

## МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ НЕЙТРОННОГО ПОЛЯ В ФИЗИЧЕСКИ БОЛЬШОМ ЛЕГКОВОДНОМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ РЕАКТОРЕ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

А. А. Коренной

*Хмельницкая АЭС, Нетешин*

На примере ВВЭР-1000 проведен анализ приближенного решения задачи оптимального управления реактором во время ксеноновых переходных процессов. Исследованы возможности ранее разработанного алгоритма поддержания заданного офсета распределения энерговыделения.

### Об управлении энерговыделением

Как интегральные, так и распределенные параметры реактора, включая мощность, неравномерности энерговыделения, эффективности средств воздействия на реактивность, являются функционалами нейтронного поля. Поэтому важнейшее свойство, обеспечивающее безопасность реактора, – устойчивость нейтронного поля относительно происходящих в процессе эксплуатации процессов. Среди таких процессов для больших водо-водяных реакторов актуальным является перераспределение концентрации ксенона и связанная с этим проблема обеспечения устойчивости и управления аксиальным распределением поля нейтронов.

Управление реактором осуществляется путем деформации распределения нейтронов в отдельных частях активной зоны (АКЗ). В реакторах с физически малыми АКЗ (ВВЭР-440), для которых не выполняется критерий  $L \gg VM$  [1], перераспределение ксенона при возмущениях энерговыделения происходит достаточно равномерно и практически не вызывает пространственных эффектов. Здесь  $L$  – линейный размер, АКЗ – высота для аксиальной устойчивости,  $M$  – длина миграции нейтронов,  $V$  – формфактор, связанный с определенной модой колебаний.

Аксиальное распределение энерговыделения ВВЭР-1000, как и аналогичных PWR, не обладает свойством устойчивости во время ксеноновых переходных процессов [1]. Свободные ксеноновые колебания в них могут расходиться. Причем свойство это зависит как от средней глубины выгорания топлива, находящегося в АКЗ в данный момент, так и от типа используемого топлива – от количества поглотителя в конструкционных элементах.

В АКЗ ВВЭР-1000 со штатными тепловыделяющими сборками (ТВС), имеющими стальные направляющие каналы (НК) и дистанционирующие решетки (ДР), со средним выгоранием, близким к нулю, что бывает только при первом пуске нового энергоблока, колебания сходятся очень быстро и удается наблюдать только один период волны. В случае, если используются ТВС с циркониевыми НК и ДР, продолжительность колебаний увеличивается в 2 - 3 раза. С ростом средней глубины выгорания топлива, находящегося в АКЗ, устойчивость будет снижаться и вскоре «свободная» ксеноновая волна – колебания, протекающие без специальных управляющих воздействий, станет расходящейся.

Увеличение глубины выгорания топлива диктуется необходимостью повышать экономические характеристики работы реакторов [2]. Использование ТВС с циркониевыми НК и ДР является одним из средств достижения этой цели. Оба эти фактора снижают устойчивость нейтронных полей в реакторе. Чтобы не допустить нарушения установленных ограничений на энерговыделение в АКЗ, принято использовать специальные алгоритмы управления [3]. Основным регулируемым параметром в этих алгоритмах является аксиальный офсет

$$AO = \frac{Q_1 - Q_2}{Q},$$



где  $Q_1, Q_2$  - мощность нижней и верхней половин АКЗ соответственно.  $Q = Q_1 + Q_2$  - мощность АКЗ в целом. Заданное значение  $AO$  определяется расчетным путем для стационарного режима работы реактора. Отклонения  $AO$  от заданного значения, согласно проектной документации реакторной установки (РУ) ВВЭР-1000/В-320, в абсолютных значениях не должны превышать  $\pm 5\%$  при работе на уровнях мощности выше  $80\%$  от номинального. Это является одним из основных критериев при определении допустимого уровня мощности РУ и остаточного ресурса ядерного топлива.

Можно показать [4, 5], что в случае, если ограничения на энерговыделение соблюдаются в стационарном режиме работы реактора, а в переходных процессах соблюдаются ограничения на  $AO$ , распределение энерговыделения по объему реактора в течение всего времени будет обладать необходимой степенью равномерности.

Штатный алгоритм, используемый в настоящее время на большинстве энергоблоков, не обладает достаточной эффективностью, особенно при работе в условиях повышенных глубин выгорания. Имеется несколько подходов к его усовершенствованию [6 - 8], основанных как на модификациях методов, используемых на PWR, так и на оригинальных разработках. Однако их использование на действующих ВВЭР-1000 ограничено в основном из-за относительно небольшого числа имеющихся органов регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ).

### Алгоритм поддержания заданного $AO$

В работе [9] был предложен принцип усовершенствования штатного алгоритма, который позволил сформулировать алгоритм поддержания заданного значения  $AO$ . Данный алгоритм имеет две модификации в зависимости от выбранных средств управления: с использованием жидкостного регулирования и без него. Вариант с борным регулированием уже семь лет используется на Хмельницкой АЭС, а также и на некоторых других. Основное свойство этого варианта, отличающее его от большинства усовершенствованных алгоритмов, - полная совместимость с действующими регламентными ограничениями.

При использовании этого метода последовательно используются два принципиальных положения, полученных эмпирическим путем. Первое гласит, что воздействия, направленные на недопущение возникновения ксеноновой волны, намного эффективнее, чем ее последующее подавление. Второе положение позволяет определить оптимальное управление, которое ищется как решение уравнения

$$f({}^1Q, {}^1T_{ex}, {}^1H_{10}, {}^1H_5, \dots) = f({}^2Q, {}^2T_{ex}, {}^2H_{10}, {}^2H_5, \dots)$$

относительно неизвестных  ${}^2H_{10}, {}^2H_5$ . Функционал  $f$  представляет собой стационарный  $AO$  [9], зависящий от параметров состояния АКЗ:  $Q$  - тепловая мощность реактора;  $T_{ex}$  - температура теплоносителя (ТН) на входе в АКЗ;  $H_{10}, {}^1H_5$  - положения управляющих групп (№ 5 и № 10) ОР СУЗ; индексы «1» и «2» соответствуют исходному стационарному состоянию АКЗ и конечному, установившемуся после завершения всех переходных процессов.

При реализации сложного графика изменения мощности РУ, с последовательными переходами между уровнями  ${}^1Q, \dots, {}^nQ$ , выполнение равенства

$$f({}^1Q, {}^1T_{ex}, {}^1H_{10}, {}^1H_5, \dots) = f({}^2Q, {}^2T_{ex}, {}^2H_{10}, {}^2H_5, \dots) = \dots = f({}^nQ, {}^nT_{ex}, {}^nH_{10}, {}^nH_5, \dots)$$

обеспечивает минимизацию колебаний  $AO$  как во время работы по этому графику, так и в последствии. При этом продолжительность времени работы реактора между переходами на разные уровни мощности не играет никакой роли, т.е. отсутствует необходимость ожидания окончания процесса перераспределения  ${}^{135}\text{Xe}$  по объему АКЗ.

Получены расчетные и экспериментальные подтверждения работоспособности этого алгоритма. Было установлено, что управление реактором ВВЭР-1000 практически без



возбуждения ксеноновых колебаний  $AO$  возможно в достаточно широком диапазоне изменения тепловой мощности, приблизительно 1000 – 3000 МВт.

Данные, включенные в [9], были получены с использованием программы БИПР-7А версии 1998 г. и более ранних версий аналогичных программ. За прошедшее время разработчиками были проведены усовершенствования модуля, выполняющего расчет распределения температуры ТН в АКЗ. Расчеты с использованием БИПР-7А версии 2000 г. позволили обнаружить существенные черты, не описанные в [9].

Проводились расчеты, имитирующие ксеноновый переходной процесс в различные моменты топливных кампаний блока № 1 Хмельницкой АЭС. Рассматривались варианты разгрузки реактора до различных уровней мощности и повышения нагрузки с различных уровней мощности до номинального с одновременным изменением положения групп ОР СУЗ по методу, описанному в [9], обеспечивающему минимум возникающих отклонений  $AO$  от заданного значения, анализировались величины этих отклонений.

В целом были подтверждены результаты, приведенные в [9]. Кроме того, обнаружена зависимость минимальной амплитуды отклонений  $AO$  во время переходного процесса от глубины разгрузки, существование которой предсказано в [10]. Результаты приведены на рис. 1. Все переходы осуществлялись из стационарных состояний, в течение каждого процесса поддерживалась критическая концентрация борной кислоты в теплоносителе, начальное отравление ксеноном соответствовало исходным состояниям.

Резкий рост амплитуды колебаний  $AO$  при разгрузках является следствием того, что, как показано в [10], алгоритм поддержания заданного  $AO$  является приближенным решением задачи управления переходным процессом и условия этого приближения

вносят дополнительные ограничения на ширину диапазона изменения мощности, хотя и оставляют его достаточно большим – 1500 - 3000 МВт.

В работе [11] был предложен вариант применения этого алгоритма без использования жидкостного регулирования. При этом отмечено, что в соответствии с действующими в настоящее время ограничениями на расположение групп ОР СУЗ в АКЗ серийного ВВЭР-1000 в зависимости от мощности РУ выполнить маневр с соблюдением требований по  $AO$  и без изменения концентрации бора в теплоносителе не представляется возможным. Причина этого заключается в недостаточной продуманности и непоследовательности имеющихся ограничений, что подтверждается в работах [4, 5].

Алгоритм поддержания заданного значения  $AO$  вытекает из алгоритма поддержания постоянного  $AO$  [3]. Поскольку заданное значение  $AO$  в каждый момент кампании величина постоянная, то поддержание заданного  $AO$  является частным случаем поддержания постоянного  $AO$ . Однако алгоритм поддержания постоянного  $AO$  был направлен на подавление уже развитых колебаний и признан малоэффективным без использования ОР СУЗ с половинной длиной поглотителя. Метод же поддержания заданного  $AO$  ориентирован на недопущение возникновения этих колебаний и проявил очень высокую эффективность. При управлении по этому методу текущее значение  $AO$  постоянно поддерживается равным равновесному, т.е. он является частным случаем и метода поддержания равновесного  $AO$



Рис. 1. Изменения амплитуды колебаний  $AO$  при разгрузке от номинальной мощности до указанной на графике (линия 1) и подъеме мощности от указанной на графике до номинальной (линия 2).



[12], который в свою очередь расширяет наш метод на случаи подавления уже возникших колебаний.

### Двухточечная модель

Концепция одногрупповой двухточечной модели реактора применительно к ВВЭР-1000 была известна еще в начале 90-х годов. Однако проведенный анализ показал, что уровень ее проработки позволял в достаточно грубых приближениях [8] изучать переходные процессы качественно, определяя в основном типы поведения реактора и наличие частных решений. Именно таким образом был получен метод поддержания постоянного  $AO$ .

В работе [10] показано, что, опираясь на условия задачи, при исследовании переходных процессов после изменения параметров реактора, с достаточной степенью точности можно считать переток нейтронов через поверхность раздела половин АКЗ и утечку через внешнюю поверхность постоянными  $\int_{S_i} dSD\nabla\Phi = const \equiv R_i$ . Отказавшись от

составления основной системы уравнений с использованием метода отклонений текущего  $AO$  от равновесного, путем интегральных преобразований в одногрупповом приближении удается получить основные уравнения:

$$\int_{V_1} dV\Phi\Sigma_a = \nu Q \frac{1+AO}{2} + R_1,$$

$$\int_{V_2} dV\Phi\Sigma_a = \nu Q \frac{1-AO}{2} + R_2.$$

При этом в [10] была продемонстрирована возможность создания такой модели для большего числа энергетических групп.

Использование управления в явном виде позволило построить не только двухточечную модель реактора в ксеноновом переходном процессе, но и двухточечную модель оптимального управления процессом. Это позволило теоретически обосновать метод поддержания заданного значения  $AO$ , ранее обнаруженный эмпирически. При этом была дана новая интерпретация отдельных характеристик метода, которую ранее невозможно было сделать из-за недостатков численного моделирования процессов, а также погрешности измерительной аппаратуры.

Главное достижение двухточечной модели – возможность количественно прогнозировать конкретные управляющие воздействия. Для логичного развития модели на область сложных переходных процессов сделаем два предположения, которые затем будут подтверждены путем расчетного моделирования.

Первое касается определения конечного положения органов регулирования непосредственно при переводе реактора на необходимый уровень мощности без изменения  $AO$ . При этом используется приближение аддитивности воздействий как на мощность, так и на  $AO$ . Это приближение может быть использовано потому, что по отдельности органы регулирования ВВЭР-1000 обладают относительно невысокой эффективностью (по сравнению, например, с ВВЭР-440), а размеры ТВС «под ключ» достаточно велики. Расстояние между органами, расположенными не в соседних ТВС, как в нашем случае, составляет примерно  $20 \cdot l$  ( $l$  – длина диффузии нейтронов). Для управления используется небольшое число ОР СУЗ, 6 – 8 % от количества ТВС в АКЗ, величина вызываемого ими изменения мощности относительно невелика – примерно 20 %, поэтому взаимное влияние этих ОР СУЗ достаточно мало и при рассмотрении таких макрохарактеристик энерговыделения, как мощность и  $AO$ , им можно пренебречь. Еще меньше интерференция органов регулирования в процессах, когда интервалы их перемещения не пересекаются или даже находятся в разных половинах АКЗ.

Если зависимость  $AO$  от положений групп и мощности реактора в исходном необязательно стационарном состоянии описывается функциями  $AO(Q)$ ,  $AO(H_{10})$ ,  $AO(H_5)$ , а зависимость мощности от положений групп  $Q(H_{10})$ ,  $Q(H_5)$ , то переход должен быть осуществлен таким образом, чтобы выполнялись равенства

$$AO({}^1Q) + AO({}^1H_{10}) + AO({}^1H_5) = AO({}^2Q) + AO({}^2H_{10}) + AO({}^2H_5),$$

$$\frac{1}{2}Q({}^1H_{10}) + \frac{1}{2}Q({}^1H_5) - {}^1Q = \frac{1}{2}Q({}^2H_{10}) + \frac{1}{2}Q({}^2H_5) - {}^2Q.$$

Вторая гипотеза относилась к рассмотрению случаев ряда последовательных переходов между различными уровнями мощности  ${}^1Q, \dots, {}^nQ$ . Тогда итоговое положение органов регулирования в любой момент времени  $t$  может быть получено из результатов расчета  $\Delta H_5({}^iQ; {}^{i+1}Q; t-t_i)$  по двухточечной модели каждого конкретного перехода с  ${}^iQ$  на  ${}^{i+1}Q$ :

$$H_5(t) = {}^1H_5(t_1) + \sum_{i=1}^{n-1} \Delta H_5({}^iQ; {}^{i+1}Q; t-t_i),$$

где  $n - 1$  – полное число изменений мощности, выполненных от начального стационарного состояния до момента времени  $t$ .

Теперь в случае, если управление проводится без использования борного регулирования, путем относительно простых вычислений, которые могут быть выполнены даже без использования специальных программных средств, заранее можно выбрать график движения органов регулирования, обеспечивающий оптимальное управление как полной интегральной мощностью реактора, так и аксиальным распределением поля энерговыделения.

Была проведена имитация простого переходного процесса по предварительно рассчитанным положениям групп ОР СУЗ. С помощью программы ИР [13] имитировалась разгрузка от 100 до 80 %  $Q_{ном}$ , без изменения концентрации жидкого поглотителя в ТН в конце кампании. Результаты имитации приведены на рис. 2 и 3.

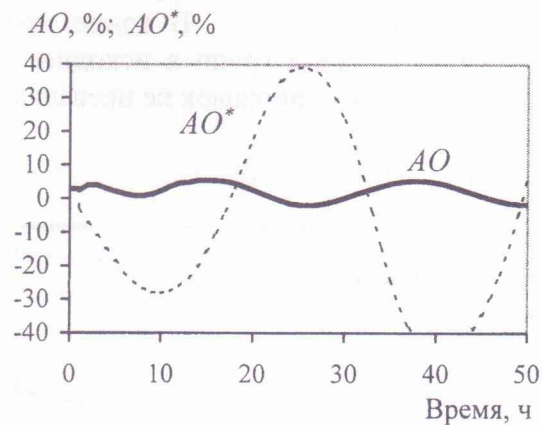
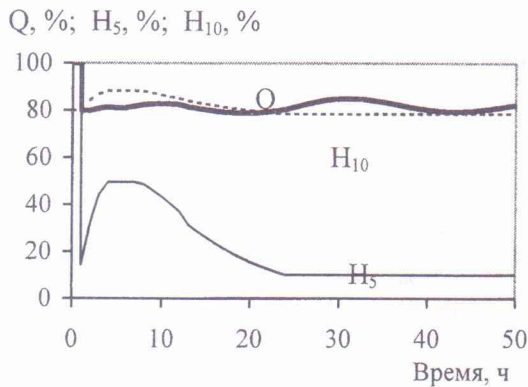


Рис. 2. График изменения мощности и положения ОР СУЗ во время управления переходным процессом без изменения концентрации жидкого поглотителя.

Рис. 3. График изменения АО во время переходного процесса.

Управление проводилось в течение 24 ч с начала разгрузки, затем прекращено для определения остаточных эффектов. На рис. 3 для демонстрации неустойчивости выбранного состояния реактора, а также масштаба амплитуды колебаний показано (линия  $AO^*$ ) изменение  $AO$  после подобной разгрузки с использованием только жидкостного



регулирования. Управление по предлагаемому методу не только позволяет минимизировать амплитуду колебаний, но и обеспечивает устойчивость по окончании управления.

### О базовом и маневренном режимах

В настоящее время все энергоблоки ВВЭР-1000 работают в базовом режиме несения нагрузки. Данный режим позволяет максимально использовать установленную мощность блока, обеспечивая тем самым минимальную себестоимость отпускаемой энергии. Однако удельная стоимость такой энергии на энергорынке в 1,5 - 2 раза ниже, чем для блоков, работающих в режиме слежения за нагрузкой. Работа в режиме слежения за нагрузкой предполагает ежедневные изменения мощности реактора: снижение в ночное время при уменьшении числа потребителей и увеличение в дневное.

Маневрирование реакторами ВВЭР-1000 представляет собой непростую задачу из-за того, что они проектировались под базовую нагрузку [14]. Задача их адаптации под маневренный режим может быть разделена на три составляющих: повышение надежности топливных элементов [15] и оборудования энергоблока по отношению к циклическим нагрузкам, а также создание эффективных методов управления, обеспечивающих устойчивость полей нейтронов.

При работе в режиме ежедневных маневров использование жидкостной системы регулирования для поддержания мощности становится неприемлемым, поскольку ее работа приводит к созданию большого количества жидких радиоактивных отходов. Поэтому при развитии двухточечной модели, прежде всего, обращалось внимание на управление с использованием только механических органов регулирования.

Был выбран график несения нагрузки, типичный для энергоблока, работающего в маневренном режиме. С использованием модели был построен график перемещения групп ОР СУЗ для заданного маневра без изменения концентрации бора в ТН. Затем по этим графикам при помощи программы ИР проведена имитация процесса характерного для работы энергоблока в маневренном режиме, положения групп определялись с помощью предлагаемой модели. При расчете была проведена перегруппировка ОР СУЗ – группа 5 составлена из семи ОР СУЗ, к четырем органам добавлены три симметричные им в секторе 60°. Исходное положение группы 5 выбрано на высоте 35 %. Результаты имитации приведены на рис. 4 и 5. В конце процесса, для подавления остаточных колебаний и обеспечения возврата групп в исходное состояние, их положения определялись с учетом поправок. Величина поправок не превышала 1 %.

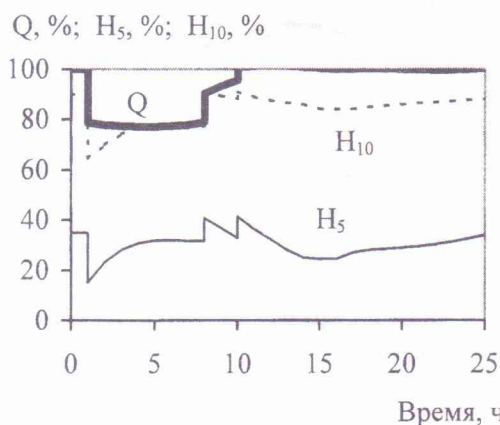


Рис. 4. График изменения мощности и положения ОР СУЗ во время управления переходным процессом без изменения концентрации жидкого поглотителя.

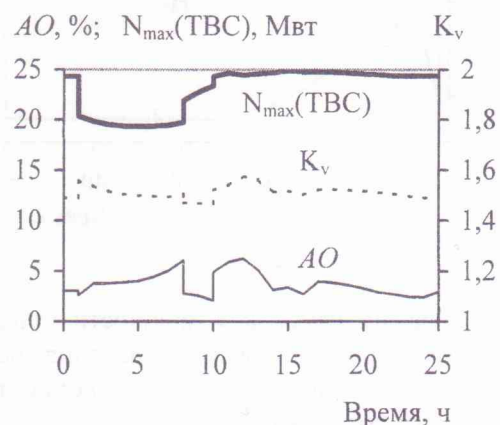


Рис. 5. График изменения характеристик энерговыделения во время переходного процесса.



Кроме текущего значения  $AO$ , при эксплуатации контролируется еще две характеристики неравномерности распределения энерговыделения: мощности отдельных ТВС и коэффициенты неравномерности распределения энерговыделения по объему АКЗ. На рис. 5 приведены графики изменений максимальных значений этих величин. В ходе всего переходного процесса максимальная мощность ТВС ( $N_{max}$ ) увеличивалась на величину не более 0,5 МВт, максимальное значение коэффициента неравномерности по объему ( $K_v$ ) – не более чем на 0,1, отклонение  $AO$  от заданного – не более чем на 4 %. Ни один из этих параметров не превысил установленных ограничений.

Из приведенных данных видно, что принципы двухточечной модели и метода поддержания заданного  $AO$  обеспечивают успешное маневрирование в широком диапазоне изменения мощности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колесов В.Ф., Леттик П.А., Павлов С.П. и др. Динамика ядерных реакторов. – М., Энергоатомиздат, 1990. – 518 с.
2. Коренной А.А. Использование отрицательных эффектов реактивности для повышения эффективности работы энергоблоков ВВЭР-1000 и глубины выгорания отработанного ядерного топлива // Обращение с отработанным ядерным топливом: Сб. докл. междунар. конф. УкрЯО (Киев, 19 – 20 сент. 2000 г.) – Київ: Знання України, 2000. – С. 299 - 304.
3. Karppinen J. Spatial reactor control methods // Nucl. Sci. Eng. – 1977. – Vol. 64. – P. 657 - 672.
4. Разработка усовершенствованного алгоритма управления мощностью и энергораспределением активной зоны серийного ВВЭР-1000 с учетом результатов опытных маневров мощности на 5-м блоке Запорожской АЭС: (Отчет) / РНЦ “КИ”. – № 32/1-64-498.
5. Адаптация усовершенствованных алгоритмов оптимизации управления мощностью применительно к первому блоку Ростовской АЭС: (Отчет) / РНЦ “КИ”. – № 32/1-32-200.
6. Филимонов П.Е., Аверьянова С.П., Филимонова М.П. Управление группами рабочих органов ОР СУЗ в маневренном режиме работы ВВЭР-1000 // Атомная энергия. – 1998. – Т. 84, вып. 5. – С. 383 - 387.
7. Филимонов П.Е., Аверьянова С.П., Олейник С.Г. и др. Испытания маневренности ВВЭР-1000 на 5-м блоке Запорожской АЭС // Атомная энергия. – 1998. – Т. 85, вып. 5. – С. 364 – 367.
8. Филимонов П.Е. Управление энергораспределением ВВЭР с помощью офсет-офсетной диаграммы // Там же. – 1992. – Т. 73, вып. 3. – С. 175 - 179.
9. Коренной А.А., Титов С.Н., Неделин О.В., Литус В.А. Управление аксиальным распределением поля энерговыделения в активной зоне реактора ВВЭР-1000 при переходных процессах // Там же. – 2000. – Т. 88, вып. 4. – С. 252 - 257.
10. Коренной А.А., Неделин О.В. Модель управления аксиальным распределением энерговыделения ядерного реактора с физически большой активной зоной // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. – 2001. – Вып. 3. – С. 15 - 22.
11. Коренной А.А. Совершенствование метода управления полем энерговыделения в активной зоне серийного ВВЭР-1000 при переходных процессах // Новини енергетики. – 2001. – № 3. – С. 34 - 37.
12. Филимонов П.Е., Аверьянова С.П. Поддержание равновесного офсета – эффективный способ подавления ксеноновых колебаний в ВВЭР-1000 // Атомная энергия. – 2001. – Т.90, вып. 3. – С. 231 - 233.
13. Филимонов П.Е., Мамичев В.В., Аверьянова С.П. Программа «Имитатор реактора» для моделирования маневренных режимов работы ВВЭР-1000 // Там же. – 1998. – Т. 84, вып. 6. – С. 560 - 563.
14. Иванов В.А., Игнатенко В.И., Пыткин Ю.Н., Куликов Г.Г. Состояние и перспективы проблемы маневренности энергоблоков АЭС с реакторами ВВЭР // Электрические станции. – 1984. – № 3. – С. 7 – 10.
15. Решетников Ф.Г., Библиашивили Ю.К., Головнин И.С. и др. Проблемы создания твэлов ВВЭР-1000 для работы в условиях маневренных АЭС и повышенного выгорания // Атомная энергия. – 1988. – Т. 64, вып. 4. – С. 258 - 266.

**МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ НЕЙТРОННОГО ПОЛЯ У ФІЗИЧНО ВЕЛИКОМУ ЛЕГКОВОДНОМУ ЕНЕРГЕТИЧНОМУ РЕАКТОРІ ПІД ТИСКОМ**

**А. О. Корінний**

На прикладі ВВЕР-1000 проведено аналіз наближеного рішення задачі оптимального керування реактором під час ксенонових перехідних процесів. Досліджено можливості раніше розробленого алгоритму підтримки заданого офсету розподілу енерговиділення.

**PHYSICALLY LARGE PRESSURISED WATER REACTOR NEUTRON FIELD STABILITY INCREASE METHOD**

**A. A. Korennoj**

The approximate decision analysis of the task of optimum reactor control during the xenon transient processes is carried out on an example WWER-1000. The opportunities of the earlier developed power distribution given offset maintenance algorithm are investigated.

Поступила в редакцію 10.07.02,  
после доработки – 16.10.02.