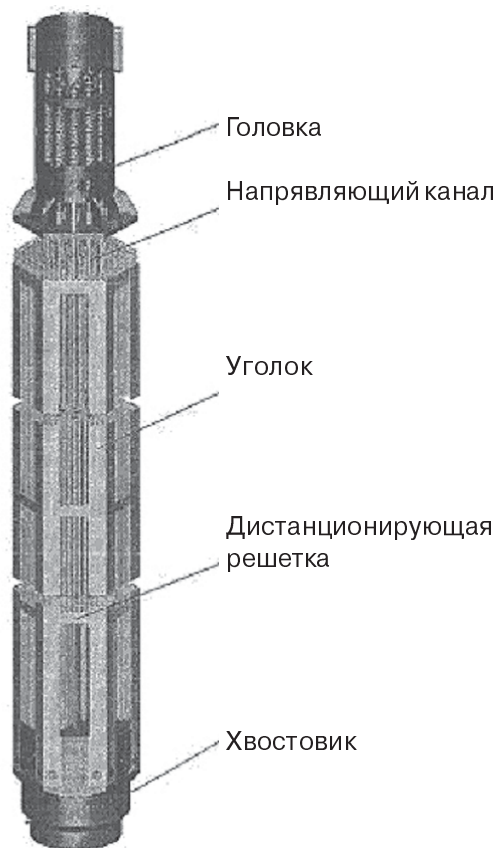


Рис. 1. Конструкция ТВСА

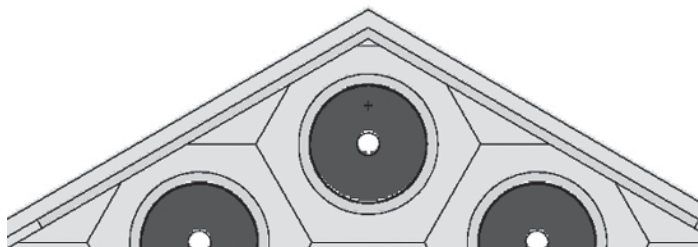


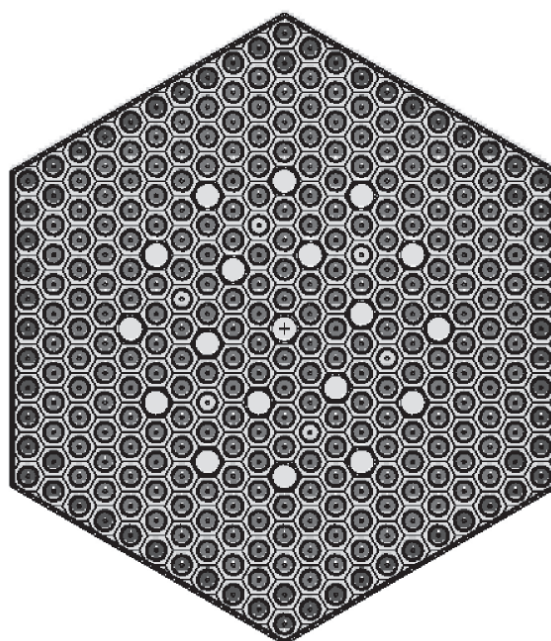
Рис. 2. Поперечное сечение ТВСА (уголок жесткости)

(около 8%), что приводит к снижению энергонапряженности топлива, уменьшению количества кассет для подпитки реактора и/или увеличению времени работы реактора между перегрузками, дает возможность перейти на четырехлетний топливный цикл и повысить глубину выгорания выгружаемого топлива; 3) снижение (благодаря использованию одного материала в активной части ТВС) термических нагрузок на каркас кассеты и исключение дополнительных усилий внутри ТВСА, возникающих в случае использования различных материалов за счет разного коэффициента линейного расширения.

Использование жесткого каркаса из уголков и дистанционирующих решеток позволило увеличить механическую стабильность топливной кассеты, что, в свою очередь, дало возможность: 1) снизить непроектные зазоры между кассетами в активной зоне и увеличить эксплуатационные пределы, связанные с влиянием межкассетного зазора на энерговыделение твэлов и твэггов; 2) снизить вероятность застревания ОР СУЗ из-за изгибов ТВС; 3) из-за увеличенной жесткости кассеты уменьшить вибронгрузки на твэл и тем самым снизить отказ (разгерметизацию) твэла; 4) умень-

шить нагрузку в месте контакта твэл/ДР, что снижает как нагрузку на каркас ТВСА из-за радиационного роста, так и вероятность разгерметизации твэла; 5) увеличить скорость транспортных операций с ТВСА и сократить время перегрузки благодаря использованию циркониевых уголков на периферии кассеты, что позволяет рассматривать их в качестве дополнительных элементов, защищающих твэл от механических воздействий.

Использование интегрированного в топливную таблетку выгорающего поглотителя (гадолиния) позволяет отказаться от СВП, снизить время перегрузки активной зоны и уменьшить количество облученных материалов, хранящихся на АЭС. В перспективе использование гадолиния может способствовать созданию более гибких топливных циклов, например цикла с пониженной утечкой для снижения флюенса на корпус реактора. Расположение твэлов и твэггов в поперечном сечении ТВСА представлено на рис. 3.



	ТВЭЛ обогащения 4,0%
	ТВЭЛ обогащения 3,6%
	ТВЭГ обогащения 3,3% (²³⁵ U) (5,0% Gd ₂ O ₃)
	направляющий канал/центральная трубка

Рис. 3. ТВСА типа 390GO

Использование нового антидебризного фильтра на входе в кассету позволяет снизить вероятность отказа твэлов из-за наличия посторонних предметов в теплоносителе первого контура.

Использование в комплекте с ТВСА нового типа ОР СУЗ с титанат-диспрозиевым наконечником позволяет увеличить время эксплуатации ОР СУЗ в активной зоне и уменьшить количество облученных материалов, хранящихся на АЭС. Время эксплуатации титанат-диспрозиевого ОР СУЗ — 2 года в составе рабочей группы или 7 лет в составе АЗ.

Использование модернизированной конструкции головки кассеты — термоголовки. Новая головка (рис. 4) позволяет устранить «пальный эффект» и повысить точность измерения температуры теплоносителя на выходе из кассеты. Устранение «пального эффекта» достигается за счет подачи горячего теплоносителя к термопарам с помощью специальной трубки.

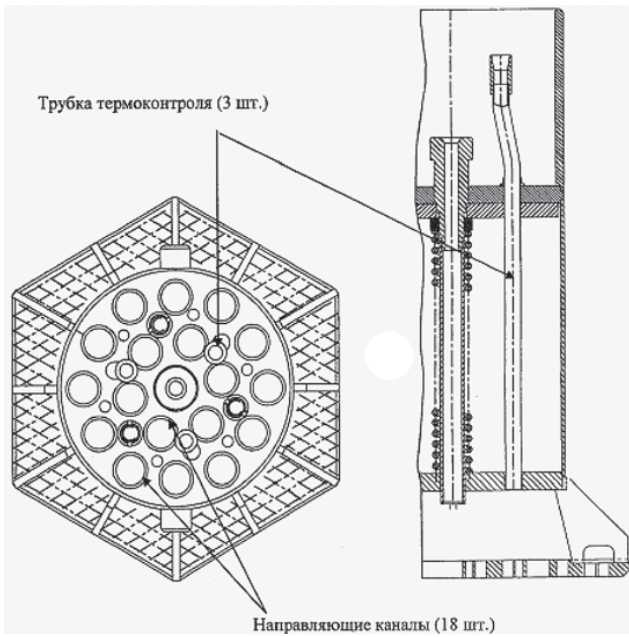


Рис. 4. Головка ТВСА с трубками термомониторинга

Топливо производства фирмы «Вестингауз»

Кроме топлива ТВСА производства России, на 3-м энергоблоке ЮУ АЭС внедрены в опытно-промышленную эксплуатацию 6 опытных сборок производства фирмы «Вестингауз». Опытная эксплуатация этих сборок является результатом совместных работ в рамках проекта ПКЯТУ, имеющих своей основной целью решение проблемы диверсификации ядерного топлива. В этих сборках применены американские сплавы, а выгорающий поглотитель в виде диборида циркония (ZrB_2) нанесен тонким слоем на поверхность отдельных твэлов. Распределение твэлов в поперечном и аксиальном сечениях в зависимости от обогащения и содержания напыленного слоя ZrB_2 представлено на рис. 5 – 8.

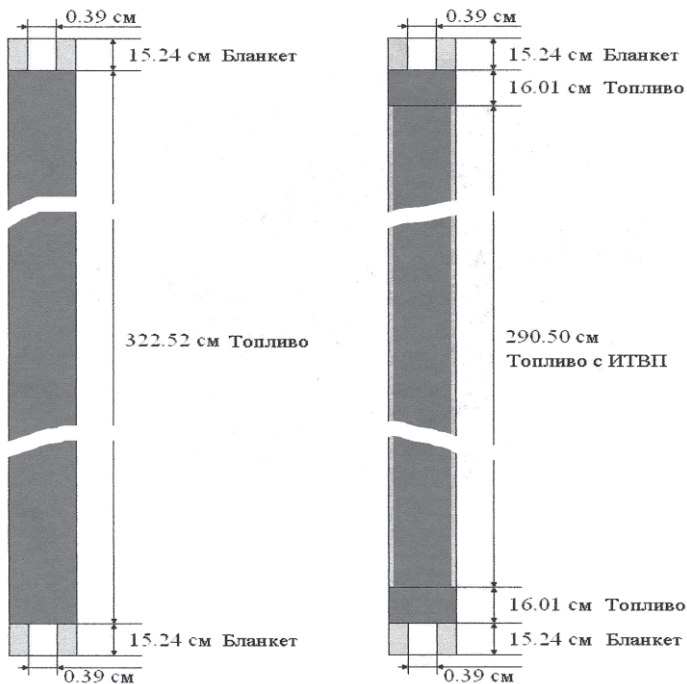


Рис. 5. Аксиальный вид модели твэла опытной ТВС-W

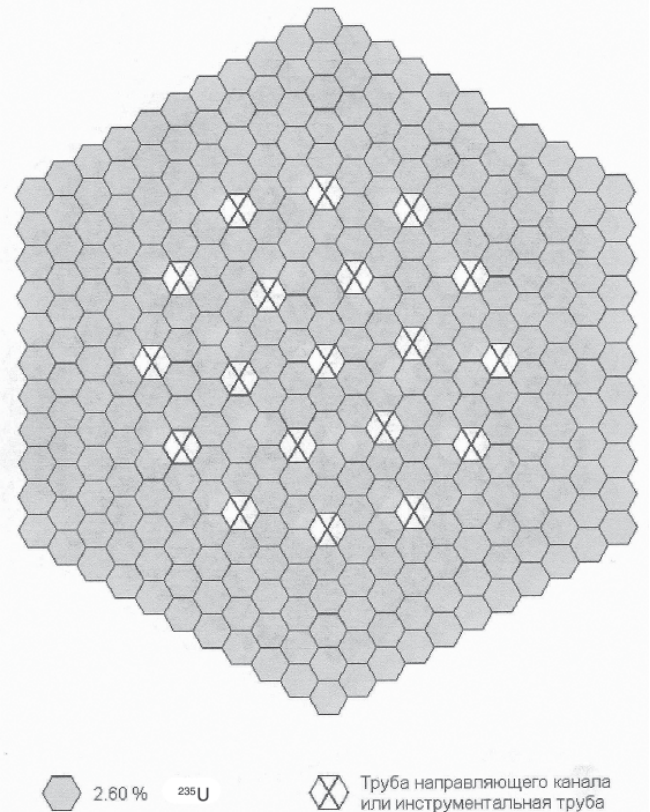


Рис. 6. Состав обогащения зоны бланкета в опытной ТВС-W

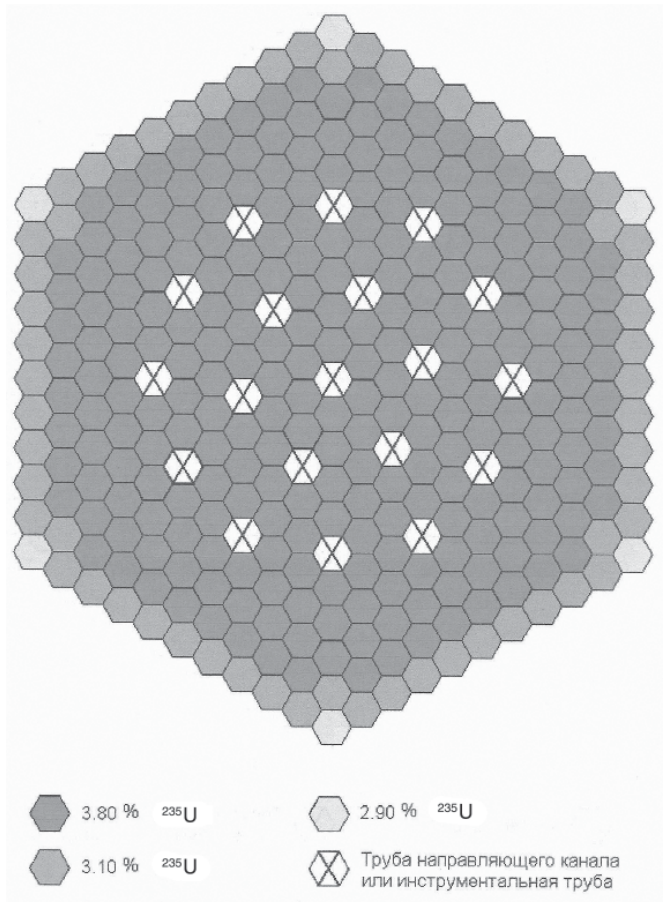


Рис. 7. Состав обогащения аксиальной зоны без ИТВП в опытной ТВС-W

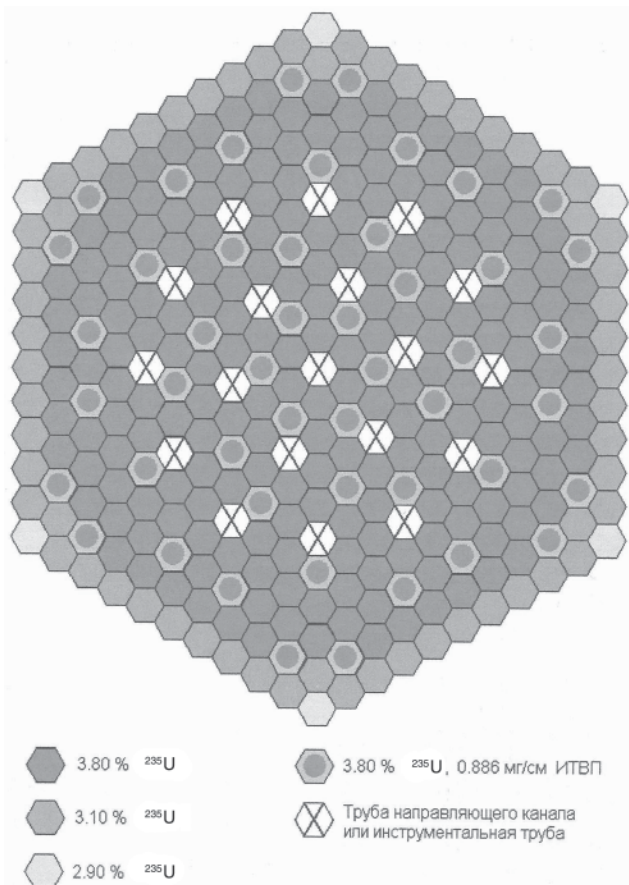


Рис. 8. Состав обогащения аксиальной зоны, содержащей 48 твэлов с ИТВП в опытной ТВС-W

Проблемы, связанные с внедрением новых типов топлива

1. Используемые в предложенном четырехлетнем топливном цикле ТВСА с обогащением в твэлах 4,4% и в шести твэгах 3,6% по урану-235 имеют размножающие свойства ниже, чем ТВСМ с обогащением 4,4%. Однако при консервативном подходе в оценках безопасности систем обращения с ядерным топливом, когда наличием выгорающего поглотителя пренебрегается, размножающие свойства для ТВСА уже будут выше; отсюда возникает проблема оценки безопасности при обращении со свежим топливом. Возможно, следует рассматривать интегрированный в топливо выгорающий поглотитель, в отличие от СВП, как неизвлекаемый, и тогда в соответствии с украинскими нормативными документами его можно будет учитывать в соответствующих оценках критичности. Такой подход возможен при условии выполнения расчетных исследований в обоснование невозможности увеличения размножающих свойств используемых ТВСА с интегрированным в топливо выгорающим поглотителем с возрастанием глубины выгорания топлива, а также при выполнении ряда дополнительных вероятностных оценок ошибочной постановки в ТВСА твэла вместо твэга.

2. Увеличение глубины выгорания выгружаемого топлива приводит к увеличению остаточного энерговыделения, что, в свою очередь, требует большего времени пребывания в БВ до передачи на хранение в ХОЯТ. В связи с этим возможны проблемы, связанные с заполняемостью БВ.

3. Внедрение в эксплуатацию новых типов ТВС и реализация на их основе новых топливных циклов связаны с разработкой значительного объема обосновывающих документов, в частности:

- анализа изменения нейтронно-физических характеристик активной зоны;
- анализа нормальных режимов эксплуатации, ННЭ и проектных аварий;
- анализа безопасности систем обращения со свежим и отработавшим топливом;
- оценки воздействия на окружающую среду.

Выполнение этих анализов требует проведения расчетов стационарных состояний активной зоны и различных переходных режимов, что невозможно без наличия мало-групповых нейтронно-физических констант (НФК) тепло-выделяющих сборок. Эти НФК могут быть подготовлены только с помощью специальных спектральных программ, позволяющих достаточно адекватно описывать состав ТВС в поперечном сечении. К сожалению, эксплуатирующая организация Украины не имеет программ такого класса и, естественно, сама не может разработать соответствующий объем обоснований. Имеющаяся в распоряжении экспертов программа аналогичного класса устарела и ее применение в экспертных оценках обоснований использования новых типов топлива с течением времени становится все проблематичней. В используемой в ГНТЦ ЯРБ программе NESSEL-4 заложена одномерная цилиндрическая модель геометрии ТВС. Для расчета распределения потока нейтронов по сечению ТВС выполняется расчет цилиндрической суперъячейки (рис. 9). Граничным условием для тепло-выделяющей сборки является равенство нулю тока нейтронов на внешней поверхности суперъячейки. Для каждой цилиндрической зоны суперъячейки определяется количество твэлов, составляющих зону. Предварительно выполняется гомогенизация твэла для каждой цилиндрической зоны (зоны гомогенизации Н1, Н3 и Н4 на рис. 9).

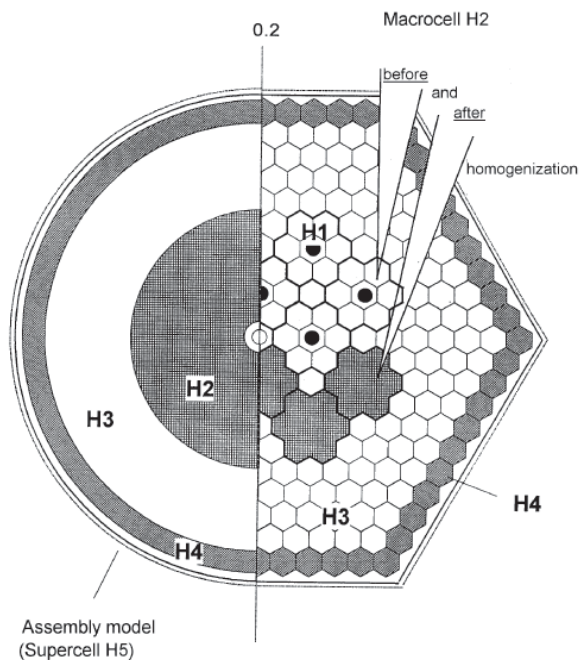


Рис.9. Схема гомогенизации ТВС ВВЭР-1000

В цилиндрической гомогенной зоне Н2 находятся поглощающие стержни системы управления и защиты реактора. Для получения гомогенных констант этой зоны вы-

полняется двухшаговая процедура гомогенизации. Вначале гомогенизируется твэл, окружающий поглощающий стержень (Н1). Затем производится расчет области, состоящей из поглощающего стержня, окруженного гомогенной областью Н1 (эквивалент шести твэлам, окружающим поглощающий стержень). Уже отсюда можно видеть, что более сложные геометрии тепловыделяющей сборки (например, поглощающий стержень окружен шестью твэлами, но имеющими разное обогащение; наличие в сечении ТВС в отдельных местах твэлов с выгорающим поглотителем и т. д.) данная программа считать не может. Даже в случае более простых геометрий ТВС качество нейтронно-физических констант зависит от выбранной процедуры пошаговой гомогенизации. В связи с этим возникает необходимость выполнения оценки качества выбранной схемы гомогенизации путем проведения сравнительных расчетов ТВС для нулевого выгорания топлива по NESSEL-4 и, например, MCNP (на основе метода Монте-Карло). Для тех ТВС, которые используются в настоящее время (с твэлами одинакового обогащения и без твэлов с выгорающим поглотителем), процедура пошаговой гомогенизации и скругления ячейки вносит погрешность в расчет K_{∞} , что в физическом расчете реактора ведет к большим погрешностям в определении поля энерговыделения, концентрации борной кислоты, коэффициентов реактивности по сравнению с тем случаем, когда малогрупповые константы готовятся по современным программам (например, CASMO или HELIOS).

На основании изложенного можно констатировать, что без современного спектрального кода выполнение экспертных оценок безопасности использования на 3-м блоке ЮУ АЭС перегрузочной партии ТВС производства «Вестингауз» уже будет практически невозможным.

Возможность реализации маневренных режимов

Повышение доли АЭС в общей установленной мощности требует от них повышенной маневренности. Несмотря на экономическую нецелесообразность разгрузки АЭС, такие режимы являются прямым следствием работы АЭС в единой энергосистеме с характерными для нее как суточными, так и годовыми колебаниями потребления электроэнергии. Эта проблема приобретает все большую значимость для Украины, где доля электроэнергии, вырабатываемой на АЭС, в зимний период составляет порядка 50% и работа в маневренном режиме становится реальным фактором нашего времени. В связи с внедрением в эксплуатацию ТВСА, обладающих более высокими механико-прочностными свойствами, реализация маневренных режимов эксплуатации планируется в первую очередь на блоках, загрузка активных зон которых полностью сформирована из кассет этого типа. Поэтому опробование реализации данного режима было запланировано на 2-м блоке ХАЭС, загрузка которого изначально формировалась на основе ТВСА. Реализация таких режимов предполагает разработку обоснования безопасности их внедрения при использовании определенных алгоритмов управления.

Следует сказать, что эксплуатация ВВЭР-1000 в переменном режиме нагрузки сопряжена с появлением ксеноновых колебаний мощности. Разработка алгоритмов подавления ксеноновых колебаний мощности в ВВЭР-1000 является актуальной задачей для обеспечения безопасной эксплуатации РУ в маневренных режимах, а также при эксплуатации блока с ВВЭР-1000 в конце кампании на мощностном эффекте реактивности. С помощью математических методов оцен-

ки устойчивости ядерных реакторов к ксеноновым колебаниям можно определить в координатной сетке «плотность потока тепловых нейтронов — коэффициент реактивности по мощности реактора ($\Phi - \alpha_w$)» зону устойчивости и неустойчивости к ксеноновым колебаниям мощности. Кривая, отделяющая зону неустойчивости (слева) от зоны устойчивости (справа) к ксеноновым колебаниям, полученная из анализа устойчивости фундаментального решения однородной стационарной задачи, представлена на рис.10. Поскольку кривая на этом рисунке получена в предположении «незацепления» более высоких гармоник и на основе ряда упрощений математической модели по отношению к реальной системе, то ее лучше использовать для качественного анализа устойчивости к ксеноновым колебаниям. Как видно из рис.10, при малых значениях потока нейтронов и потоках более 10^{15} нейтр./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ реактор устойчив к ксеноновым колебаниям. При потоках в диапазоне $10^{13} \div 10^{14}$ нейтр./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ имеется зона неустойчивости для фундаментального распределения однородной одномерной стационарной задачи и устойчивость в этом диапазоне может быть обеспечена за счет довольно большого отрицательного мощностного коэффициента реактивности.

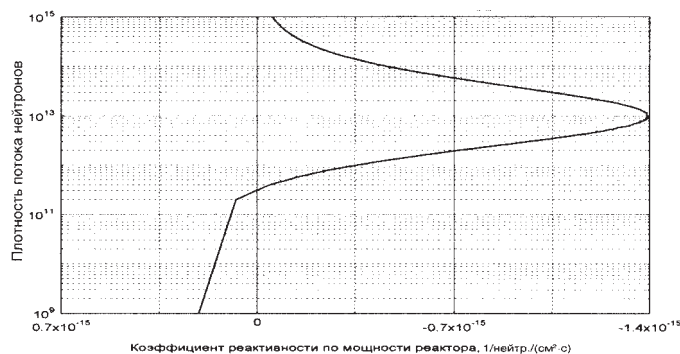


Рис. 10. Порог устойчивости к ксеноновым колебаниям для фундаментального распределения однородной одномерной стационарной задачи

Для реактора ВВЭР-1000 аксиальные ксеноновые колебания на малых уровнях мощности (потока нейтронов) как в начале кампании, так и в конце имеют затухающий характер и реактор находится в устойчивом состоянии. Неустойчивость реактора ВВЭР-1000 к аксиальным ксеноновым колебаниям мощности может появиться только на выгоревших состояниях активной зоны, когда для достижения номинального уровня мощности увеличивается поток тепловых нейтронов. В этом случае уже на уровне мощности 2200 МВт аксиальные ксеноновые колебания мощности имеют незаходящий характер, а при повышении мощности сверх 2200 МВт реактор становится неустойчивым (рис. 11, 12).

На рис. 11 и 12 представлены свободные колебания аксиального офсета (разница между мощностью нижней и верхней половин активной зоны, нормированная на полную мощность реактора). В каждом случае предполагалось, что в стационарном состоянии реактора вносится возмущение путем извлечения ОР 10-й (рабочей) группы, а внесенная благодаря этому перемещению реактивность как в начальный момент времени, так и в последующем (из-за пространственно-временного изменения концентрации ксенона-135) компенсируется только изменением концентрации борной кислоты в теплоносителе. Следует отметить, что с выгоранием активной зоны ВВЭР-1000 увеличивается и отрицательный мощностной коэффициент реактив-

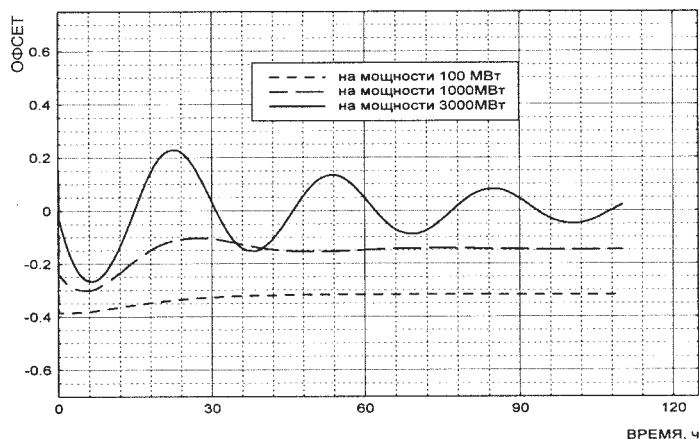


Рис. 11. Перемещение ОР СУЗ 10-й группы с 220 до 325 см от низа активной зоны в начале кампании

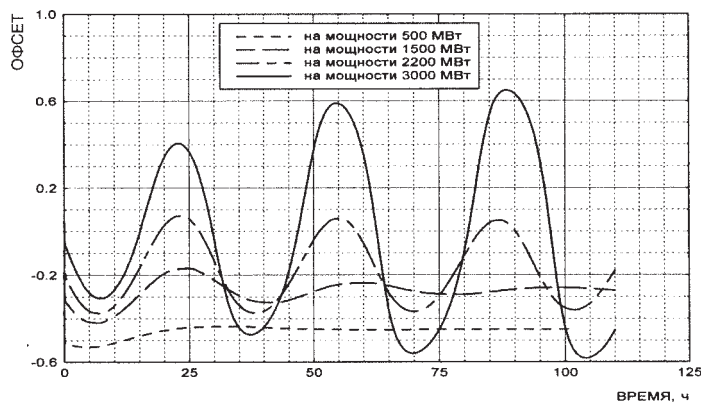


Рис. 12. Перемещение ОР СУЗ 10-й группы с 290 до 330 см от низа активной зоны в конце кампании

ности, однако он не в состоянии компенсировать дестабилизирующую роль роста потока тепловых нейтронов. Приведенные данные находятся в полном согласии с качественными результатами оценки области устойчивости (рис. 10).

Амплитуда ксеноновых колебаний мощности зависит от величины и длительности введенного возмущения, а неправильные перемещения ОР СУЗ в переходных процессах могут приводить к «расшатыванию» аксиального офсета даже в случае устойчивого состояния активной зоны по отношению к ксеноновым колебаниям мощности.

Рассмотрим некоторые результаты расчетного моделирования различных способов подавления ксеноновых колебаний, возникающих при скачкообразном уменьшении мощности реактора ВВЭР-1000 на выгоревшем состоянии активной зоны, для которого характерна ксеноновая неустойчивость. Вначале рассмотрим снижение мощности реактора скачком с 3000 на 2000 Мвт за счет изменения концентрации борной кислоты и различные варианты подавления возникающих при этом ксеноновых аксиальных колебаний. Согласно технологическому регламенту безопасной эксплуатации (ТРБЭ) при изменении мощности с 3000 до 2000 МВт (менее 75% номинальной мощности) допустимое изменение аксиального офсета должно составлять не более $\pm 15\%$ исходного значения, а в подавлении ксеноновых колебаний наряду с рабочей группой можно использовать также 5-ю группу. Как видно из рис. 13, без регулирования аксиального офсета с помощью ОР СУЗ (кривая 1) его величина в максимуме может достигать 50%. Поскольку в этом случае ксеноновые колебания имеют затухающий характер, то их подавление достигается достаточно легко. Снижение мощности реактора приводит к

большому уменьшению температуры теплоносителя и топлива в верхней части активной зоны, что из-за отрицательной температурной обратной связи вызывает большее увеличение размножающих свойств сверху и тем самым смещение офсета в отрицательную область, т. е. аксиальное распределение потока нейтронов смещается вверх. Для подавления этих колебаний с использованием 5-й группы можно найти в начальный момент переходного процесса такое положение ОР СУЗ, которое обеспечит исходное значение офсета. Погружаем в момент времени $t = 1$ ч 10-й группы ОР СУЗ с исходного положения 285 см до 248 см и 5-й группы с 355 до 248 см и постоянным удерживанием их в новом положении (кривая 2 на рис.13) ксеноновые колебания могут быть без труда подавлены. Однако в дальнейшем возникает задача — каким образом извлечь ОР СУЗ в исходное положение, не возбудив повторно ксеноновые колебания на новом уровне мощности со значительной величиной офсета (кривая 3), что, вообще говоря, не является тривиальной задачей. Так, кривая 4 на рис. 13 демонстрирует, что при неудачном извлечении ОР СУЗ можно «расшатать» аксиальное распределение энерговыделения.

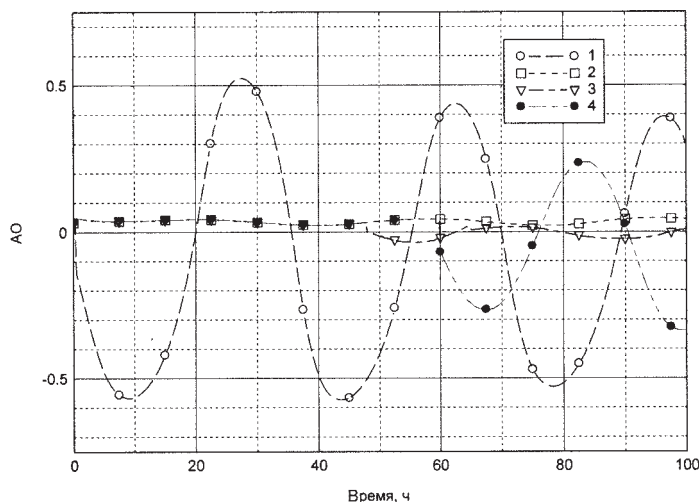


Рис. 13. Подавление колебаний АО, вызванных изменением мощности с 3000 до 2000 МВт: 1 — кривая изменения офсета при сбросе мощности с 3000 до 2000 МВт (без изменения положения рабочей группы); 2 — погружение 5- и 10-й групп до 248 см; 3 — то же, с последующим извлечением 5-й группы при $t = 48$ ч ($H_5 = 285$ см) и $t = 65$ ч ($H_5 = 355$ см); 4 — то же, с последующим полным извлечением 5-й группы при $t = 60$ ч ($H_5 = 355$ см)

Ксеноновые колебания, возникающие при скачке мощности с 3000 до 2700 Мвт на выгоревшем состоянии активной зоны, имеют ярко выраженный незатухающий характер (рис. 14, кривая 1). В этом диапазоне регулирования допустимое изменение аксиального офсета должно составлять не более $\pm 5\%$ исходного значения. Подавление ксеноновых колебаний в рассматриваемом диапазоне изменения мощности из-за их незатухающего характера представляет собой более сложную задачу, чем в ранее рассмотренном процессе снижения мощности до 2000 МВт, когда колебания подавлялись установлением рабочей и 5-й групп ОР СУЗ в начальный момент переходного режима в положение, обеспечивающее исходное значение офсета (т. е. стержни ОР СУЗ компенсировали аксиальную деформацию, вызванную влиянием обратных связей из-за изменения уровня мощности). Подавление колебаний в данном случае представляет собой процедуру непрерывного длительного регулирования.

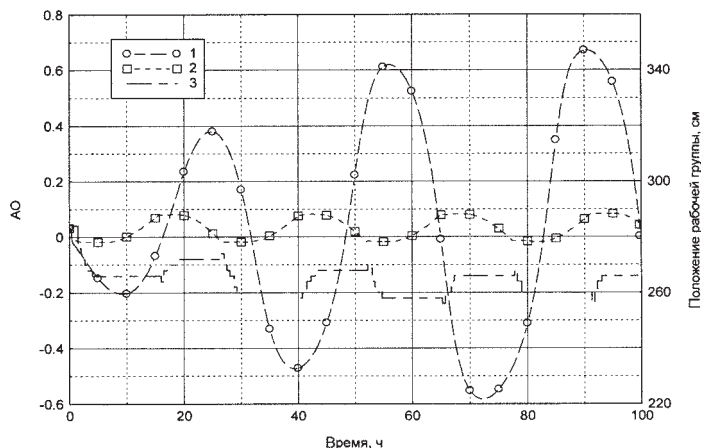


Рис. 14. Подавление колебаний АО, вызванных изменением мощности с 3000 до 2700 МВт, путем непрерывного длительного регулирования за счет перемещения регулирующей группы ОР СУЗ:

1 — кривая изменения офсета при сбросе мощности с 3000 до 2700 МВт (без изменения положения ОР СУЗ); 2 — изменение офсета при регулировании рабочей группой; 3 — положение рабочей группы ОР СУЗ

Представленное на рис. 14 подавление ксеноновых колебаний проводилось перемещением регулирующей группы при достижении АО допустимой границы, определенной в ТРБЭ ($\pm 5\%$ исходного значения). Как видно из рисунка, добиться полной стабилизации АО не удастся.

Несколько другой способ регулирования заключается в следующем. Изменение АО, возникшее в результате скачка мощности, компенсируется в начальный период переходного процесса введением 5-й группы ОР СУЗ (в данной ситуации группа погружается на высоту 294 см, при которой обеспечивается исходное значение офсета). В дальнейшем регулирование будет проводиться при достижении АО допустимой границы $\pm 5\%$, определенной в ТРБЭ. При достижении АО нижней границы регулирование осуществляется поднятием 5-й группы, а при достижении верхней — погружением регулирующей группы (рис. 15).

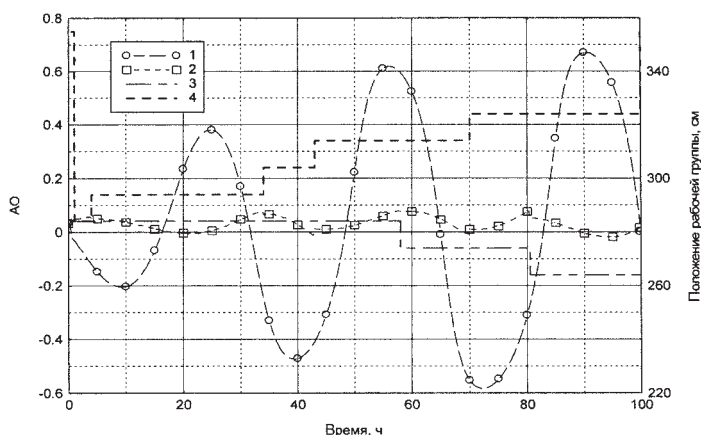


Рис. 15. Подавление колебаний АО, вызванных изменением мощности с 3000 до 2700 МВт, путем перемещения ОР СУЗ 5- и 10-й групп при достижении АО допустимой границы, определенной в ТРБЭ:

1 — кривая изменения офсета при сбросе мощности с 3000 до 2700 МВт; 2 — изменение офсета при регулировании рабочей группой; 3 — положение рабочей группы ОР СУЗ; 4 — положение 5-й группы ОР СУЗ

Однако наилучший способ подавления ксеноновых колебаний в случае, когда реактор находится в зоне неустойчивости, — регулирование рабочей группой при отклонении аксиального офсета от исходного значения менее, чем на $\pm 5\%$. В представленной на рис. 16 модели рабочая группа передвигалась на 2 см при достижении изменения АО на 0,1% за 1 ч переходного процесса. Таким образом, АО был выдержан практически неизменным в течение первых 20 ч переходного процесса, и в дальнейшем удастся стабилизировать колебания.

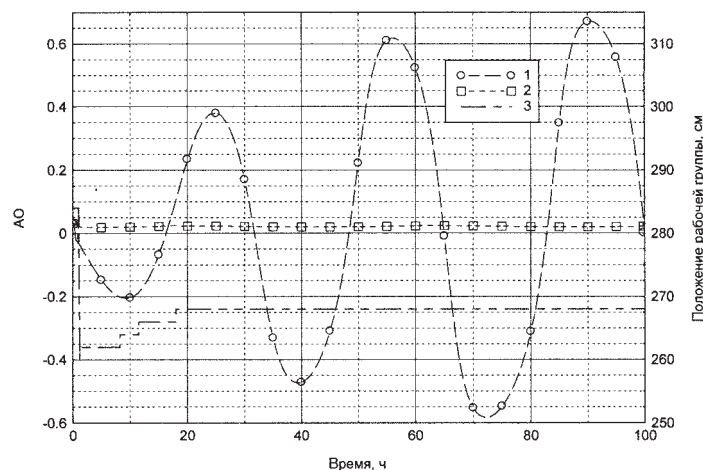


Рис. 16. Подавление колебаний АО, вызванных изменением мощности с 3000 до 2700 МВт, путем перемещения ОР СУЗ 10-й группы при малых отклонения АО от исходного значения:

1 — кривая изменения офсета при сбросе мощности с 3000 до 2700 МВт; 2 — изменение офсета при регулировании рабочей группой; 3 — положение рабочей группы

Следовательно, требуемая на сегодня эксплуатация АЭС в режиме маневрирования мощностью не является тривиальной задачей и возможна благодаря разработке специальных алгоритмов управления, внедрение которых должно быть обосновано с помощью математического моделирования в части:

выбора групп ОР СУЗ для управления полем энерговыделения и алгоритма подавления ксеноновых колебаний мощности;

обоснования допустимой глубины погружения ОР СУЗ в активную зону с точки зрения выполнения требований проекта по необходимой эффективности аварийной защиты;

обоснования невыполнения допустимых линейных нагрузок мощности;

выполнения требования к ОР СУЗ по максимально допустимой скорости ввода реактивности;

обоснования выполнения критериев приемлемости в проектной аварии, связанной с выбросом кластера. Анализ данной аварии выполняется для наиболее неблагоприятного аксиального распределения поля энерговыделения, положения ОР СУЗ и величин коэффициентов реактивности;

обоснования безопасности РУ в случае неправильного действия оператора по управлению полем энерговыделения;

обоснования работоспособности твэлов при маневрировании мощностью с заданными скоростями снижения и подъема.