

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ПОДАВЛЕНИЯ КСЕНОНОВЫХ КОЛЕБАНИЙ В РЕАКТОРЕ ВВЭР-1200

Соловьёв Д. А.* , А.Г. Хачатрян*, Е.В. Чернов*, Р.Т.Аль Малкави**

* НИЯУ МИФИ, 115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31

** ИИУР, 11934 Иордания, Амман

Р

Приведены результаты численных исследований различных алгоритмов подавления ксеноновых колебаний в активной зоне реактора ВВЭР-1200. Цель исследований – определение алгоритма, позволяющего минимизировать количество жидких отходов при водообмене в первом контуре АЭС. Рассмотрены несколько алгоритмов подавления ксеноновых колебаний.

1. Алгоритм подавления ксеноновых колебаний, использующий автоматический регулятор мощности (АРМ) для поддержания установленного значения нейтронной мощности без использования каких-либо дополнительных мер подавления колебаний.

2. Алгоритм на основе использования АРМ и борного регулирования для ускоренного инициирования работы АРМ по сравнению с его нормальной работой в автоматическом режиме при поддержании установленной мощности. В этом алгоритме помимо ускоренного инициирования работы АРМ за счет изменения концентрации борной кислоты при постоянном давлении второго контура АЭС использовалось ручное регулирование второй управляющей группы органов регулирования СУЗ.

3. Алгоритм, основанный на использовании температурного регулирования для ускоренного инициирования работы АРМ по сравнению с его нормальной работой в автоматическом режиме при поддержании установленной мощности. В этом алгоритме подавление осуществляется с помощью изменения температуры теплоносителя на входе в реактор за счет изменения давления во втором контуре в разрешенном диапазоне и привлечения второй управляющей группы органов регулирования СУЗ.

Показано, что наилучшим способом подавления колебаний, минимизирующим количество жидких отходов, является алгоритм с ускоренным инициированием АРМ за счет температурного регулирования.

Ключевые слова: ВВЭР-1200, офсетно-фазовая диаграмма, аксиальный офсет (АО), автоматический регулятор мощности (АРМ), алгоритм подавления, ксеноновые колебания, водообмен.

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ЗАДАЧИ ПРИ ПОДАВЛЕНИИ КСЕНОНОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ЛОКАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ

Целью работы является изучение различных алгоритмов подавления ксеноновых колебаний локальной мощности в объёме активной зоны, возможных в результате различных технологических причин во время эксплуатации энергоблока, и выбор из этих алгоритмов варианта, приводящего к минимальному количеству жидких отходов при водообмене в первом контуре при обеспечении всех требований по безопасной эксплу-

© Соловьёв Д. А., А.Г. Хачатрян, Е.В. Чернов, Р.Т. Аль Малкави, 2022

атации оборудования активной зоны. Задача минимизации водообмена является очень важной при эксплуатации для снижения нагрузки на химический цех по очистке воды, особенно ближе к концу кампании реактора.

Дело в том, что ближе к концу кампании необходимые затраты по водообмену для компенсации выгорания топлива существенно увеличиваются. В соответствии с [1 – 3] известна формула для расчета жидких отходов

$$\Delta M = -M_1 \ln(1 - \Delta C / (C^* - C)), \quad (1)$$

где ΔM – масса теплоносителя, который нужно ввести в первый контур для изменения концентрации борной кислоты $C_{\text{HЗВОЗ}}$ от текущей величины C до величины $C + \Delta C$; M_1 – масса теплоносителя в первом контуре (порядка 280 т); C^* – концентрация борной кислоты в подпитке (40 г/кг для концентрата; 0 г/кг для дистиллята, т.е. $C^* = 40$ г/кг при $\Delta C > 0$; $C^* = 0$ при $\Delta C < 0$; $C^* = 0.1$ при $|\Delta C| < C/2$).

Из формулы (1) следует существенное увеличение количество жидких отходов при снижении критической концентрации борной кислоты и вводе дистиллята при удалении кислоты из воды.

В работе приводятся результаты численных исследований различных алгоритмов подавления ксеноновых колебаний в активной зоне реактора ВВЭР-1200. Цель исследований – определение алгоритма, позволяющего минимизировать количество жидких отходов при водообмене в первом контуре АЭС. Для этого рассматривались несколько алгоритмов подавления ксеноновых колебаний [4 – 7].

При реализации конкретного алгоритма управления при подавлении ксеноновых колебаний кроме экономии водообмена необходимо обеспечить ряд требований по обеспечению безопасной эксплуатации оборудования активной зоны [8, 9]. Для обеспечения нормальной эксплуатации активной зоны, в первую очередь, должны выполняться следующие условия:

- 1) $\max(T_{cl}) - (T_{st}(P-1K) + 2) < 0$;
- 2) $\max(Q_{\text{лмвэл}} - 0.95Q_{\text{лмвэл lim}}) < 0$ – максимальная разница расчетно-измеренных и предельных величин тепловой нагрузки на твэлы по всем контрольным точкам зоны;
- 3) $\min(DNBR) < 1.35$ – по всем контрольным точкам зоны.

В этих неравенствах $T_{st}(P-1K)$ – температура насыщенной воды при давлении теплоносителя в первом контуре; T_{cl} – температура наружной поверхности оболочки твэла, °С; $Q_{\text{лмвэл}}$ – линейная нагрузка на твэл, Вт/см; $DNBR$ – коэффициент запаса до кризиса теплообмена на поверхности твэла.

Главным требованием при нормальной эксплуатации в условиях колебаний локальной мощности является выполнение второго условия из указанного перечня.

Помимо указанных требований для обеспечения контроля полевых ограничений локальной мощности в активной зоне при циклических тепловых нагрузках на топливный элемент служат офсетно-мощностная и офсетно-офсетная диаграммы в текущий момент кампании. Офсетно-мощностная диаграмма определяет разрешенную область значений аксиального офсета мощности реактора во время работы энергоблока в зависимости от величины мощности [10]. Значение аксиального офсета AO определяется так:

$$AO = [(W_1 - W_2) / W_0] \cdot 100\%,$$

где W_0 – мощность реактора; W_1 – мощность верхней половины зоны; W_2 – мощность нижней половины зоны.

Применение офсетно-мощностной фазовой диаграммы обеспечивает выполнение проектного критерия по непревышению окружных напряжений в оболочке топливного элемента, которые не должны превышать допустимых значений при изменении локальной мощности в результате изменения высотного распределения энерговыделения.

Базовым источником получения офсетно-мощностной диаграммы являются полевые ограничения локальной мощности, которые должны быть меньше допустимых значений

локальной мощности во всем объеме активной зоны. Под локальной мощностью понимается линейная тепловая мощность Q_l , приходящаяся на тепловыделяющий элемент. Другим условием является необходимость минимизировать отклонения значений локальной мощности в различных состояниях активной зоны от стационарных значений на номинальной мощности, при которых надежно достигается не превышение значений локальной мощности по объему активной зоны по данным СВРК. Выполнение этого условия не приводит к накоплению усталостных повреждений в топливных элементах при циклических нагрузках во время колебаний локальной мощности в процессе их подавления. Разработка метода офсетно-мощностной фазовой диаграммы для управления распределением энерговыделений в активной зоне принадлежит НИЦ «КИ» и ВНИИНМ [11, 12].

ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АРМ ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ КСЕНОНОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

В настоящее время регулирование мощности энергоблока с реакторами ВВЭР осуществляется с помощью АРМ и системы регулирования турбины. В каком бы режиме ни работал АРМ, он инициирует движение управляющих групп органов регулирования СУЗ для поддержания заданной мощности реактора или турбины. При снижении мощности группы органов регулирования двигаются вниз, а при повышении мощности – вверх, и тем самым влияют на аксиальный офсет нейтронной мощности. При этом указанное движение групп и его влияние на аксиальный офсет происходит таким образом, что выполняется и другая немаловажная функция управления – повышение устойчивости реактора по отношению к высотным колебаниям локальной мощности при сохранении интегральной мощности [13].

При колебаниях мощности, наведенных ксеноновыми процессами в активной зоне, движение рабочей группы совершается в противофазе с изменением офсета, что подавляет колебания [14].

Саморегулирование аксиального офсета с помощью АРМ справедливо только при положении управляющих групп выше 50%-го извлечения из активной зоны. При погружении группы органов регулирования ниже 50% происходят сдвиг нейтронного поля вверх и увеличение значения аксиального офсета, приводящее к возникновению положительной обратной связи между величиной интегральной мощности и величиной аксиального офсета мощности.

Из-за регламентных ограничений работа реактора без управляющих воздействий в режиме свободных колебаний возможна только в относительно небольшом диапазоне мощности и офсета. В частности, на номинальном уровне мощности ее значение должно поддерживаться с погрешностью $\pm 2\%$, что обеспечивается за счет перемещения рабочей группы под управлением АРМ. При возникновении колебаний с амплитудой, превышающей величину $\pm 2\%$ с возможным выходом значений аксиального офсета за пределы границ разрешенной области, определяемой офсетно-мощностной диаграммой, требуется инициирование работы АРМ в ускоренном режиме. Инициировать работу АРМ можно за счет борного и температурного регулирований. Борное регулирование обеспечивается вводом концентрата бора в случае необходимости извлечения группы органов регулирования или дистиллята при необходимости погружения группы. Инициировать работу АРМ можно за счет температурного регулирования с помощью изменения давления во втором контуре. Температурное регулирование обеспечивается увеличением давления второго контура при необходимости извлечения группы органов регулирования или снижением давления, если нужно погружать группу.

Сформулируем основные черты алгоритма управления с использованием АРМ для подавления ксеноновых колебаний локальной мощности. При заданной мощности определяется значение аксиального офсета на его оптимальной траектории в рамках офсетно-мощностной фазовой диаграммы для рассматриваемого момента кампании. При этом оп-

ределяется разрешенный коридор отклонений от оптимального значения, равный $\pm 1.5\%$. Контролируемыми величинами являются значения аксиального офсета, нейтронной мощности и его производной по времени. Действия по инициированию АРМ производятся на основе контроля производной офсета, её величины и знака. При положительности производной и её величины по модулю более $1\%/ч$ при отклонениях офсета от оптимального значения на величину по модулю более 2% необходимо ввести положительную реактивность – уменьшить концентрацию бора в воде на величину от $0,003$ до $0,01$ г/кг или (и) уменьшить температуру теплоносителя на входе в зону на величину от $0,3$ до $1,0^\circ\text{C}$ с последующим извлечением управляющей группы неиспользуемой АРМ, если это возможно. Диапазон движения другой управляющей группы органов регулирования – от 90 до 100% извлечения, т.е. положение второй управляющей группы ограничено не более, чем 10% -м погружением. При отрицательной производной и её величины по модулю более $1\%/ч$ при отклонениях офсета от оптимального значения на величину по модулю более 2% необходимо ввести отрицательную реактивность – увеличить концентрацию бора в воде на величину от $0,003$ до $0,01$ г/кг или (и) увеличить температуру теплоносителя на входе в зону на величину от $0,3$ до $1,0^\circ\text{C}$ с последующим погружением неиспользуемой управляющей группы АРМ, если это возможно.

Описанные действия регулирования для инициирования работы АРМ в нужном направлении имеют разные затраты по водообмену. Если всё управление производить с помощью только борного регулирования, то такой алгоритм подавления колебаний приведет к накоплению большого количества жидких отходов особенно в конце кампании, когда критическая концентрация борной кислоты низкая и в соответствии с (1) необходимы большие затраты чистой воды для достижения нужного разбавления. Поэтому наиболее целесообразным представляется алгоритм с использованием температурного регулирования и привлечением второй управляющей группы, который может обойтись без затрат по водообмену.

Для проведения численных исследований описанных алгоритмов управления использовался программный комплекс ПРОСТОП с моделями реактора ВВЭР-1200 [15, 16]. Данный комплекс является многофункциональным анализатором режимов в реакторе ВВЭР-1200 по проекту АЭС-2006 и представляет собой интегрированный программно-технический комплекс для решения различных задач в инженерной поддержке эксплуатации оборудования активной зоны.

ОПИСАНИЕ ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ АЛГОРИТМОВ ПОДАВЛЕНИЯ КСЕНОНОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

Для моделирования режима работы реактора в течение нескольких суток использовалась только модель реактора с заданием зависимости температуры теплоносителя на входе в зону от интегральной мощности реактора и давления во втором контуре в соответствие с эксплуатационными данными:

$$T_{in} = 297 + 0.12(N - N_0) + 9(P - P_0), \quad (2)$$

где T_{in} – температура теплоносителя на входе в реактор; N – текущая мощность реактора, %; N_0 – номинальная мощность реактора, %; P – текущее давление второго контура, МПа; $P_0 = 6.8$ МПа.

В соответствии с (2) пределы температурного регулирования при значении 90% номинальной мощности определяет диапазон от 294.0 до 297.6°C .

Метод первоначального возбуждения колебаний непринципиален для исследования алгоритмов их подавления. Использованный метод возбуждения ксеноновых колебаний заключался в следующих действиях. При заданной 90% мощности реактора погружалась 12-я рабочая группа органов регулирования на 20% ($90\% - 70\%$) при сохранении постоянной мощности за счет борного регулирования; далее группа оставалась в этом положении в течение двух часов и возвращалась в исходное 90% -е положение

высоты извлечения. Так возникали ксеноновые колебания аксиального офсета.

Для исследования различных алгоритмов подавления рассматривалась первая топливная загрузка для энергоблока № 6 Нововоронежской АЭС в конце кампании на 320 эффективных сутках, так как для этой загрузки и момента кампании реактор по отношению ксеноновых колебаний неустойчив и колебания имеют расходящийся характер. Для данного момента кампании была построена офсетно-мощностная диаграмма (рис. 1).

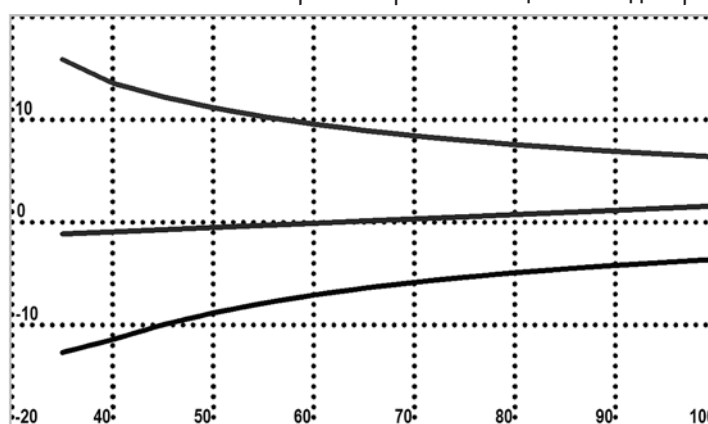


Рис. 1. Офсетно-мощностная фазовая диаграмма

Для данного исходного состояния реактора после возбуждения свободных ксеноновых колебаний было проведено моделирование физических процессов в активной зоне без использования какого-либо способа подавления колебаний «вариант 1» и с использованием вышеописанных алгоритмов управления:

- с использованием только работы АРМ «вариант 2»;
- с использованием АРМ, борного регулирования и ручного управления второй управляющей группой ОР СУЗ «вариант 3.1»;
- с использованием АРМ, борного регулирования, ручного управления второй управляющей группой ОР СУЗ и удержанием рабочей группы органов регулирования в регламентных пределах (70 – 90%) в завершающей фазе подавления колебаний «вариант 3.2»;
- с использованием АРМ, температурного регулирования и ручного управления второй управляющей группой ОР СУЗ «вариант 4.1»;
- с использованием АРМ, температурного регулирования и ручного управления второй управляющей группой ОР СУЗ и удержанием рабочей группы органов регулирования в регламентных пределах в завершающей фазе подавления колебаний «вариант 4.2».

Работа АРМ происходила при переключении режима движения управляющих групп органов регулирования с перехватом движения (ПД) на режим использования только одной 12-й рабочей группы ОР СУЗ; второй управляющей группой была 11-я группа, которая использовалась для ручного управления.

Для вариантов 3 и 4 после стабилизации поведения аксиального офсета по времени были рассмотрены дополнительно два способа управления (3.2 и 4.2). Эти способы заключаются в следующем. Для первого способа температурное и борное регулирование происходило исключительно для удержания аксиального офсета вблизи равновесного значения без контроля положения рабочей группы. В этом случае группа могла выйти за регламентные ограничения по высоте извлечения из активной зоны. Для второго способа температурное и борное регулирование происходило не только для удержания аксиального офсета вблизи равновесного значения, но и для удержания положения рабочей группы в регламентных пределах. Моделирование проводилось в течение не менее 160-ти часов [17, 18].

Сразу после возбуждения колебаний вышеописанным способом начинается разот-

равление верхней зоны реактора и офсет начинает увеличиться и, чтобы изменить тенденцию роста, снижаем температуру теплоносителя при входе в реактор или концентрацию борной кислоты в теплоносителе [19, 20]. В реактор вводится положительная реактивность, мощность начинает расти и, чтобы сохранить её постоянное значение, АРМ погружает рабочую группу и уменьшает нарастающий офсет. Эти действия повторяются до тех пор, пока температура теплоносителя при входе в реактор не достигнет минимально разрешенного значения 294°C (при борном регулировании минимальным значением является величина борной кислоты, равная 0.02 г/кг), после этого рост офсета подавляется погружением 11-ой группы до 90% высоты извлечения. Уже через восемь – девять часов офсет находится в разрешенной границе, а через 12 – 13 часов меняется тенденция офсета, и его значение начинает уменьшаться; теперь необходимы действия, предотвращающие снижение офсета. Для этого увеличивается температура теплоносителя на входе в реактор или концентрация борной кислоты, что уменьшает реактивность и мощность, и АРМ поднимает рабочую группу.

При реализации описанных действий по управлению необходимо контролировать производную аксиального офсета нейтронной мощности по времени. Если производная офсета по знаку отрицательна, но его значение по модулю велико, то нужно постепенно извлекать вторую управляющую группу до положения верхних концевых выключателей (ВКВ). Значение температуры теплоносителя можно повышать до 297°C . В обоих алгоритмах как в случае температурного регулирования, так и в случае борного регулирования приоритетом является регулирование, с помощью которого происходит ускоренное иницирование работы АРМ и подавление аксиальных колебаний начинается гораздо раньше. Другим способом после стабилизации значения офсета для данных алгоритмов является использование различных видов регулирования для того, чтобы АРМ вернул рабочую группу к регламентному положению 90% и удерживал её в этом положении.

На рисунках 2 – 5 приведены результаты проведенного моделирования с отображением поведения контролируемых параметров в активной зоне от времени.

На рисунке 2 показано поведение аксиального офсета нейтронной мощности для всех рассмотренных вариантов моделирования. Из рисунка (вариант 2) видно, что алгоритм подавления колебаний с помощью исключительно АРМ без привлечения дополнительных действий по управлению не позволяет обеспечить все требования по безопасной эксплуатации, а именно, в течение трех суток не удается удержать значение аксиального офсета в границах офсетно-мощностной диаграммы. Алгоритм управления с использованием АРМ в сочетании с борным или температурным регулированием обеспечивает это удержание в течение всего интервала времени за исключением начального участка с первоначальным возмущением.

На рисунке 3 показано поведение величины запаса по линейной тепловой нагрузке на топливный элемент $\max(Q_{\text{ТВЭЛ}} - 0.95Q_{\text{ТВЭЛlim}})$ и количества жидких отходов при водообмене от времени для вариантов моделирования.

Что касается затрат водообмена, то количество жидких отходов для варианта с борным регулированием достигает внушительной величины в 250 т/сутки. Для остальных вариантов управления дополнительные затраты по водообмену равны нулю.

На рисунках 4 показаны положения управляющих групп органов регулирования и значения концентрации борной кислоты в теплоносителе в зависимости от времени при реализации алгоритма с различными способами управления в завершающей фазе по вариантам 3.1 и 3.2. На рисунке 4а видно, что ближе к 130 часам для первого способа управления 12-я группа поднимается до 95% высоты извлечения. Для второго способа борное регулирование происходило не только для удержания аксиального офсета вблизи равновесного значения, но и для удержания положения рабочей группы в регламентных пределах.

Как видно из рисунка 4б, 12-я группа не размещалась выше 93% высоты извлечения, и довольно долгое время (от 110 до 150 часов) была примерно на 90%-м уровне.

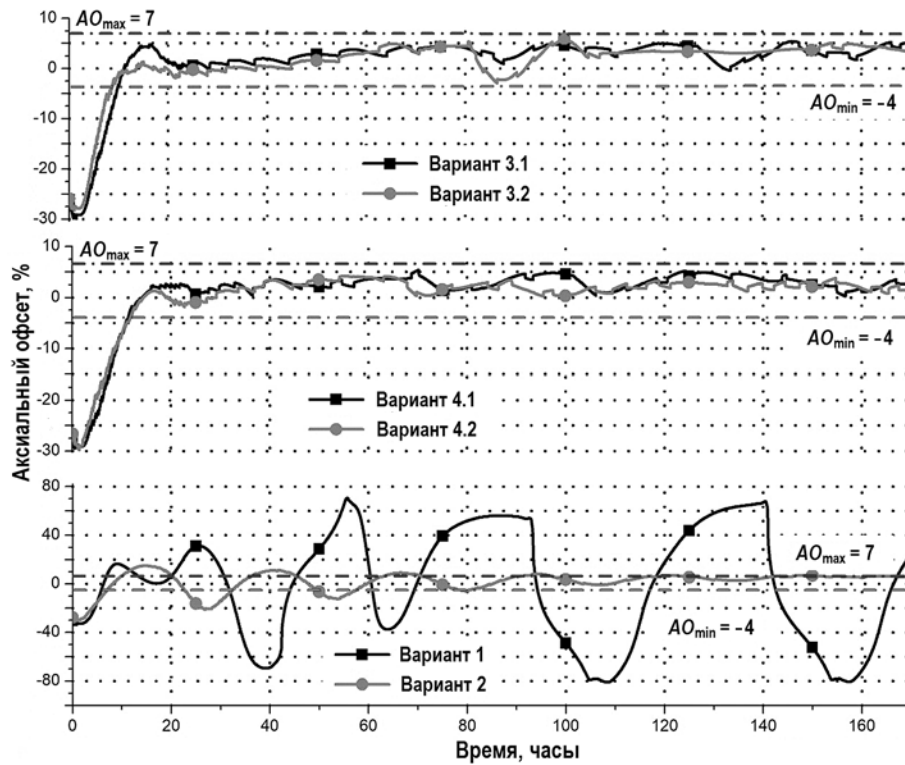


Рис. 2. Зависимость аксиального офсета нейтронной мощности от времени без подавления колебаний и при различных способах подавления

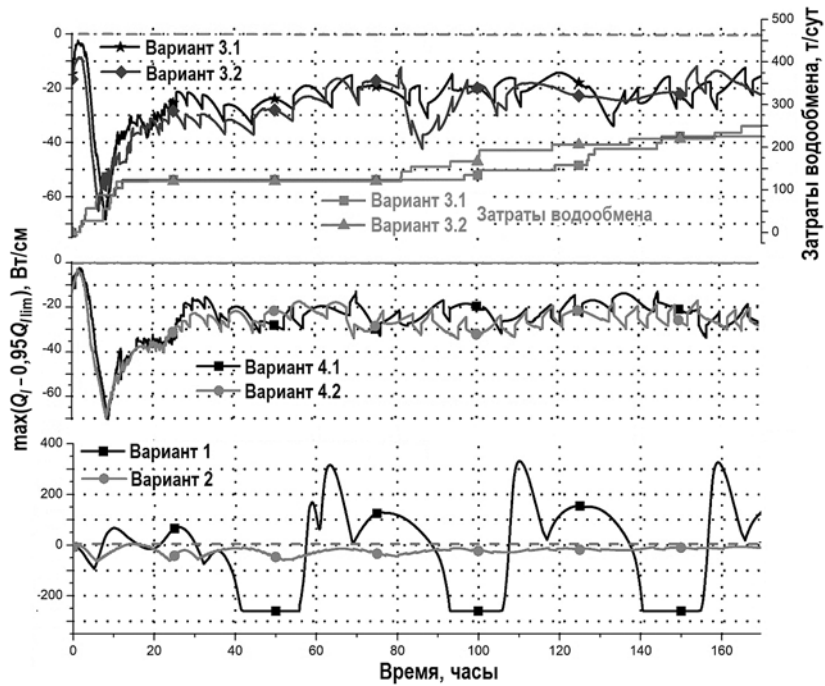


Рис. 3. Поведение величины запаса по линейной тепловой нагрузке на топливный элемент от времени

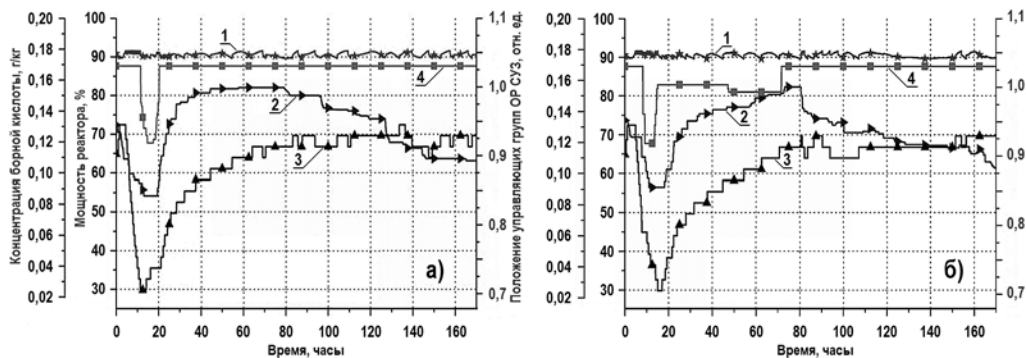


Рис. 4. Изменение параметров реактора при подавлении ксеноновых колебаний: а) – вариант 3.1; б) – вариант 3.2. Обозначения: 1 – мощность реактора, %; 2 – концентрация борной кислоты, г/кг; 3 – положение 12-й группы ОР СУЗ, отн. ед.; 4 – положение 11-й группы ОР СУЗ, отн. ед.

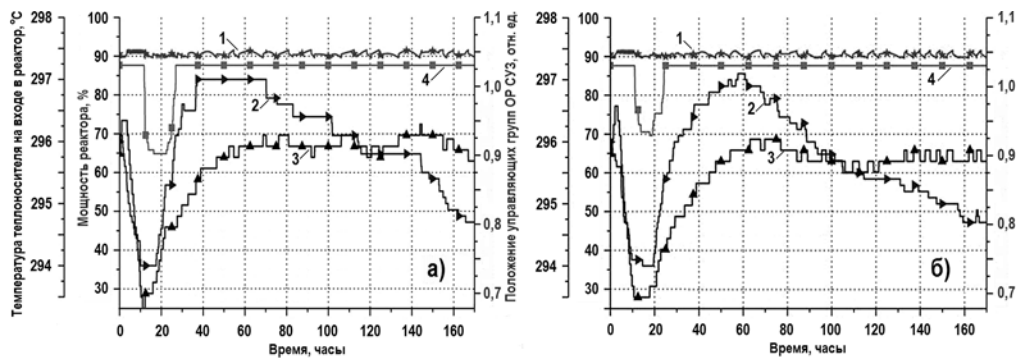


Рис. 5. Изменение параметров реактора при подавлении ксеноновых колебаний: а) – вариант 4.1; б) – вариант 4.2. Обозначения: 1 – мощность реактора, %; 2 – температура теплоносителя на входе в реактор, °С; 3 – положение 12-й группы ОР СУЗ, отн. ед.; 4 – положение 11-й группы ОР СУЗ, отн. ед.

На рисунках 5 приведены положения управляющих групп органов регулирования и значения температуры теплоносителя на входе в реактор в зависимости от времени при реализации алгоритма с различными способами управления в завершающей фазе по вариантам 4.1 и 4.2.

Рисунок 5а показывает, что в интервале от 120 до 145 часов температура теплоносителя не изменялась и приводит к извлечению с помощью АРМ 12-й группы до 95% высоты зоны, что по регламенту не рекомендуется. Для удержания 12-й группы примерно на 90%-м уровне по высоте использовалось дополнительное снижение температуры теплоносителя на входе в реактор примерно на 1°С до значения 294.7°С, что хорошо видно из рис. 5б.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований по рассмотренным вариантам движения ОР СУЗ по программному комплексу ПРОСТОР показывают следующие затраты по водообмену:

- варианты 1 и 2 – 0 т/сут;
- вариант 3.1 – 220 т/сут;
- вариант 3.2 – 250 т/сут;
- варианты 4.1 и 4.2 – 0 т/сут;

Из рассмотренных лучшим алгоритмом для минимизации затрат по водообмену является алгоритм на базе АРМ с использованием температурного регулирования и ручного управления второй управляющей группы ОР СУЗ (вариант № 4.2). При реализации данного алгоритма обеспечиваются все условия безопасной эксплуатации при регла-

ментном управлении группами. Используемый диапазон значений температур теплоносителя на входе в реактор соответствует разрешенному интервалу значений давления второго контура от 6.6 до 7.0 МПа. Более того, при реализации этого алгоритма интервал значений давления оказывается даже более суженным. Использование данного алгоритма на практике становится актуальным ближе к концу кампании, когда возможны большие количества жидких отходов при водообмене. Исследованный алгоритм наиболее эффективен ближе к концу топливной кампании, поскольку в это время критическая концентрация борной кислоты в теплоносителе довольно низкая и за счет этого температурный эффект реактивности больше.

Авторы выражают глубокую благодарность С.Б. Выговскому за помощь в работе и подготовке статьи.

Литература

1. *Выговский С.Б., Аль Малкави Р.Т., Хачатрян А.Г., Абраамян Ш.А.* Оптимизация алгоритмов управления ЯЭУ с ВВЭР-1200 для минимизации водообмена в 1-ом контуре при реализации суточных маневренных режимов. // Глобальная ядерная безопасность. – 2018. – № 3(28). – С. 49-63. DOI: <https://doi.org/10.26583/gns-2018-03-07>.
2. *Рашидан А.Т.* Оптимизация алгоритмов управления пространственным распределением нейтронных полей в активной зоне реакторов ВВЭР-1000(1200) в условиях маневренных режимов. – Дисс. канд. техн. наук. – М.: НИЯУ МИФИ, 2018. – 216 с.
3. *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 вузов. Ядерная энергетика. – 2019. – № 2. – С. 67-79. DOI: <https://doi.org/10.26583/pre.2019.2.06>.
4. *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. DOI: <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2015.2.015-020>.
5. *Аверьянова С.П., Филимонов П.Е.* Ксеноновая устойчивость ВВЭР-1200. // Атомная энергия. – 2009. – Т. 107. – Вып. 6. – С. 348-351.
6. *Shimazu Y.* Xenon oscillation control in large PWRs using a characteristics ellipse trajectory drawn three axial offsets. // Journal of Nuclear Science and Technology. – 2008. – Vol. 45. – No 4. – PP. 257-262. DOI: <https://doi.org/10.1080/18811248.2008.9711435>.
7. *Аверьянова С.П., Дубов А.А., Косоуров К.Б., Семченков Ю.М., Филимонов П.Е.* Развитие способов управления ВВЭР-1200/1300 в суточном графике нагрузки. // Атомная энергия. – 2013. – Т. 114. – Вып. 5. – С. 249-253.
8. *Выговский С.Б., Рябов Н.О., Чернов Е.В.* Безопасность и задачи инженерной поддержки эксплуатации ядерных энергетических установок с ВВЭР. – М.: НИЯУ МИФИ. – 2013. – 304 с.
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. *Филимонов П.Е.* Управление энергораспределением ВВЭР с помощью офсет-офсетной диаграммы. // Атомная энергия. – 1992. – Т. 73. – Вып. 3. – С. 175-179.
11. *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 энергоснабжением реактора. // Атомная энергия. – 2016. – Т. 121. – Вып. 3. – С. 123-127.
12. *Аверьянова С.П., Лунин Г.Л., Проселков В.Н.* Контроль локальной линейной мощности твэлов в активной зоне ВВЭР-1000 с помощью офсет-мощностной диаграммы. // Атомная энергия. – 2002. – Т. 93. – Вып. 1. – С. 13-18.
13. *Аверьянова С.П., Дубов А.А., Филимонов П.Е.* Суперпозиция интегральных и аксиальных ксеноновых колебаний и устойчивость энергоснабжения активной зоны ВВЭР-1000. // Атомная энергия. – 2011. – Т. 111. – Вып. 1. – С. 8-13.
14. *Аверьянова С.П., Косоуров К.Б., Семченков Ю.М. и др.* Исследование ксеноновых переходных процессов в ВВЭР-1000 на Тяньваньской АЭС (Китай). // Атомная энергия. – 2008. – Т. 105. – Вып. 4. – С. 183-190.

15. *Выговский С.Б., Зимин В.Г., Чернов Е.В.* Приложение к аттестационному паспорту № 182 от 28.10.2004 г. Программный комплекс ПРОСТОР (версия 1). – М.: НИЯУ МИФИ, 2004. – 8 с.

16. *Выговский С.Б. и др.* Опыт использования программного комплекса «ПРОСТОР» в расчетной поддержке эксплуатации КЛН АЭС и перспективы его дальнейшего применения на АЭС с ВВЭР-1000. / Сб. материалов XIV Ежегодной конференции ЯО России «Научное обеспечение безопасного использования ядерных энергетических технологий». – 2003. – С. 121-123.

17. *Аверьянова С.П., Дубов А.А., Косоуров К.Б., Филимонов П.Е.* Температурное регулирование и маневренность ВВЭР-1000. // Атомная энергия. – 2010. – Т. 109. – Вып. 4. – С. 199-202.

18. *Филимонов П.Е., Аверьянова С.П., Филимонова М.П.* Управление группами рабочих органов СУЗ в маневренном режиме работы ВВЭР-1000. // Атомная энергия. – 1998. – Т. 84. – Вып. 5. – С. 382-393.

19. *Казанский Ю.А., Слекенич Я.В.* Мощностной коэффициент реактивности: определение, связь с коэффициентами реактивности, оценка результатов переходных процессов энергетических реакторов. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2018. – № 1. – С. 63-74. DOI: <https://doi.org/10.26583/nre.2018.1.07>.

20. *Браславский Ю.В., Мерзликин Г.Я., Сукрушев А.В., Шаповаленко В.В.* Анализ причин возникновения ксеноновых колебаний локальной мощности в активной зоне ВВЭР и механизмов их подавления. // Энергетические установки и технологии. – 2018. – Т. 4. – № 1. – С. 7-18.

Поступила в редакцию 01.11.2021 г.

Авторы

Соловьёв Денис Алексеевич, к.т.н. доцент

E-mail: vulture@inbox.ru

Хачатрян Арцрун Гагикович, аспирант

E-mail: artsrn-khachatryan@mail.ru

Чернов Евгений Владимирович, ведущий инженер

E-mail: chernov.e@inbox.ru

Аль Малкави Рашдан к.т.н,

E-mail: rashdanmalkawi@gmail.com

UDC.621.039.586

INVESTIGATION OF ALGORITHMS FOR SUPPRESSING XENON OSCILLATIONS IN A VVER-1200 REACTOR

Soloviev D.A.*, Khachatryan A.G.*, Chernov E.V.*, Al Malkawi R.T.**

* National Research Nuclear University MEPHI

31 Kashirskoe Sh., 115409 Moscow, Russia

** JRTR, 11934 Amman, Jordan

ABSTRACT

This paper presents the results of numerical studies of various algorithms for suppression of xenon offset and power distribution oscillations in the core of a VVER-1200 reactor. The purpose of the research is to select an algorithm that minimizes the amount of liquid radioactive wastes during water exchange in the primary circuit of a nuclear power plant. For this, several algorithms for xenon oscillations suppression were considered.

The first algorithm considered was an algorithm for suppression of xenon oscillations, which uses regulation due to AWP only, without utilization of any additional regulation.

The second algorithm considered was an algorithm based on the use both AWP and boron regulation. In this algorithm suppression of xenon oscillations was carried out with the help of accelerated initiation of the work of the AWP by changing the boric acid concentration with constant second circuit pressure of the NPP and by utilization of the second control rods group.

Last algorithm considered was algorithm based on the use of temperature control for accelerated initiation of the work of the AWP. In this algorithm, xenon oscillations suppression was carried out by changing coolant temperature at the reactor inlet caused by pressure change in the secondary circuit in the normal operation margins, and by involving the second group of control rods.

It was shown that the best way to suppress xenon offset and power distribution oscillations in terms of minimization of radioactive liquid wastes amount is the algorithm with accelerated initiation of the AWP due to temperature regulation, with elimination of temperature regulation after minimizing of current axial offset value deviation from the nominal one.

Key words: VVER-1200, offset-phase diagram, axial offset (AO), automatic power regulator (APR), suppression algorithm, xenon oscillations, water exchange.

REFERENCES

1. Vygovskij S.B., Al' Malkavi R.T., Khachatryan A.G., Abrahamyan Sh.A. Optimization of control algorithms for NPP with VVER-1200 to minimize water exchange in the 1st loop when implementing daily maneuvering modes. *Global'naya Yadernaya Bezopasnost'*. 2018, no. 3(28), pp. 49-63; DOI: <https://doi.org/10.26583/gns-2018-03-07> (in Russian).
2. Rashdan A.T. *Optimization of Control Algorithms for the Spatial Distribution of Neutron Fields in the Core of VVER-1000 (1200) Reactors Under Conditions of Maneuvering Modes*. Dr. Sci. (Tech.) Diss. Moscow. MEPHI Publ., 2018, 216 p. (in Russian)
3. Vygovskij S.B., Al' Malkavi R.T., Khachatryan A.G. Study of Control Algorithms for NPP with VVER-1200 for the Implementation of daily Maneuvering Modes at NPP. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2019, no. 02, pp. 67-79; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2019.2.06> (in Russian).
4. Semenov V.K., Vol'man M.A. On the Issue of Xenon Oscillations in a Nuclear Reactor. *Vestnik Ivanovskogo Gosudarstvennogo Energeticheskogo Universiteta*. 2015, v. 2, pp. 15-20; DOI: <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2015.2.015-020> (in Russian).
5. Aver'yanova S.P., Filimonov P.E. Xenon Resistance of VVER-1200. *Atomnaya Energiya*. 2009, v. 107, iss. 6, pp. 348-351; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-010-9246-7> (in Russian).
6. Shimazu Y. Xenon Oscillation Control in Large PWRs Using a Characteristics Ellipse Trajectory Drawn Three Axials Offsets. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2008, v. 45, no. 4, pp. 257-262; DOI: <https://doi.org/10.1080/18811248.2008.9711435>.
7. Aver'janova S. P., Dubov A. A., Kosourov K. B., Semchenkov Ju. M., Filimonov P. E. Development of Control Methods for VVER-1200/1300 in the Daily Load Schedule. *Atomnaya Energiya*. 2013, v. 114, iss. 5, pp. 249-253 (in Russian).
8. Vygovskij S.B., Rjabov N.O., Chernov E.V. *Safety and Tasks of Engineering Support for the Operation of Nuclear Power Plants with VVER*. Moscow. MEPHI Publ., 2013, 304 p. (in Russian).
9. Vygovskij S.B., Rjabov N.O., Semenov A.A., Chernov E. V, Bogachek L.N. *Physical and Structural Features of Nuclear Power Plants with VVER*. Moscow. MEPHI Publ., 2011, 376 p. (in Russian).
10. Filimonov P.E. VVER Power Distribution Control Using Offset-Offset Diagram. *Atomnaya Energiya*. 1992, v. 73, iss. 3, pp. 175-179; DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00761621> (in Russian).
11. Aver'yanova S.P., Vohmyanina N.S., Zlobin D.A., Filimonov P.E., Kuznecov V.I., Lagovskij V.B. The Method of the Offset-Power Phase Diagram for Controlling the Power Release of Reactor. *Atomnaya Energiya*. 2016, v. 121, iss. 3, pp. 123-127; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-016-0123-7>

doi.org/10.1007/s10512-017-0176-5 (in Russian).

12. Aver'yanova S.P., Lunin G.L., Proselkov V.N. et al. Control of the Local Linear Power of Fuel Elements in the VVER-1000 Core Using an Offset-Power Diagram. *Atomnaya Energiya*. 2002, v. 93, iss. 1, pp. 13-18 (in Russian).

13. Averyanova S.P., Dubov A.A., Filimonov P.E. Integral and Axial Xenon Oscillations Superposition and VVER-1000 Core Energy-Release Stability. *Atomic Energy*. 2011, v. 111, iss. 1, pp. 8-14; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-011-9446-9>.

14. Aver'yanova S.P., Kosourov K.B., Semchenkov Yu. M. Investigation of Xenon Transient Processes in VVER-1000 at the Tianwan NPP (China). *Atomnaya Energiya*. 2008, v. 105, iss. 4, pp. 183-190; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-009-9091-8> (in Russian).

15. Vygovskij S.B., Zimin V.G., Chernov E.V. Supplement to the Attestation Passport No. 182 dated 28.10.2004. *Program Complex PROSTOR (Version 1)*. Moscow. MEFhI Publ., 2004, – 8 p. (in Russian).

16. Vygovskij S.B. et al. Experience of Using the Software Package PROSTOR in the Computational Support of the Operation of Kln NPP and the Prospects for its Further Application at NPPs with VVER-1000. *Proc. of the XIV Annual Conference of Russian Nuclear Society «Nauchnoe Obespechenie Bezopasnogo Ispol'zovaniya Yadernykh Energeticheskikh Tekhnologij»*, 2003, pp. 121-123 (in Russian).

17. Aver'yanova S.P., Dubov A.A., Kosourov K.B., Filimonov P.E. Temperature Regulation and Maneuverability of VVER-1000. *Atomnaya Energiya*, 2010, v. 109, iss. 4, pp. 199-202; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-011-9352-1> (in Russian).

18. Filimonov P.E., Aver'yanova S.P., Filimonova M.P. Management of CPS Working Bodies Groups in the Maneuverable Operating Mode of VVER-1000. *Atomnaya Energiya*. 1998, v. 84, iss. 5, pp. 382-393; DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02414876> (in Russian).

19. Kazanskij Yu.A., Sledenichs Ya.V. Power coefficient of reactivity: determination, relationship with reactivity coefficients, evaluation of the results of transient processes of power reactors. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2018, no. 1, pp. 63-74; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2018.1.07> (in Russian)

20. Braslavskij Yu.V., Merzlikin G.Ya., Sukrushev A.V., Shapovalenko V.V. Analysis of the Causes of the Occurrence of Xenon Oscillations of the Local Power in the VVER Core and the Mechanisms of their Suppression. *Energeticheskie Ustanovki i Tekhnologii*. 2018, v. 4, no. 1, pp. 7-18 (in Russian).

Authors

Soloviev Denis Alekseevich, Ph.D. Associate Professor

E-mail: vulture@inbox.ru

Khachatryan Artsrun Gagikovich, PhD Student

E-mail: artsrn-khachatryan@mail.ru

Chernov Evgeny Vladimirovich, Senior Engineer

E-mail: chernov.e@inbox.ru

Al Malkawi Rashdan Tala, Ph.D.

E-mail: rashdanmalkawi@gmail.com