

## **ОПТИМИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ЯЭУ С ВВЭР-1200 ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ ВОДООБМЕНА В 1-ОМ КОНТУРЕ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ СУТОЧНЫХ МАНЕВРЕННЫХ РЕЖИМОВ**

© 2018 С.Б. Выговский, Р.Т. Аль Малкави, А.Г. Хачатрян, Ш.А. Абрамян

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

В настоящей работе приведены результаты численных исследований алгоритмов управления пространственным распределением нейтронного поля в активной зоне реакторов ВВЭР-1200 при реализации суточных маневренных режимов на АЭС с ВВЭР-1000(1200). Была показана возможность автоматизированного регулирования аксиальным офсетом нейтронной мощности с использованием одной из управляющих групп ОР СУЗ с целью снятия психологической нагрузки на оперативный персонал АЭС в маневренных режимах. При этом происходит дополнительная минимизация водообмена при сохранении всех полевых ограничений по локальной мощности в зоне. Исследования проводились на базе программного комплекса ПРОСТОР. Данный комплекс используется в настоящее время в УТП Ново-Воронежской АЭС для проведения занятий с оперативным персоналом АЭС и их обучения оптимальным алгоритмам управления энергоблоком в маневренных режимах. Была предложена методология настройки параметров офсета регулирования в зависимости от нейтронно-физических характеристик активной зоны. Актуальность проведенных исследований связана с тем, что на НВАЭС-2 и ЛАЭС-2 по проекту АЭС-2006 предполагается тестирование суточных режимов работы АЭС с маневрированием мощности в широком интервале их значений. Проведение этих испытаний необходимо для подтверждения работоспособности энергоблоков в суточных режимах по ряду зарубежных контрактов с РФ и повысит конкурентную способность оборудования АЭС с ВВЭР за рубежом.

*Ключевые слова:* ВВЭР-1200, офсетно-мощностная фазовая диаграмма, аксиальный офсет (АО), автоматический регулятор мощности (АРМ), алгоритм управления, водообмен.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Сложность задачи заключается в том, что маневренные режимы с изменением мощности в течение суток приводят к возникновению нестационарного отравления активной зоны ксеноном и, как следствие, к ксеноновым колебаниям локальной мощности по объему зоны. В случае маневренных режимов стоит задача обеспечить управляемый процесс ксеноновых колебаний с целью не превышения полевых ограничений по локальной мощности в зоне и минимизацию водообмена в 1-ом контуре, который является очень затратной операцией на АЭС.

Для безопасной эксплуатации энергоблока с реактором ВВЭР-1000(1200) в маневренном режиме необходимо, чтобы реактор находился в устойчивом состоянии, и поддерживалось устойчивое пространственное распределение энерговыделений по объему активной зоны как в ночном, так в дневном режиме.

Количественной мерой устойчивости реактора служит аксиальный офсет (АО), поэтому показателем эффективности эксплуатации энергоблока с ВВЭР-1000(1200) является минимизация отклонения АО в ночном и дневном интервалах по времени от их стационарных значений, которые не сильно отличаются друг от друга. Стационарные значения устанавливаются из области разрешенных значений аксиального офсета близкими друг к другу, как в ночном, так и в дневном режиме.

Правда при реализации суточных режимов помимо задачи обеспечения устойчивости реактора и теплотехнической безопасности зоны есть и другая не менее важная задача: минимизация водообмена. В этом случае обеспечить минимальные отклонения от постоянного значения аксиального офсета мощности очень затруднительно. Поэтому для маневренных режимов пользуются разрешенной областью значений офсета, которая определяется офсетно-мощностной фазовой диаграммой, рассчитываемой для каждого момента кампании. Из этой диаграммы можно определить квазистационарные значения аксиального офсета для ночного и дневного режимов, которые могут быть, существенно, различными.

Поддержание текущей фазовой точки – значения офсета, в рекомендуемой области диаграммы ограничивает изменение локальной мощности, а также сдерживает развитие аксиальных ксеноновых колебаний. На энергоблоках ВВЭР-1000, введенных в эксплуатацию после 2000 г., офсет-мощностная диаграмма является необходимым элементом информационной поддержки оператора. Диаграмма выводится на экран рабочего монитора оператора с помощью входящей в состав расчетной поддержки эксплуатации программы ИР. Данная программа оперирует офсетно-мощностной диаграммой, которая определяет разрешенную область значений офсета мощности.

### МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ОФСЕТНО-МОЩНОСТНОЙ ДИАГРАММЫ

Источником получения офсетно-мощностной диаграммы является полевые ограничения локальной мощности, которые должны быть меньше допустимых значений локальной мощности во всем объеме активной зоны. Под локальной мощностью понимается линейная тепловая мощность  $Q(i, j, k)$  на тепловыделяющий элемент, где  $i, j, k$  – номер высотного слоя активной зоны, номер ТВС, номер ТВЭЛ внутри ТВС соответственно. На локальную мощность  $Q$  накладываются ограничения  $Q_{lim}$ , которые зависят от типа тепловыделяющего элемента (ТВЭЛ или ТВЭГ), а также от положения в активной зоне и выгорания рассматриваемого участка тепловыделяющего элемента:  $Q(i, j, k) \leq Q_{lim}(i, j, k)$ . Однако не только это требование является необходимым условием определения разрешенной области значений офсета для реализации суточных маневренных режимов. 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 локальной мощности их полевых ограничений по объему активной зоны по данным СВРК. Выполнение этого условия не приводит к накоплению усталостных повреждений в топливных элементах при циклических нагрузках во время маневренного режима и позволяет, практически без ограничения по числу циклов, проводить маневрирование мощности реактора. Определение этого условия и разработка метода офсетно-мощностной фазовой диаграммы для управления распределением энерговыделений в активной зоне принадлежит РНЦ «КИ» и ВНИИМ [1-3].

В соответствие с разработанным методом для выполнения указанного выше условия служит выражение для зависимости оптимального значения АО от мощности, которое минимизирует отклонение линейных нагрузок на топливо при изменении мощности:  $AO_c = -2,6 + (AO_1(W_0) + 2,6) W/100$  (1)

$W$ - текущая мощность реактора, %;

$W_0$ - номинальная мощность реактора, %;

$AO_c$  - значение офсета при текущей мощности для оптимального распределения;

$AO_1$  - значение равновесного офсета при номинальной мощности для оптимального распределения.

Обеспечить значения оптимального офсета в различных состояниях активной зоны затруднительно. Поэтому определяется некоторая область разрешенных значений офсета в отклонениях от оптимальных значений  $AO_c$ , которые составляют при номинальной мощности значения  $\pm 5\%$ :

$$AO_1 = -2,6 + (AO_c + 7,6)100/W$$

$AO_1$  - верхняя граница коридора разрешенных значений  $AO$ ;

$$AO_2 = -2,6 + (AO_c - 2,4)100/W$$

$AO_2$  - нижняя граница коридора разрешенных значений  $AO$ .

Величины  $AO_1$  и  $AO_2$  определяют область разрешенных значений аксиального офсета - офсетно-мощностную фазовую диаграмму. Приведем пример такой области для стационарной кампании 12-ти месячной топливной загрузки 6-го блока НВАЭС на 320 эфф. суток.

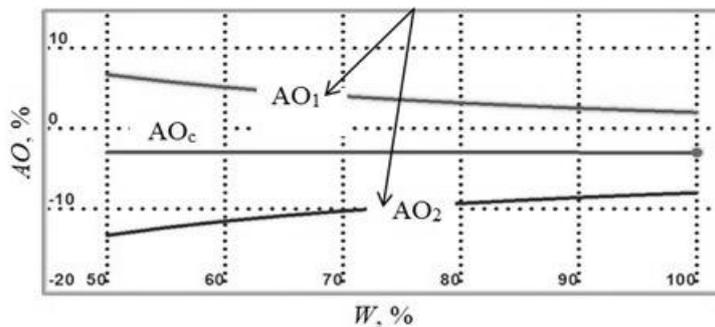


Рисунок 1 – Офсетно-мощностная фазовая диаграмма по штатной методике. Центральная линия ( $AO_c$ ) определяет зависимость аксиального офсета от мощности для оптимальной траектории высотного распределения энерговыделений с минимальными отклонениями локальной мощности друг от друга в различных состояниях активной зоны [Offset-power phase diagram by the standard method. The central line ( $AO$ ) determines the dependence of the axial offset on the power for the optimal trajectory of the altitude distribution of energy releases with minimum deviations of the local power from each other in different states of the core]

Если для получения офсетно-мощностной диаграммы использовать только требование не превышения полевых ограничений локальной мощности в объёме зоны по данным СВРК без учета усталостных накоплений в топливе, то можно получить гораздо более широкий коридор для значений аксиального офсета при малых значениях мощности реактора. Правда, реализация такого режима возможна только для единичных случаев, например при аварийном отключении большого количества потребителей.

Расчет офсетно-мощностной фазовой диаграммы без учета усталостных накоплений в топливном элементе основан на использовании данных СВРК по значениям линейным тепловым нагрузкам на ТВЭЛ в контрольных точках активной зоны в данный момент кампании. В основе лежит выполнение неравенства по всему объёму зоны:  $QL(x, y, z) < 0.98QL_{lim}(x, y, z)$  и неравенства для объёмных коэффициентов неравномерности энерговыделений  $Kv(x, y, z)$  в соответствии с Техническим Регламентом, которое выглядит следующим образом:

$$Kv(x, y, z) < \frac{Kv_{lim}(x, y, z)}{0.17 + 0.83W / W_0}$$

где  $W$  - текущая мощность,  $W_0$  - номинальная мощность

Проинтегрируем левую и правую часть данного неравенства по объёму нижней половины активной зоны и по объёму верхней половины. Получим:

$$Kv_{\text{низ}} < \frac{Kv_{\text{lim низ}}}{0.17+0.83W/W_0}, Kv_{\text{верх}} < \frac{Kv_{\text{lim верх}}}{0.17+0.83W/W_0}, Kv_{\text{низ}} + Kv_{\text{верх}} = 2$$

где  $W$  - текущая мощность,  $W_0$ -номинальная мощность

$$AO(\%) = \frac{Kv_{\text{верх}} - Kv_{\text{низ}}}{Kv_{\text{верх}} + Kv_{\text{низ}}} * 100$$

$$AO(\%) > (1 - \frac{Kv_{\text{lim низ}}}{0.17+0.83W/W_0}) * 100, AO(\%) < (\frac{Kv_{\text{lim верх}}}{0.17+0.83W/W_0} - 1) * 100 \quad (2)$$

Из этих неравенств получим выражения для нижней и верхней границы разрешенного коридора значений аксиального офсета:

$$AO'_2 = (1 - \frac{Kv_{\text{lim низ}}}{0.17+0.83W/W_0}) * 100, AO'_1 = (\frac{Kv_{\text{lim верх}}}{0.17+0.83W/W_0} - 1) * 100$$

Соответственно выражения для проинтегрированных предельных коэффициентов неравномерности энерговыделений для низа и верха зоны выглядят следующим образом:

$$Kv_{\text{lim низ}} = \frac{1}{7Q_{\text{средн}} K_N K_{\text{инж}} K_{\text{изг}}} \times \left\{ 4 \sum_{i=1}^3 \min \left\{ \int_{S_i} \frac{Q_{\text{limi}}^{\text{ТВЭЛ1}}(bn(x, y))}{S_i Kk_{\text{maxi1}}^{\text{ТВЭЛ1}}(bn(x, y), x, y)} dx dy, \int_{S_i} \frac{Q_{\text{limi}}^{\text{ТВЭЛ2}}(bn)}{S_i Kk_{\text{maxi1}}^{\text{ТВЭЛ2}}(bn)} dx dy, \int_{S_i} \frac{Q_{\text{limi}}^{\text{ТВЭГ}}(bn)}{S_i Kk_{\text{maxi}}^{\text{ТВЭГ}}(bn)} dx dy \right\} + 2 \min \left\{ \int_{S_4} \frac{Q_{\text{limi}}^{\text{ТВЭЛ1}}(bn(x, y))}{S_4 Kk_{\text{maxi1}}^{\text{ТВЭЛ1}}(bn(x, y), x, y)} dx dy, \int_{S_4} \frac{Q_{\text{limi}}^{\text{ТВЭЛ2}}(bn)}{S_4 Kk_{\text{maxi1}}^{\text{ТВЭЛ2}}(bn)} dx dy, \int_{S_4} \frac{Q_{\text{limi}}^{\text{ТВЭГ}}(bn)}{S_4 Kk_{\text{maxi}}^{\text{ТВЭГ}}(bn)} dx dy \right\} \right\},$$

$$Kv_{\text{lim верх}} = \frac{1}{7Q_{\text{средн}} K_N K_{\text{инж}} K_{\text{изг}}} \times \left\{ 4 \sum_{i=5}^7 \min \left\{ \int_{S_i} \frac{Q_{\text{limi}}^{\text{ТВЭЛ1}}(bn(x, y))}{S_i Kk_{\text{maxi1}}^{\text{ТВЭЛ1}}(bn(x, y), x, y)} dx dy, \int_{S_i} \frac{Q_{\text{limi}}^{\text{ТВЭЛ2}}(bn)}{S_i Kk_{\text{maxi1}}^{\text{ТВЭЛ2}}(bn)} dx dy, \int_{S_i} \frac{Q_{\text{limi}}^{\text{ТВЭГ}}(bn)}{S_i Kk_{\text{maxi}}^{\text{ТВЭГ}}(bn)} dx dy \right\} + 2 \min \left\{ \int_{S_4} \frac{Q_{\text{limi}}^{\text{ТВЭЛ1}}(bn(x, y))}{S_4 Kk_{\text{maxi1}}^{\text{ТВЭЛ1}}(bn(x, y), x, y)} dx dy, \int_{S_4} \frac{Q_{\text{limi}}^{\text{ТВЭЛ2}}(bn)}{S_4 Kk_{\text{maxi1}}^{\text{ТВЭЛ2}}(bn)} dx dy, \int_{S_4} \frac{Q_{\text{limi}}^{\text{ТВЭГ}}(bn)}{S_4 Kk_{\text{maxi}}^{\text{ТВЭГ}}(bn)} dx dy \right\} \right\},$$

$K_{\text{изг}}$  – коэффициент неточности из-за азимутального изгиба ТВС = 1.01;

$K_N$  – коэффициент неточности расчета и поддержания мощности = 1.07;

$K_{\text{инж}}$  – коэффициент неточности расчета пространственного распределения нейтронного поля в объеме активной зоны = 1.12;

$Kk_{\text{max}S_i}^{\text{ТВЭЛ1}}(bn(x, y), x, y)$  – максимальный коэффициент неравномерности мощности ТВЭЛ основного размещения по сечению ТВС с координатами  $x$ - $y$  в области реактора с I-м ДПЗ;

$Kk_{\max S_i}^{\text{ТВЭЛ}^2}(\text{bn}(x, y), x, y)$  – максимальный коэффициент неравномерности мощности ТВЭЛ периферийного размещения по сечению ТВС с координатами  $x$ - $y$  в области реактора с I-м ДПЗ;

$Kk_{\max S_i}^{\text{ТВЭГ}}(\text{bn}(x, y), x, y)$  – максимальный коэффициент неравномерности мощности ТВЭГ по сечению ТВС с координатами  $x$ - $y$  в области реактора с I-м ДПЗ;

$Q_{\text{limi}}(\text{bn}(x, y))$  – предельное значение линейной нагрузки на ТВЭЛ в области реактора с I-м ДПЗ при средней глубине выгорания топлива по сечению ТВС с координатами  $x$ - $y$  в данном сечении.

Для внутренних и периферийных ТВЭЛ и для ТВЭГ в составе ТВС имеется таблица предельных линейных тепловых нагрузок на свежее топливо в семи контрольных точках по высоте активной зоны. Эти таблицы подготовлены Главным Конструктором реакторной установки. Помимо этого существуют таблицы коэффициентов коррекции линейных тепловых нагрузок на топливо в зависимости от глубины выгорания, которые представлены заводом-изготовителем топлива.

Наложение полевых ограничений по высотному распределению на распределение ограничений от глубины выгорания при знании распределения глубины выгорания по ТВЭЛ и ТВЭГ позволяет определить полевые ограничения в произвольный момент кампании. Для этого служит программный комплекс ПЕРМАК в составе СВРК.

Приведем пример разрешенной области значений аксиального офсета, полученной только по данным СВРК для той же стационарной топливной загрузки 6-го блока НВАЭС на 320 эфф. суток.

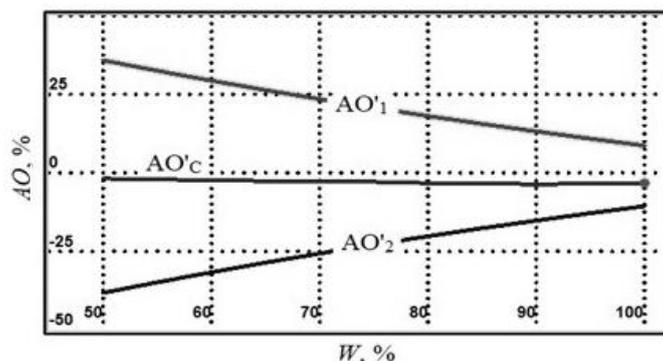


Рисунок 2 – Офсетно-мощностная фазовая диаграмма по данным СВРК. Центральная линия ( $AO'_c$ ) определяет зависимость аксиального офсета от мощности при оптимальном движении управляющих групп ОР СУЗ, которое минимизирует изменения аксиального офсета от мощности [Offset-power phase diagram according to the SVRC. The central line (AO) determines the dependence of the axial offset on the power with the optimal movement of the control groups of the control system, which minimizes changes in the axial offset from the power]

Из сопоставления приведенных выше офсетно-мощностных диаграмм видно, что разрешенный коридор для значений аксиального офсета в ночном режиме по методике РНЦ «КИ» гораздо меньше коридора, полученного прямым образом по данным СВРК. В дневном режиме разрешенные коридоры, полученные по разным методикам сопоставимы. Конечно штатный подход, основанный на обеспечении двух ограничений по топливу, является более верным, и поэтому исследование различных алгоритмов управления должно строиться на данном подходе.

Помимо использования офсетно-мощностной диаграммы для контроля безопасной эксплуатации нужно обеспечить не превышение указанных ниже параметров предельно допустимых значений:

$T_{cl}$  – температура наружной поверхности оболочки твэла, °С;

$T_{fuel}$  – температура топлива в центре топливной таблетки, °С;

$Q_{ТВЭЛ}$  – линейная тепловая нагрузка на твэл, Вт/см

DNBR – коэффициент запаса до кризиса теплообмена на поверхности твэла, равен отношению критического теплового потока к текущему потоку в контрольной точке активной зоны.

Критический тепловой поток определяет начало кризиса теплообмена

Для обеспечения нормальной эксплуатации активной зоны, в первую очередь, должны выполняться следующие неравенства:

$$\max(T_{cl}) - (T_{\text{н}}(P-1K)+2) < 0$$

$T_{\text{н}}(P-1K)$  – температура насыщенной воды при давлении теплоносителя в 1ом контуре,

$$\max(Q_{ТВЭЛ} - 0.95Q_{ТВЭЛlim}) < 0$$
 - по всем контрольным точкам зоны,

$$\min(DNBR) > 1.35$$
 – по всем контрольным точкам зоны.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Расчетные исследования проводились по п/к ПРОСТОР [4-5]. Программный комплекс «ПРОСТОР» является программным ядром моделей 1-го контура в составе ПМТ 2, 3, 4 энергоблоков Калининской АЭС и 3 и 4 энергоблоков Ростовской АЭС, также ПРОСТОР используется в составе анализатора режимов реакторной установки с реактором ВВЭР в ЯФЛ Калининской АЭС и в УТП НВАЭС.

Комплекс ПРОСТОР прошел верификацию по многим экспериментальным и расчетным данным АЭС при выполнении программ приемо-сдаточных испытаний указанных ПМТ и анализаторов. Результаты верификации модели РУ в полном объеме находятся в аттестационных материалах РОСТЕХНАДЗРА. Что касается погрешностей расчета основных нейтронно-физических и тепло-гидравлических характеристик активной зоны, то можно утверждать, что они не превышают погрешностей расчета по программам «БИПР-7А», «NOSTRA» и «ИР».

При формировании алгоритмов управления суточных режимов с целью минимизации затрат водообмена необходимо использовать максимальным образом температурное регулирование [6-8] и заметное изменение положений управляющих групп. Изменение положения ОР СУЗ в ночном и дневном режимах определяется офсетно-мощностной диаграммой. Главным образом, положения групп ОР существенно меняется при переходе из дневного режима в ночной режим.

При использовании разрешенного коридора значений офсета по штатной методике 12 группу нужно погружать гораздо ниже 50% извлечения (15%-30%), а 11 группу погружать можно лишь незначительно, примерно до 80-90% извлечения. В этом случае перестройка нейтронных полей по объёму активной зоны происходит таким образом, что величина аксиального офсета увеличивается при погружении 12 группы ниже 50%. Это позволяет вписать значения офсета в ночном режиме в разрешенную область, полученную по методике РНЦ «КИ».

В случае использования офсетно-мощностной диаграммы, полученной по прямым данным СВРК, когда коридор разрешенных значений становится офсета заметно больше, можно использовать другое перемещение групп ОР СУЗ. Рабочая группа погружается не ниже 35%, а 11 группа может при этом погрузиться до 60-70%. Такое расположение групп в ночном режиме приводит к пропорциональной зависимости значений офсета от положения управляющих групп, что облегчает управление офсетом нейтронной мощности.

При этом независимо от стратегии движения ОР СУЗ при разгрузке энергоблока и в течение всего ночного режима, основные принципы минимизации водообмена остаются одними и теми же. Суть их в следующем. При снижении мощности от номинального значения до ночного значения изменяется давление 2-го контура от текущего значения до максимально возможного. Такое изменение происходит в действительности, так как регулирующие клапаны на турбине прикрываются и увеличивают давление перед ними. Это приводит к повышению температуры теплоносителя в 1-ом контуре пропорционально изменению давления. Верхняя граница изменения давления при численном моделировании по п/к ПРОСТОР принималась равной для блоков с ВВЭР-1200 равной 6.99МПа. После разгрузки блока до нужного значения мощности в ночном режиме включается АРМ, начинается отравление ксеноном, и этот процесс вначале можно компенсировать обратным максимально возможным снижением давления до нижней границы, равной 6.60МПа. Возможность такого изменения давления остается открытым, но предположим, что это возможно. При исчерпании такого изменения давления включается водообмен и подается чистая вода для компенсации отрицательной реактивности от нестационарного отравления ксеноном. При восстановлении баланса между ксеноном, йодом и числом делений в топливе начинается повышение реактивности и можно опять перейти на температурное регулирование за счет давления 2-го контура, но в этом случае давление будет увеличиваться.

Теперь рассмотрим, что происходит при переходе из ночного режима в дневной режим. При выходе на номинальную мощность после извлечения управляющих групп (11 группа на ВКВ, 12 группу в положение, разрешенное офсетно-мощностной диаграммой), уменьшается давление 2-го контура до нижней границы. Данное изменение давления при повышении мощности логично, так как клапаны на турбине приоткрываются для увеличения расхода пара на турбину, и давление перед клапанами соответственно падает. После этого, если видно, что положительная обратная связь по выжиганию ксенона не сможет вывести реактор на номинальную мощность за отведенное время, то включается водообмен. Происходит разотравление активной зоны от ксенона и необходимо компенсировать положительную реактивность. Это происходит вначале за счет повышения давления и работы АРМ. АРМ нельзя давать погружать глубоко 12 группу, иначе реактор потеряет устойчивость по удержанию постоянного значения аксиального офсета. Поэтому работу АРМ переводится на 11 группу, у которой эффективность заметно меньше эффективности 12 группы. После исчерпания возможностей 2-контура происходит переход на водообмен. При смене процессов разотравления зоны ксеноном процессом отравления и восстановления баланса между числом делений и ксеноном можно вернуться на температурное регулирование. Возможность такого регулирования пока остается открытым, хотя диапазон изменения давления 2-го контура находится в пределах допустимого. Структуры алгоритмов управления при суточном режиме 100-50-100% показаны на рисунках 3-4



Рисунок 3 – Алгоритм управления реактором в ночном интервале времени для реализации суточного маневренного режима при минимизации водобмена [Algorithm for controlling the reactor in the night time interval for the realization of the daily maneuvering regime with minimization of the water exchange]



Рисунок 4 – Алгоритм управления реактором в дневном интервале времени для реализации суточного маневренного режима при минимизации водобмена [Algorithm for controlling the reactor in the day time interval for the realization of the daily maneuvering regime with minimization of the water exchange]

Поиск оптимального алгоритма управления нейтронным полем в реакторе при реализации суточного режима проводился на графике изменения тепловых нагрузок 100-50-100% номинальной мощности для различных моментов кампании стационарной топливной загрузки 6 блока НВАЭС. В качестве базового варианта управления был выбран вариант из материалов РНЦ «КИ» [9-18] для той же стационарной кампании 6 блока НВАЭС на момент кампании 300эфф. суток. Данный вариант служит отправной точкой для проведения сравнительного анализа различных рассмотренных вариантов управления с использованием ПРОСТОР.

На рисунке 5 приведены поведение параметров активной зоны при выходе в стационарный суточный режим маневрирования для графика нагрузки 100–50–100%Wном в конце стационарной кампании 6 блока НВАЭС, подсчитанные по программе ИР.

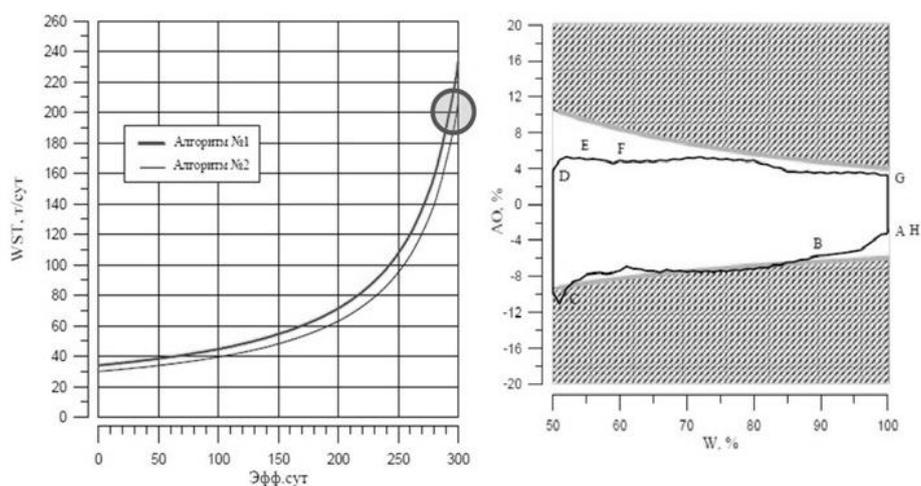


Рисунок 5 – Накопление жидких отходов при работе реактора в суточном графике нагрузки 100-50-100% для двух алгоритмов управления. Офсетно-мощностная диаграмма работы реактора в режиме суточного графика нагрузок 100-50-100% (стационарный цикл маневрирования). Алгоритм № 2. Стационарная кампания (300 эфф. сут) [Accumulation of liquid waste during reactor operation in a daily load schedule of 100-50-100% for two control algorithms. Offset-power diagram of reactor operation in the mode of daily load graph 100-50-100% (stationary maneuvering cycle). Algorithm No. 2. Stationary Campaign (300 eff. day)]

При сохранении в целом схемы оптимального алгоритма управления существуют различные схемы движения управляющих групп ОР СУЗ при переходе из дневного режима в ночной. При использовании штатного разрешенного коридора значений офсета 12 группу нужно погружать гораздо ниже 50% извлечения (15%-35% в зависимости от момента кампании), а 11 группу – необходимо погружать, примерно, в соответствии с алгоритмом движения групп ОР СУЗ в режиме ПД. В этом случае перестройка нейтронных полей по объёму активной зоны происходит таким образом, что величина аксиального офсета увеличивается при погружении 12 группы ниже 50%. И это позволяет вписать значения офсета в ночном режиме в разрешенную область, полученную по штатной методике. При этом способ движения 12 группы может быть разным. Были рассмотрены 2 алгоритма погружения 12 группы.

Первый алгоритм движения групп следующий. 12 группа погружается до 50% извлечения по высоте активной зоны очень медленно, примерно в течение одного часа с дополнительным вводом бора для ускорения снижения мощности. Это позволяет удерживать значения аксиального офсета от больших по модулю отрицательных значений. Ниже 50% извлечения 11 и 12 группы погружаются до нижних определенных заранее границ быстро с максимально допустимой скоростью.

Второй алгоритм движения групп следующий. 12 группа быстро погружается до нижней заранее определенной границы с максимально допустимой скоростью. Затем погружается 11 группа до нижней установленной алгоритмом границы. Группы погружаются в режиме индивидуального движения без ПД. При этом происходит выход аксиального офсета за нижнюю границу разрешенного коридора по офсетно-мощностной диаграмме в течение интервала времени, порядка 1-3 минут, что разрешено Техническим Регламентом.

Ниже приведены результаты моделирования по п/к ПРОСТОР суточного режима 100-50-100% мощности при использовании наиболее оптимального варианта управления: варианта с температурным и офсетным регулированием, которые

базируются на штатной офсетно-мощностной диаграмме для 1-го варианта движения 11 и 12 групп ОР СУЗ при разгрузке энергоблока (нижние границы: 12гр.-15%, 11гр.-67%, медленное погружение с вводом бора). При этом происходит удержание фазовой траектории аксиального офсета полностью в пределах разрешенного коридора по штатной методике.

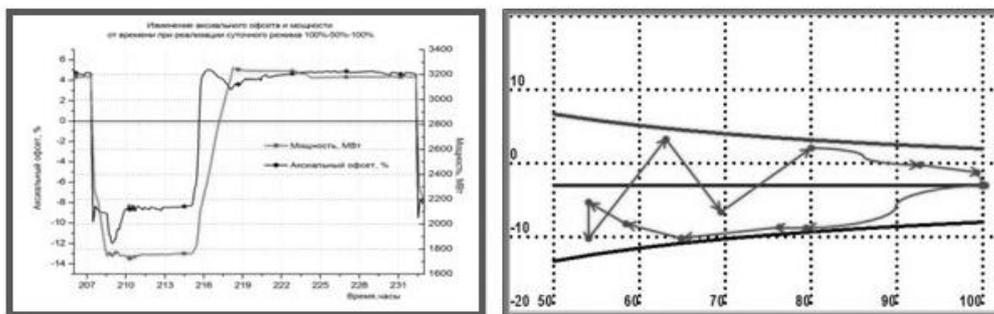


Рисунок 6 – Зависимость офсета и мощности от времени в течение суток в интервале одного из установившихся циклов для 1-го варианта перемещения 12 группы. Фазовая траектория аксиального офсета в пределах их разрешенной области, установленной офсетно-мощностной диаграммой по штатной методике для 1-го варианта [Dependence of offset and power on time during the day in the interval of one of the established cycles for the 1st variant of the movement of group 12. The phase trajectory of axial offset within their allowed area, established by the offset-power diagram according to the standard technique for the first variant]

Ниже приведены результаты моделирования по п/к ПРОСТОР суточного режима 100-50-100% мощности при использовании наиболее оптимального варианта управления: варианта с температурным и офсетным регулированием, который базируются на офсетно-мощностной диаграмме по штатной методике для 2-го варианта движения 11 и 12 групп ОР СУЗ при разгрузке энергоблока (нижние границы: 12гр.-15%, 11гр.-67%, быстрое погружение, без бора). При этом наблюдается выход фазовой траектории аксиального офсета за нижнюю границу разрешенного коридора по штатной методике в течение 1-3 минут.

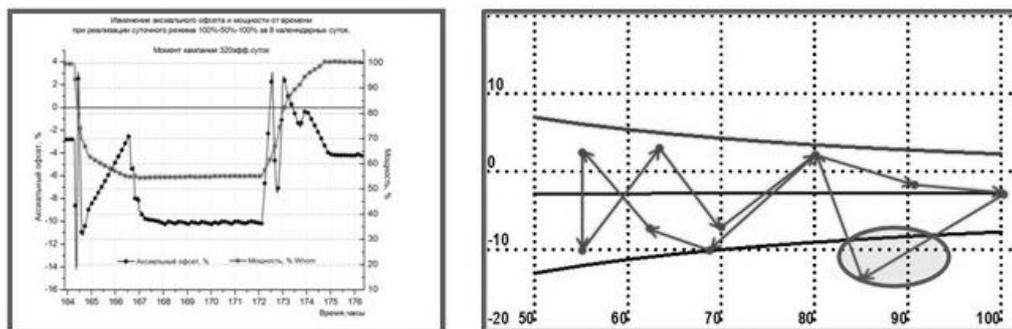


Рисунок 7 – Зависимость офсета и мощности от времени в течение суток в интервале одного из установившихся циклов для 2-го варианта перемещения 12 группы. Фазовая траектория аксиального офсета в пределах их разрешенной области, установленной офсетно-мощностной диаграммой по штатной методике для 2-го варианта [Dependence of offset and power on time during the day in the interval of one of the established cycles for the second version of the movement of group 12. The phase trajectory of the axial offset within their allowed area, established by the offset-power diagram by the standard method for the second variant]

Также был рассмотрен алгоритм управления на базе офсетно-мощностной диаграммы по данным СВРК. При этом схема движения групп ОР СУЗ - следующая. 12-ая группа погружается до 30-35%, а 11 группа до 50-60%. В этом случае достигаются большие по модулю отрицательные значения аксиального офсета до -25 - -35%, выходящие за пределы офсетного коридора по штатной методике. Ниже

приведены результаты моделирования суточного режима 100-50-100% мощности при использовании данного алгоритма – алгоритма №3. В этом случае фазовая траектория офсета вне пределов разрешенного коридора по штатной методике, но в пределах разрешенного коридора по данным СВРК без учета усталостных накоплений.

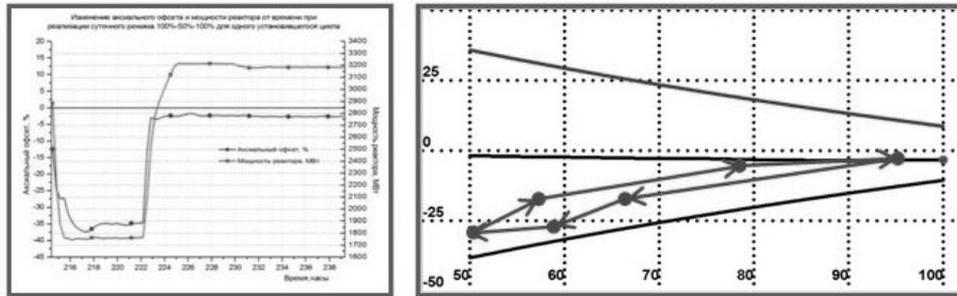


Рисунок 8 – Зависимость офсета и мощности от времени в течение суток в интервале одного из установившихся циклов для 3-го варианта перемещения 12 групп. Фазовая траектория аксиального офсета в пределах их разрешенной области, установленной офсетно-мощностной диаграммой по штатной методике для 3-го варианта [Dependence of offset and power on time during the day in the interval of one of the established cycles for the third variant of displacement of 12 groups. The phase trajectory of axial offset within their allowed area, established by the offset-power diagram according to the standard technique for the third variant]

Результаты проведенных исследований по 3-м рассмотренным вариантам алгоритмам движения ОР СУЗ по п/к ПРОСТОР и варианту РНЦ «КИ» по программе ИР, показывают следующие затраты по водо-обмену:

- РНЦ «КИ» - момент кампании 300 эфф.суток: 200т/сутки
- 1 вариант - момент кампании 320 эфф.суток: 55т/сутки
- 2 вариант - момент кампании 320 эфф.суток: 17т/сутки
- 3 вариант - момент кампании 320 эфф.суток: 11т/сутки

Помимо приведенных результатов были получены расчетные данные для нескольких моментов 8-ой кампании: 90 эфф.суток, 170 эфф.суток, 245 эфф.суток, 320 эфф.суток. Для каждого момента кампании расчёты проводились в течение 10 календарных суток. В течение этих суток были оценены среднесуточные затраты воды за это время. На основе этих данных была построена зависимость затрат воды от времени работы топливной загрузки. Конечно, для всех этих моментов кампании были выполнены все требования по безопасной эксплуатации активной зоны при реализации суточного режима 100-50-100%.

На рисунке 9 приведена зависимость затрат воды от времени при работе блока на постоянной мощности (суммарные затраты воды в этом случае минимальны) и при маневрировании мощностью для разных вариантов управления.

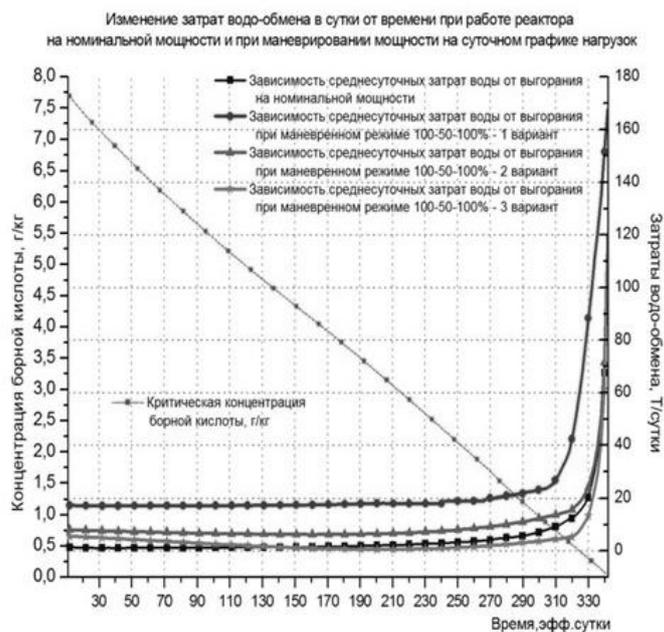


Рисунок 9 – Зависимость среднесуточных затрат воды от времени работы топливной загрузки на постоянной мощности и в режиме суточного маневрирования мощностью [Dependence of the average daily water consumption on the time of operation of the fuel load at constant power and in the mode of daily maneuvering with power]

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение можно сказать, что оптимизация управления суточным режимом с глубоким погружением 12 группы и большим участием температурного регулирования приводит к существенной экономии водообмена. Причем, при использовании офсетно-мощностной диаграммы по прямым данным СВРК алгоритм управления можно построить гораздо легче, и затраты воды оказываются заметно меньшими, чем в случае использования офсетно-мощностной диаграммы по методике РНЦ «КИ». Однако такой способ регулирования возможен только для разовых случаев.

И ещё необходимо обратить внимание на то, что при указанных стратегиях управления остается открытым вопрос о возможности изменения давления второго контура в указанном диапазоне. Поэтому следующим шагом в проведении дальнейших исследований оптимальных алгоритмов управления суточным режимом является проверка возможности синхронизации работы регуляторов 2-го контура с используемым изменением давления во 2-ом контуре.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аверьянова, С.П.* Метод офсет-мощностной фазовой диаграммы для управления энерговыделением реактора [Текст] / С.П. Аверьянова, Н.С. Вохмянина, Д.А. Злобин, П.Е. Филимонов, В.И. Кузнецов, В.Б. Лаговский // Атомная энергия. – 2016. – Т. 121, № 3. – С. 123-127.
2. *Аверьянова, С.П.* Контроль локальной линейной мощности твэлов в активной зоне ВВЭР-1000 с помощью офсет-мощностной диаграммы [Текст] / С.П. Аверьянова, Г.Л. Лунин, В.Н. Проселков [и др.] // Атомная энергия. – 2002. – Т. 93, №1. – С. 13-18.
3. *Филимонов, П.Е.* Управление энергораспределением ВВЭР с помощью офсет-офсетной диаграммы [Текст] / П.Е. Филимонов // Атомная энергия. – 1992. – Т. 73, № 3. – С. 175-179.
4. *Выговский, С.Б.* Опыт использования программного комплекса «ПРОСТОР» в расчетной поддержке эксплуатации Клан АЭС и перспективы его дальнейшего применения на АЭС с ВВЭР-1000 [Текст] / С.Б. Выговский [и др.] // Сборник материалов 14-й ежегодной конференции ЯО России «Научное обеспечение безопасного использования ядерных энергетических технологий». – 2003. – С. 121-123.

5. Приложение к аттестационному паспорту №182 от 28.10.2004 г. Программный комплекс ПРОСТОР (версия 1) [Текст] / С.Б. Выговский, В.Г. Зимин, Е.В. Чернов. – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, 2004. – 8 с.
6. *Аверьянова, С.П.* Температурное регулирование и маневренность ВВЭР-1000 [Текст] / С.П. Аверьянова, А.А. Дубов, К.Б. Косоуров, П.Е. Филимонов // Атомная энергия. – 2010. – Т. 109, № 6. – С. 198-202.
7. *Беденко, С.В.* Основы управления нейтронным полем в ядерном реакторе [Текст] / С.В. Беденко, В.Н. Нестеров, И.В. Шаманин. – Томск : Издательство Томского политехнического университета, 2009. – 176 с.
8. *Игнатенко, Е.И.* Маневренность реакторов типа ВВЭР [Текст] / Е.И. Игнатенко, Ю.Н. Пыткин. – Москва : Энергоатомиздат, 1985. – 88 с.
9. Разработка технического проекта РУ АЭС-2006, обоснование ядерной и радиационной безопасности в соответствии с техническим заданием № 392М-ТЗ-001, разработка материалов для включения в ПООБ для энергоблоков №№ 1, 2 (НВАЭС-2 и ЛАЭС-2), а также материалов для включения в проект АЭС (НВАЭС-2, ЛАЭС-2). Отчет о научно-исследовательской работе «Курчатовский институт» [Текст] / рук. К.Б. Косоуров, исполн.: В.И. Паплов, С.П. Аверьянова, С.С. Алешин [и др.] – Москва, 2010. – Инв.№ 32/1-79-310. – С. 324-378.
10. *Аверьянова, С.П.* Испытание усовершенствованных алгоритмов управления энерговыделением ВВЭР-1000 в условиях маневренных режимов на Тяньваньской АЭС (Китай) [Текст] / С.П. Аверьянова, К.Б. Косоуров [и др.] // Атомная энергия. – 2007. – Т. 103, № 5. – С. 277-282.
11. *Аверьянова, С.П.* Внедрение усовершенствованных алгоритмов управления энерговыделением активной зоны ВВЭР-1000 на Хмельницкой АЭС [Текст] / С.П. Аверьянова, Ю.М. Семченков [и др.] // Атомная энергия. – 2005. – Т. 98, № 6. – С. 414-421.
12. *Аверьянова, С. П.* Работа ВВЭР-1200/130 в суточном графике нагрузки [Текст] / С.П. Аверьянова, К.Б. Косоуров [и др.] // Атомная энергия. – 2012. – Т. 113, № 5. – С. 247-252.
13. *Поваров, В. П.* Предупреждение и подавление аксиальных ксеноновых колебаний в активной зоне ВВЭР-1000 [Текст] / В.П. Поваров, О.В. Лебедев, В.В. Макеев [и др.] // Теплоэнергетика. – 2003. – Т.5. – С. 11-15.
14. *Филимонов, П.Е.* Подавление аксиальных колебаний энергораспределения ВВЭР-1000 без органов регулирования половинной длины [Текст] / П.Е. Филимонов, Ю.А. Крайнов // Атомная энергия. – 1995. – Т. 78, № 5. – С. 388-589.
15. *Филимонов, П.Е.* Поддержание равновесного офсета – эффективный способ подавления ксеноновых колебаний в ВВЭР-1000 [Текст] / П.Е. Филимонов, С.П. Аверьянова // Атомная энергия. – 2001. – Т.90, №3. С. 231-233.
16. *Филимонов, П.Е.* Испытания маневренности ВВЭР-1000 на 5-м блоке Запорожской АЭС [Текст] / П.Е. Филимонов, С.П. Аверьянова, С.Г. Олейник [и др.] // Атомная энергия. – 1998. Т. 85, № 5. – С. 364-367.
17. *Максимов, М.В.* Управление аксиальным офсетом ядерного реактора при маневрировании мощностью [Текст] / М.В. Максимов, К.В. Беглов, Н.Ф. Каназирский // Автоматизация технологических и бизнес-процессов. – 2015. – Т. 7, № 1. – С. 54-61.
18. *Никольский, М.В.* Аксиальный офсет как мера устойчивости легководного ядерного реактора при суточном маневре мощностью [Текст] / М.В. Никольский // Автоматизация технологических и бизнес-процессов. – 2014. – Т. 6, № 4. – С. 65-72.

## REFERENCES

- [1] Aver'yanova S.P., Vohmyanina N.S., Zlobin D.A., Filimonov P.E., Kuznecov V.I., Lagovskij V.B. Metod ofset-moshchnostnoj fazovoj diagrammy dlya upravleniya ehnergovydeleniem reaktora [Offset-Power Phase Diagram Method to Control the Energy Release of the Reactor]. Atomnaya ehnergiya [Atomic Energy]. 2016. T. 121. № 3. P. 123-127 (in Russian).
- [2] Aver'yanova S.P., Lunin G.L., Proselkov V.N. Kontrol' lokal'noj linejnoy moshchnosti tvehlov v aktivnoj zone VVEHR-1000 s pomoshch'yu ofset-moshchnostnoj diagrammy [Control of Local Linear Power of Fuel Rods in the WVER-1000 Core Using Offset Power Diagram]. Atomnaya ehnergiya [Atomic Energy]. 2002. T. 93. № 1. P. 13-18 (in Russian).
- [3] Filimonov P.E. Upravlenie ehnergoraspredeleniem VVEHR s pomoshch'yu ofset-ofsetnoj diagrammy [VVER Power Distribution Control Using Offset-Offset Diagram]. Atomnaya ehnergiya [Atomic Energy]. 1992. T. 73. № 3. P. 175-179 (in Russian).

- [4] Vygovskij S.B. Opyt ispol'zovaniya programmnoho kompleksa «PROSTOR» v raschetnoj podderzhke ehkspluatatsii Kln AEHS i perspektivy ego dal'nejshego primeneniya na AEHS s VVEHR-1000 [Experience in Using the Software Complex "PROSTOR" in the Calculation Support of Operation for KLN NPP and the Prospects of its Further Application at NPP with WWER-1000]. Sbornik materialov 14-j ezhegodnoj konferencii YAO Rossii «Nauchnoe obespechenie bezopasnogo ispol'zovaniya yadernyh ehnergeticheskikh tekhnologij» [Collection of materials of the 14th annual conference of nuclear weapons of Russia "Scientific Provision of Safe Use of Nuclear Energy Technologies"]. 2003. P. 121-123 (in Russian).
- [5] Vygovskij S.B., Zimin V.G., Chernov E.V. Prilozhenie k attestacionnomu pasportu №182 ot 28.10.2004g. Programmnyj kompleks PROSTOR (versiya 1) [ Application to the Attestation Manual of the program complex PROSTOR (version.1). №182 from 28.10.2004]. Nacional'nyj issledovatel'skij yadernyj universitet «MIFI» [National Research Nuclear University "MEPhI"]. Moscow. 2004. 8 p. (in Russian).
- [6] Aver'yanova S.P., Dubov A.A., Kosourov K.B., Filimonov P.E. Temperaturnoe regulirovanie i manevrennost' VVEHR-1000 [Temperature regulation and maneuverability of VVER-1000]. Atomnaya ehnergiya [Atomic Energy]. 2010. T. 109. № 6. P. 198-202 (in Russian).
- [7] Bedenko S.V., Nesterov V.N., SHamanin I.V. Osnovy upravleniya nejtronnym polem v yadernom reaktore [Basics of neutron field control in nuclear reactors]. Tomsk: Izdatel'stvo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta [Publishing house of Tomsk Polytechnic University]. 2009. 176 p. (in Russian).
- [8] Ignatenko E.I., Pytkin Y.N. Manevrennost' reaktorov tipa VVER [The maneuverability of the WWER reactors]. Moscow. Energoatomizdat. 1985. 88 p. (in Russian).
- [9] K.B. Kosourov, ispoln. [performers] : V.I. Paplov, S.P. Aver'yanova, S.S. Aleshin. Razrabotka tekhnicheskogo proekta RU AEHS-2006, obosnovanie yadernoj i radiacionnoj bezopasnosti v sootvetstvii s tekhnicheskim zadaniem № 392M-TZ-001, razrabotka materialov dlya vklyucheniya v POOB dlya ehnergoblokov №№ 1, 2 (NVAEHS-2 i LAEHS-2), a takzhe materialov dlya vklyucheniya v proekt AEHS (NVAEHS-2, LAEHS-2) [ Development of Technical Project of NPP-2006, Justification of Nuclear and Radiation Safety in Accordance with Technical Specification № 392M-TK-001, Development of Materials for Inclusion in PSU for Power Units №№ 1, 2 (NVNPP-2 and LAES-2), as well as Materials for Inclusion in the NPP Project (NVNPP-2, LAES-2)]. Otchet o nauchno-issledovatel'skoj rabote «Kurchatovskij institut» [Research Work Report of "Kurchatov Institute"]. Moscow. 2010. Inv. № 32/1-79-310. P. 324-378 (in Russian).
- [10] Aver'yanova S.P., Kosourov K.B., Semchenkov Y.M., Filimonov P.E., Hajtao Lyu, Jou Li. Ispytanie usovershenstvovannyh algoritmov upravleniya ehnergovydeleniem VVEHR-1000 v usloviyah manevrennyh rezhimov na Tyan'van'skoj AEHS (Kitaj) [Testing of advanced algorithms for controlling the energy release of VVER-1000 in conditions of maneuvering regimes at Tianwan NPP (China)]. Atomnaya ehnergiya [Atomic Energy]. 2007. T. 103. № 5. P. 277-282 (in Russian).
- [11] Aver'yanova S.P., Semchenkov Y.M., Filimonov P. E., Gorohov A.K., Molchanov V.L., Korennoj A.A., Makeev V.P. Vnedrenie usovershenstvovannyh algoritmov upravleniya ehnergovydeleniem aktivnoj zony VVEHR-1000 na Hmel'nickoj AEHS [Adoption of Improved Algorithms for Controlling the Power Release in the WWER-1000 Core at at Khmelnitsky NPP]. Atomnaya ehnergiya [Atomic Energy]. 2005. T. 98. № 6. P. 414-421 (in Russian).
- [12] Aver'yanova S.P., Dubov A.A., Kosourov K.B., Semchenkov Y.M., Filimonov P.E. Rabota VVEHR-1200/1300 v sutochnom grafike nagruzki [WWER-1200/1300 Operation in a Daily Load Schedule]. Atomnaya ehnergiya [Atomic Energy]. 2012. T. 113. № 5. P. 247-252 (in Russian).
- [13] V. P. Povarov, O. V. Lebedev, V. V. Makeev. Preduprezhdenie i podavlenie aksial'nyh ksenonovyh kolebanij v aktivnoj zone VVEHR-1000 [Prevention and Suppression of Axial Xenon Oscillations in the WWER-1000 Core]. Teploehnergetika [Heat Power Engineering]. 2003. T. 5. P. 11-15 (in Russian).
- [14] Filimonov P.E., Krajnov YU.A. Podavlenie aksial'nyh kolebanij ehnergoraspredeleniya VVEHR-1000 bez organov regulirovaniya polovinnnoj dliny [Suppressing Axial Oscillations of the Energy Distribution in a WWER-1000 Reactor without Half-Length Control Rods]. Atomnaya ehnergiya [Atomic Energy]. 1995. T. 78. № 5. P. 388-589 (in Russian).
- [15] Filimonov P.E., Aver'yanova S.P. Podderzhanie ravnovesnogo ofseta – ehffektivnyj sposob podavleniya ksenonovyh kolebanij v VVEHR-1000 [Maintaining an Equilibrium Offset as an Effective Method for Suppressing Xenon Oscillations in WWER-1000]. Atomnaya ehnergiya [Atomic Energy]. 2001. T. 90. № 3. P. 231-233 (in Russian).
- [16] Filimonov P.E., Aver'yanova S.P., Olejnik S.G. Ispytaniya manevrennosti VVEHP-1000 na 5-m bloke Zaporozhskoj AEHS [Tests of WWER-1000 Maneuverability on the Fifth Unit of the

- Zaporozhye Nuclear Power Plant]. *Atomnaya ehnergiya [Atomic Energy]*. 1998. T. 85. № 5. P. 364-367 (in Russian).
- [17] Maksimov M. V., Beglov K. V., Kanazirskij N. F. Upravlenie aksial'nym ofsetom yadernogo reaktora pri manevrirovanii moshchnost'yu [Control of Axial Offset in Nuclear Reactor in the Condition of Maneuvering Regimes ]. *Avtomatizaciya tekhnologicheskikh i biznes-processov [Automation of Technological and Business Processes]*. 2015. T. 7. № 1. P. 54-61 (in Russian).
- [18] Nikol'skij M. V. Aksial'nyj ofset kak mera ustojchivosti legkovodnogo yadernogo reaktora pri sutochnom manevre moshchnost'yu [Axial Offset as Measure of Stability of Light Water Nuclear Reactor in the Condition of Maneuvering Regimes]. *Avtomatizaciya tekhnologicheskikh i biznes-processov [Automation of Technological and Business Processes]*. 2014. T. 6. № 4. P. 65-72 (in Russian).

## **Optimization of Control Algorithms of NPP with WWER-1200 to Minimize First Circuit Water Exchange in the Implementation of Daily Maneuvering (Load Following) Modes**

**S.B. Vygovskiy<sup>1</sup>, R.T. Al Malkawi<sup>2</sup>, A.G. Khachatryan<sup>3</sup>, Sh.H. Abrahamyan<sup>4</sup>**

*National Research Nuclear University «MEPhI», Kashirskoye shosse, 31, Moscow, Russia 115409*

<sup>1</sup> *ORCID iD: 0000-0002-9995-1222*

*WoS Researcher ID: P-5608-2018*

*vigovskii@mail.ru*

<sup>2</sup> *ORCID iD: 0000-0003-4458-7264*

*WoS Researcher ID: P-5338-2018*

*rashdanmalkawi@gmail.com*

<sup>3</sup> *ORCID iD: 0000-0002-1785-5342*

*WoS Researcher ID: P-5318-2018*

*artsrun-khachatryan@mail.ru*

<sup>4</sup> *ORCID iD: 0000-0002-9564-230X*

*WoS Researcher ID: P-5529-2018*

*Shavarsh.abrahamyan1993@gmail.com*

**Abstract** – In this paper we present the results of numerical studies of control algorithms for the spatial distribution of the neutron field in the reactor core of WWER-1200 in the implementation of daily maneuvering regimes at NPPs with WWER-1200. The possibility of automated control of axial offset is demonstrated using one of the control groups with the aim of removing the psychological stress on operational personnel at nuclear power plants in maneuvering regimes. At the same time there is an additional minimization of water exchange while saving all nuclear safety parameters in the reactor core. The research is carried out on the basis of the PROSTOR software complex, which currently used in the Novo-Voronezh NPP to conduct training sessions with operational personnel of nuclear power plants and their training in optimal control algorithms for the power unit in maneuvering regimes. The methodology of adjustment of parameters of offset regulation depending on the neutron-physical characteristics of the core is proposed. The relevance of the conducted researches is related to the fact that for the NNPP-2 and LNPP-2 according to the NPP-2006 project in Russia it is planned to test the daily operating modes of the NPP with the power maneuvering in a wide range of their values. Verification of the operation of power units in such modes and their reliability will improve the competitive ability of NPP equipment with WWER abroad.

**Keywords:** WWER-1200, offset-power phase diagram, axial offset (AO), automated power controller (APC), control algorithm, water exchange.