

# УПРАВЛЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ И ТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

---

УДК 621.039.56:681.5

*М.В. Максимов, Т.А. Цисельская, Е.А. Кокол*

## СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКОЙ С ВВЭР-1000 В МАНЕВРЕННОМ РЕЖИМЕ

### Введение

В настоящее время самыми мощными энергоблоками в стране являются энергоблоки с водо-водяными энергетическими реакторами номинальной мощностью 1000 МВт (ВВЭР-1000). Они функционируют на четырех действующих украинских АЭС. В мире всего эксплуатируется 26 таких энергоблоков, половина из которых расположена в Украине.

Оборудование первого и второго контуров энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000 рассчитано на эксплуатацию в двух основных режимах: стационарном и маневренном. Для обоих режимов характерно изменение уровня мощности, однако в стационарном режиме это изменение происходит редко, в маневренном — в зависимости от уровня нагрузки энергосистемы.

Преимущественно все энергоблоки эксплуатируются в стационарном режиме, хотя эксплуатация в маневренном режиме более актуальна. В первую очередь это обусловлено необходимостью покрытия несоответствия между выработкой и потреблением электроэнергии в энергосистеме в течение суток, а также тем, что суммарная доля установок, предназначенных для покрытия неравномерности суточного графика нагрузки энергосистемы, очень мала.

Из-за неравномерности изменения характеристик активной зоны (например, температуры, плотности теплоносителя и т.д.) при изменении уровня мощности реакторной установки возникают ксеноновые колебания, которые в ряде случаев (например, в конце топливной кампании) могут привести к потере устойчивости ядерного реактора.

Таким образом, возникает задача усовершенствования существующей системы автоматического управления (САУ) мощностью энергоблока АЭС, которая позволит эксплуатировать энергоблок в маневренных режимах в течение суточного цикла без возникновения ксеноновых колебаний.

### Постановка задачи

В настоящей работе решены следующие задачи:

— проведен анализ изменения аксиального оффсета в маневренных режимах за счет изменения различных характеристик активной зоны, а также проанализированы ксеноновые колебания;

© М.В. МАКСИМОВ, Т.А. ЦИСЕЛЬСКАЯ, Е.А. КОКОЛ, 2015

*Международный научно-технический журнал  
«Проблемы управления и информатики», 2015, № 3*

- оценено изменение аксиального офсета для программ регулирования, которые применяются в практике эксплуатации;
- на основе новой программы регулирования усовершенствована существующая система автоматического управления;
- проведен сравнительный анализ результатов численного моделирования суточного маневра мощностью энергоблока с реактором ВВЭР–1000 для систем автоматического управления.

### **Ксеноновые колебания**

Ксеноновые колебания влияют на распределение энерговыделения по активной зоне реактора в трех направлениях: радиальном, азимутальном и аксиальном.

Радиальные колебания могут возникнуть из-за перемещения органов регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ), расположенных близко к периферии активной зоны реактора. При таких воздействиях на протяжении всей кампании реактор находится в устойчивом состоянии. К концу кампании радиальная устойчивость возрастает.

Азимутальные колебания возникают в результате последовательного извлечения из активной зоны уже погруженных ОР СУЗ, которые расположены симметрично вблизи периферии. Азимутальные колебания, как и радиальные, практически не влияют на распределение энерговыделения в реакторе, это происходит только при малых глубинах выгорания ядерного топлива.

Аксиальные колебания возникают при переходе с одного уровня мощности на другой. Это происходит из-за неравномерного отклонения технологических параметров от своих стационарных значений по высоте активной зоны. К таким технологическим параметрам прежде всего относятся: температура теплоносителя первого контура (на входе, средняя и на выходе из активной зоны реактора), температура ядерного топлива, плотность теплоносителя, тепловая мощность верхней и нижней части активной зоны. Такое неравномерное изменение параметров вызывает неравномерное накопление и выгорание ксенона (нестационарное ксеноновое отравление).

Аксиальные колебания можно контролировать с помощью аксиального офсета (АО). Влиять на аксиальные колебания можно путем перемещения регулирующей группы ОР СУЗ в активной зоне реактора. Как правило, аксиальные колебания в начале кампании имеют затухающий характер, и реактор находится в устойчивом состоянии, в конце топливной кампании аксиальные колебания могут привести к полной потере устойчивости реактора и энергоблока в целом.

В маневренных режимах температура теплоносителя по высоте активной зоны может меняться по-разному, и накопление, и выгорание ксенона в разных частях реактора также будут неравномерными. Появившиеся в результате этого ксеноновые колебания сильнее всего будут проявлять себя в тех частях активной зоны, в которых произошло большее отклонение технологического параметра.

### **Анализ изменения АО в маневренных режимах**

Количественной мерой устойчивости реактора является АО — технологическая характеристика равномерности энерговыделения по высоте активной зоны реактора. Поэтому минимизация отклонения АО — мера эффективности эксплуатации энергоблока с ВВЭР-1000. Если рассматривать реактор как объект с сосредоточенными параметрами, то понятие АО отсутствует. Его можно рассчитать только при допущении, что активная зона реактора условно поделена как минимум на две части: верхнюю и нижнюю.

Тогда величина АО определяется следующим образом:

$$AO = \frac{Q_H - Q_L}{Q_R}, \quad (1)$$

где  $Q_H$  — тепловая мощность (энерговыведение) верхней половины активной зоны реактора, МВт;  $Q_L$  — тепловая мощность нижней половины активной зоны реактора, МВт;  $Q_R = Q_H + Q_L$  — тепловая мощность активной зоны реактора, МВт.

Для обеспечения безопасной работы реактора значение АО должно поддерживаться в регламентном диапазоне, его рекомендуемое значение равно  $-3,41\%$ , т.е. энерговыведение в нижней половине реактора должно быть на  $3,41\%$  больше, чем в верхней. При тепловой мощности реактора  $Q_R = 3061$  МВт тепловая мощность нижней половины активной зоны реактора будет равна  $Q_H = 1478,31$  МВт, а тепловая мощность верхней половины активной зоны реактора —  $Q_L = 1582,69$  МВт. Отклонение от этого значения в большую или меньшую сторону показывает, что начат дрейф АО из рекомендованной регламентом зоны.

При эксплуатации состояние реактора характеризуют его реактивностью. Изменение уровня мощности реактора определяется изменением реактивности. При любом стационарном уровне мощности суммарная реактивность должна равняться нулю, что поддерживается за счет баланса реактивностей. Реактивность реактора представляет собой суперпозицию следующих составляющих:

$$\rho_{\text{sum}} = \rho_{\text{rod}} + \rho_{br} + \rho_b + \rho_{sl} + \rho_Q + \rho_{Xe} + \rho_t, \quad (2)$$

где  $\rho_{\text{rod}}$  — эффект реактивности регулирующей группы ОР СУЗ;  $\rho_{br}$  — эффект реактивности, вносимый изменением концентрации борной кислоты в теплоносителе первого контура;  $\rho_b$  — эффект реактивности, связанный с выгоранием топлива;  $\rho_{sl}$  — эффект реактивности, связанный с накоплением шлаков;  $\rho_Q$  — эффект реактивности, вносимый изменением мощности реактора;  $\rho_{Xe}$  — эффект реактивности, вносимый изменением концентрации отравителей (ксенона и йода) в топливе;  $\rho_t$  — эффект реактивности, вносимый изменением температуры теплоносителя первого контура.

Из перечисленных слагаемых к эффектам реактивности, связанным с физико-энергетическими процессами, протекающими в реакторе, относятся эффекты реактивности, связанные с выгоранием и шлакованием, изменением мощности реактора, температуры теплоносителя первого контура и концентрации ксенона и йода в топливе.

Выгорание и шлакование относятся к медленным процессам и сопутствуют всей кампании реактора, в то время как три последних эффекта реактивности относятся к быстрым и проявляются во время изменения мощности энергоблока. Стоит отметить, что эффект реактивности, связанный с накоплением отравителей, относится одновременно и к быстрым, и к медленным. С одной стороны, накопление ксенона и йода происходит за счет выгорания топлива (стационарное отравление), а с другой — их концентрация изменяется в режиме маневрирования мощностью (нестационарное отравление).

Эффекты реактивности, которые связаны с физико-энергетическими процессами, протекающими в реакторе, способны без системы регулирования изменять тепловую мощность. Поэтому необходимо подробнее рассмотреть, как они влияют на устойчивость реактора при переходе с одного уровня мощности на другой.

Эффект реактивности, вносимый изменением температуры теплоносителя первого контура, относится к быстрым эффектам, а отравление ксеноном — к медленным [1]. Последний совпадает с изменением нейтронного потока по знаку и усиливается за счет вносимой положительной обратной связи. Поэтому в маневренных режимах контроль равномерности энерговыделения в активной зоне можно обеспечить выбором соответствующего температурного режима теплоносителя, при котором изменение равномерности энерговыделения будет минимальным [2, 3].

Если записать переменные, входящие в (1) через достаточно малые отклонения от стационарных значений, то получим:

$$\begin{aligned} AO &= AO_0 + \Delta AO, \\ Q_H &= Q_{H,0} + \Delta Q_H, \\ Q_L &= Q_{L,0} + \Delta Q_L, \\ Q_R &= Q_{R,0} + \Delta Q_R, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $AO_0, Q_{H,0}, Q_{L,0}, Q_{R,0}$  — стационарные значения соответственно аксиального офсета, энерговыделения верхней, нижней частей активной зоны и всей активной зоны реактора;  $\Delta AO, \Delta Q_H, \Delta Q_L, \Delta Q_R$  — достаточно малые отклонения от стационарных значений соответственно аксиального офсета, энерговыделения верхней, нижней частей активной зоны и всей активной зоны реактора.

При малом отклонении средней температуры теплоносителя  $\Delta \bar{T}$  в соответствующей части активной зоны для малых отклонений энерговыделений верхней и нижней частей активной зоны справедливы выражения

$$\Delta Q_H = \frac{\Delta Q}{\Delta \bar{T}} \cdot \Delta \bar{T}_H; \Delta Q_L = \frac{\Delta Q}{\Delta \bar{T}} \cdot \Delta \bar{T}_L, \quad (4)$$

где  $\Delta \bar{T}_H, \Delta \bar{T}_L$  — малое отклонение средней температуры теплоносителя в верхней и нижней частях активной зоны соответственно;  $\Delta Q_H, \Delta Q_L$  — малое отклонение мощности верхней и нижней частей активной зоны при малом отклонении средней температуры теплоносителя  $\Delta \bar{T}_H, \Delta \bar{T}_L$  соответственно.

Теперь если записать отношение отклонения энерговыделения реактора к отклонению средней температуры теплоносителя в активной зоне и домножить числитель и знаменатель на отклонение реактивности, то  $\frac{\Delta Q}{\Delta \bar{T}}$  будет равно

$$\frac{\Delta Q}{\Delta \bar{T}} = \frac{\Delta \rho / \Delta \bar{T}}{\Delta \rho / \Delta Q} = \frac{k_t}{k_Q}, \quad (5)$$

где  $k_t, k_Q$  — температурный и мощностной коэффициенты реактивности.

Таким образом, можно сделать вывод, что при изменении уровня мощности наибольшее влияние на распределение энерговыделения оказывают температурный  $\rho_t$  и мощностной  $\rho_Q$  эффекты реактивности, а также эффект реактивности, вносимый изменением концентрации отравителей (ксенона и йода) в топливе  $\rho_{Xe}$ .

Компенсировать изменение энерговыделения в активной зоне реактора вследствие действия эффектов реактивности, связанных с физико-энергетическими про-

цессами, протекающими в реакторе, можно реактивностью, вносимой перемещением регулирующей группы ОР СУЗ, или реактивностью, вносимой вводом/выводом борной кислоты в теплоноситель первого контура. Кроме того, регулирование вводом/выводом ОР СУЗ и борной кислоты осуществляется для компенсации максимума ксенонового отравления.

С учетом вышесказанного для маневренного режима уравнение (2) можно упростить:

$$\rho_{\text{sum}} = \rho_{\text{rod}} + \rho_{br} + \rho_Q + \rho_{Xe} + \rho_t. \quad (6)$$

Первые два слагаемых ( $\rho_{\text{rod}}$  и  $\rho_{br}$ ) в уравнении (6) изменяются как результат управления мощностью реактора вводом ОР СУЗ или борной кислоты в теплоноситель первого контура, а  $\rho_{Xe}$  появляется как следствие отличающегося по высоте активной зоны отклонения технологических параметров от номинальных значений (что также вызывает изменение  $\rho_Q$  и  $\rho_t$ ).

Необходимо рассмотреть, как изменение  $\rho_Q$  и  $\rho_t$  в разных программах регулирования влияет на изменение температуры и плотности теплоносителя по высоте активной зоны и на возникновение ксеноновых колебаний.

### Программы регулирования

Маневрирование мощностью осуществляется с помощью систем автоматического управления, которые функционируют по так называемым программам регулирования. Программы регулирования определяют характер изменения технологических параметров при изменении мощности энергоблока. На рис. 1 показана зависимость технологических параметров от мощности энергоблока  $N_g$  в различных программах регулирования:  $t_{\text{out}}$  — температура теплоносителя на выходе из активной зоны;  $t_{\text{med}}$  — средняя температура теплоносителя в активной зоне;  $t_{\text{in}}$  — температура теплоносителя на входе в активной зоне;  $t_s$  — температура насыщенного пара во втором контуре;  $P_{II}$  — давление пара во втором контуре. Как правило, маневрирование осуществляется в диапазоне изменения мощности от 100 до 80 % от номинальной мощности [4]. В таком диапазоне мощностей маневрирование осуществляется по следующим программам регулирования:

- с поддержанием постоянной средней температуры теплоносителя первого контура  $t_{\text{med}} = \text{const}$  (рис. 1, а);
- с постоянным давлением во втором контуре  $P_{II} = \text{const}$  (рис. 1, б);
- с поддержанием постоянной температуры теплоносителя на входе в первый контур  $t_{\text{in}} = \text{const}$  (рис. 1, в).

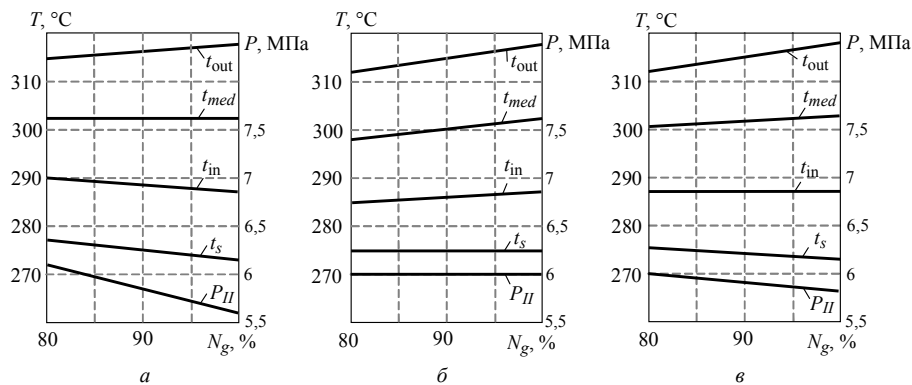


Рис. 1

Поскольку величина отклонения  $\Delta$  технологических параметров по высоте активной зоны реактора неодинакова, эффекты реактивности  $\rho_Q$  и  $\rho_t$  будут по-разному влиять на образование ксенона по высоте активной зоны. Следовательно, накопление и выгорание ксенона будут отличаться, что приведет к возникновению аксиальных ксеноновых колебаний с возможной последующей потерей устойчивости реактора.

В табл. 1 представлены результаты анализа влияния изменения основных возмущающих воздействий на реактор, на АО и реактивности, вызванные изменением каждого из параметров.

Подавление аксиальных ксеноновых колебаний и поддержание величины АО может осуществляться двумя управляющими воздействиями: регулирующей группой ОР СУЗ или вводом в теплоноситель первого контура борной кислоты [4].

Анализируя данные, представленные на рис. 1, можно определить, насколько изменится температура теплоносителя в активной зоне реактора при маневрировании мощностью со 100 до 80 % по каждой программе регулирования. Данные сведены в табл. 2.

Таблица 1

Основные воздействия на реактор вследствие изменения теплотехнических параметров	Обозначение	Вносимая реактивность	Влияние на АО
Изменение тепловой мощности реактора	$Q \uparrow$	$\rho_Q \downarrow$	АО $\uparrow$
	$Q \downarrow$	$\rho_Q \uparrow$	АО $\downarrow$
Изменение положения регулирующей группы ОР СУЗ в активной зоне реактора	$H_{rod} \uparrow$	$\rho_{rod} \downarrow$	АО $\uparrow$
	$H_{rod} \downarrow$	$\rho_{rod} \uparrow$	АО $\downarrow$
Изменение концентрации борной кислоты в теплоносителе первого контура	$C_{br} \uparrow$	$\rho_{br} \uparrow$	АО $\downarrow$
	$C_{br} \downarrow$	$\rho_{br} \downarrow$	АО $\uparrow$
Изменение температуры теплоносителя в активной зоне реактора	$t \uparrow$	$\rho_t \downarrow$	АО $\downarrow$
	$t \downarrow$	$\rho_t \uparrow$	АО $\uparrow$

Таблица 2

Программа регулирования	Технологический параметр								
	$t_{out,100\%}$ °C	$t_{out,80\%}$ °C	$\Delta t_{out}$ °C	$t_{med,100\%}$ °C	$t_{med,80\%}$ °C	$\Delta t_{med}$ °C	$t_{in,80\%}$ °C	$t_{in,100\%}$ °C	$\Delta t_{in}$ °C
$t_{med} = \text{const}$	318	315	-3	302,5	302,5	0	287	290	+3
$P_{II} = \text{const}$	318	310	-8	302,5	298,5	-4	287	285	-2
$t_{in} = \text{const}$	318	312	-6	302,5	300,5	-2	287	287	0

Изменение АО в верхней части реактора связано с изменением температуры теплоносителя на выходе из активной зоны реактора, в средней части — с изменением средней температуры теплоносителя, в нижней — с изменением температуры теплоносителя на входе в активную зону.

Воздействовать на нижнюю половину реактора без воздействия на верхнюю невозможно, поэтому возмущение, которое вызвано изменением температуры теплоносителя на входе в активную зону реактора, является некомпенсируемым. Таким образом, для поддержания постоянного АО необходимо, чтобы  $t_{in} = \text{const}$ , или иначе можно записать в виде

$$J = \min \Delta t_{in}. \quad (7)$$

Компенсация возмущений в верхней половине реактора хорошо обеспечивается перемещением регулирующей группы ОР СУЗ, однако частое перемещение может привести к знакопеременным напряжениям в оболочках твэл и к их последующему разрушению. Следовательно, необходимо, чтобы соблюдалось условие

$$J = \min \Delta H_{\text{rod}}, \quad (8)$$

где  $H_{\text{rod}}$  — высота погружения регулирующей группы ОР СУЗ.

Таким образом, только в программе регулирования  $t_{\text{in}} = \text{const}$  при маневрировании уровнем мощности можно выполнить условие  $\Delta t_{\text{in}} = 0$  (см. табл. 2), что обеспечит стабильность нижней половины активной зоны реактора и за счет этого ксеноновые колебания не возникнут. В случае их возникновения в верхней половине активной зоны реактора они компенсируются перемещением регулирующей группы ОР СУЗ.

### Имитационная модель энергоблока с реактором ВВЭР-1000

Для имитационного моделирования разработана многозонная математическая модель реактора ВВЭР-1000 с сосредоточенными параметрами как элемент модели энергоблока. В связи с тем, что модели реактора, используемые для решения задач автоматизированного управления, представляют собой точечные модели с сосредоточенными параметрами, контролировать изменение аксиального офсета в таких моделях невозможно. Поэтому активная зона реактора была поделена на десять зон с сосредоточенными параметрами по высоте. Отличие между зонами заключается в разных начальных условиях и теплогидравлических параметрах и соответственно в разных статических и динамических свойствах каждой из них [5].

Структурно каждая зона состоит из девяти блоков (рис. 2): точечная модель кинетики реактора; модель тепловой мощности; модель нагрева теплоносителя; модель нагрева твэлов; модель эффекта реактивности от отравления ксеноном; модель температурного эффекта реактивности (ТЭР); модель мощностного эффекта реактивности (МЭР); модель влияния регулирующей группы ОР СУЗ; и модель борного регулирования.

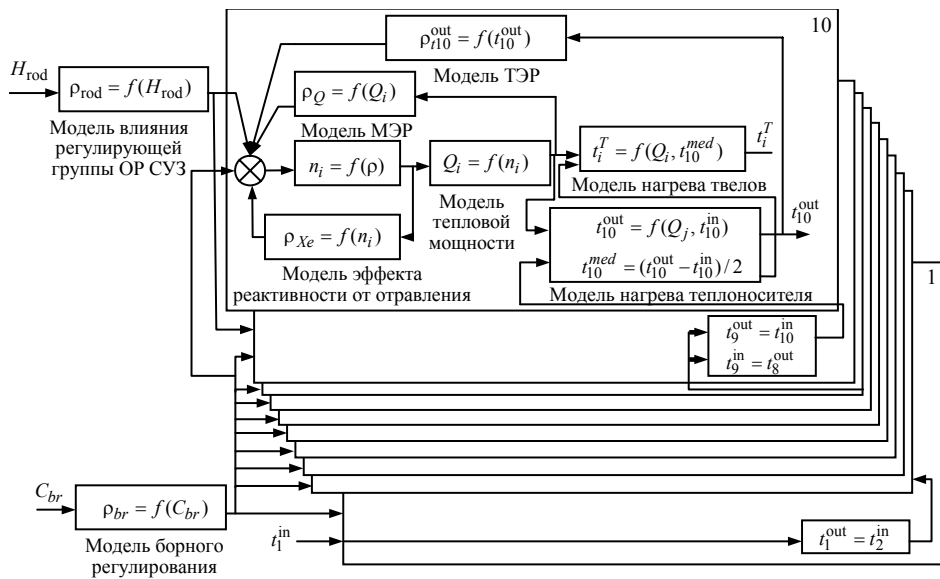


Рис. 2

Точечная модель кинетики реактора в каждой зоне имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{dn_i}{d\tau} = \frac{[\rho(\tau) - \beta_{ef}]n_i(\tau)}{l} + \sum_{j=1}^6 \lambda_j C_j(\tau), \\ \frac{dC_j}{d\tau} = \frac{\beta_j n_i(\tau)}{l} - \lambda_j C_j(\tau), \\ n(\tau) = \sum_{i=1}^{10} n_i(\tau). \end{cases} \quad (9)$$

Здесь  $n_i(\tau)$  — плотность потока нейтронов  $i$ -й зоны,  $\text{см}^{-3}$ ;  $\rho(\tau)$  — реактивность, отн. ед.;  $\beta_{ef}$  — суммарная доля запаздывающих нейтронов, отн. ед.;  $\beta_j$  — доля запаздывающих нейтронов  $j$ -й группы, отн. ед.;  $l$  — среднее время жизни поколения мгновенных нейтронов, с;  $\lambda_j$  — постоянная радиоактивного распада предшественников  $j$ -й группы,  $\text{с}^{-1}$ ;  $j$  — номер группы запаздывающих нейтронов,  $j=1 \dots 6$ ;  $C_j(\tau)$  — эффективная концентрация ядер-предшественников запаздывающих нейтронов  $j$ -й группы,  $\text{см}^{-3}$ ;  $i$  — номер зоны,  $i=1, \dots, 10$ .

Модель тепловой мощности для каждой зоны и всего реактора описывается следующим образом [6]:

$$\begin{cases} Q_i(\tau) = ((\varepsilon_l^m + \varepsilon_p^m) + (\varepsilon_l^n + \varepsilon_p^n) q_n(\tau)) n_i(\tau) v V_i \Sigma_f^5 E_f^5, \\ Q(\tau) = \sum_{i=1}^{10} Q_i(\tau), \end{cases} \quad (10)$$

где  $\varepsilon_l^m$ ,  $\varepsilon_p^m$  — доля мгновенного локального и рассеянного тепловыделения, отн. ед.;  $\varepsilon_l^n$ ,  $\varepsilon_p^n$  — доля постепенного локального и рассеянного тепловыделения, отн. ед.;  $v$  — скорость нейтронов относительно ядер,  $\text{см}/\text{с}$ ;  $Q_i(\tau)$  — тепловая мощность  $i$ -й зоны,  $\text{МВт}$ ;  $V_i$  — объем топлива в активной зоне,  $\text{см}^3$ ;  $\Sigma_f^5$  — макроскопическое сечение деления топлива,  $\text{см}^{-1}$ ;  $E_f^5$  — энергия деления одного ядра, которая превращается в тепловую,  $\text{Дж}$ ;  $q_n(\tau)$  — относительная мощность постепенного тепловыделения, в долях  $Q_i$ .

Аксиальный офсет рассчитывался по уравнению (1), где  $Q_H$  равняется сумме тепловых мощностей пяти верхних зон, а  $Q_L$  — сумме тепловых мощностей пяти нижних зон.

Модель нагрева теплоносителя описывается дифференциальным уравнением [7]

$$\alpha F [t_i^T(\tau) - t_i^{med}(\tau)] = C p_B m_B \frac{dt_i^{med}}{d\tau} + \frac{2 C p_B m_B}{\tau_0} [t_i^{med}(\tau) - t_i^{in}(\tau)], \quad (11)$$

где  $t_i^{med}(\tau) = [t_i^{out}(\tau) + t_{i+1}^{in}(\tau)]/2$  — средняя температура теплоносителя  $i$ -й зоны,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $C p_B$  — удельная теплоемкость теплоносителя,  $\text{Дж}/\text{кг}\cdot\text{K}$ ;  $m_B$  — масса теплоносителя в активной зоне реактора,  $\text{кг}$ ;  $t_i^{out}(\tau)$  — температура теплоносителя на выходе из  $i$ -й зоны,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_i^{in}(\tau)$  — температура теплоносителя на входе в  $i$ -ю зону,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\tau_0$  — время прохождения теплоносителя через активную зону реактора, с;  $\alpha$  —



коэффициент теплопередачи от поверхности твелоов к теплоносителю, Вт/м<sup>2</sup>·К;  $F$  — суммарная площадь поверхности теплопередачи твелоов, м<sup>2</sup>;  $t_i^T(\tau)$  — температура топлива  $i$ -й зоны, °С.

Поскольку теплоноситель в активной зоне движется непрерывно с постоянной скоростью снизу вверх, принято, что температура на выходе из одной зоны равняется температуре на входе в другую зону:  $t_i^{\text{out}}(\tau) = t_{i+1}^{\text{in}}(\tau)$ .

Модель влияния регулирующей группы ОР СУЗ [8] запишем

$$\rho_{\text{rod}_i} = a_i(h - h_0), \quad (12)$$

где  $\rho_{\text{rod}_i}$  — эффект реактивности регулирующей группы ОР СУЗ, отн. ед.;  $a_i$  — коэффициент отклонения характеристики, 1/см;  $h$  — высота погружения регулирующей группы ОР СУЗ в активной зоне реактора, см;  $h_0$  — начало  $i$ -й зоны от низа активной зоны, см.

Для моделирования реактора идентифицирована модель монотонного изменения концентрации борной кислоты в теплоносителе первого контура, для этого использованы и аппроксимированы результаты экспериментов на Запорожской АЭС.

Модель борного регулирования описана системой дифференциальных уравнений [9]:

$$\begin{cases} \rho_{br}(C_{br}) = \int_0^{C_{br}} \alpha_{br} dC_{br}, \\ T_4 \frac{dC_{br}}{d\tau} + \Delta C_{br} = k_4 \Delta G_{br}, \\ T_5 \frac{dC_{br}}{d\tau} + \Delta C_{br} = k_5 \Delta G_{H_2O}, \end{cases} \quad (13)$$

где  $\alpha_{br}$  — коэффициент реактивности борной кислоты, 1/(г/кг);  $C_{br}$  — концентрация борной кислоты, г/кг;  $k_4, k_5$  — коэффициенты передачи, (г/кг)/(кг/с);  $T_4, T_5$  — постоянные времени, с;  $\Delta G_{br}$  — изменение расхода борной кислоты, кг/с;  $\Delta G_{H_2O}$  — изменение расхода обессоленной воды, кг/с.

Модель энергоблока с десятизонной моделью реактора была реализована в среде имитационного моделирования Simulink пакета MATLAB (1–4 АЕ К761327 ВД, № 308918).

На разработанной модели энергоблока реализована система автоматического управления (САУ) мощностью энергоблока АЭС с ВВЭР-1000, алгоритм управления которой реализует программу регулирования с  $t_{med} = \text{const}$  (рис. 3), где 1 — задатчик электрической мощности генератора; 2 — регулятор мощности энергоблока; 3 — механизм управления турбиной; 4 — сервомотор; 5 — регулятор частоты обращения турбины; 6 — задатчик частоты обращения турбины; 7 — датчик частоты обращения турбины; 8 — приводы регулирующих стрелок; 9 — ионизационная камера; 10 — регулятор нейтронной мощности реактора; 11 — регулятор средней температуры теплоносителя первого контура; 12 — датчики температуры теплоносителя первого контура; 13 — задатчик средней температуры теплоносителя первого контура.

Для моделирования САУ (рис. 4) было принято, что функционирование регулятора средней температуры теплоносителя первого контура и регулятора мощности энергоблока основано на ПИ-законе регулирования, а регулятора нейтронной мощности реактора — П-законе регулирования. Расчет параметров регуляторов осуществлялся по методу О.П. Копеловича.

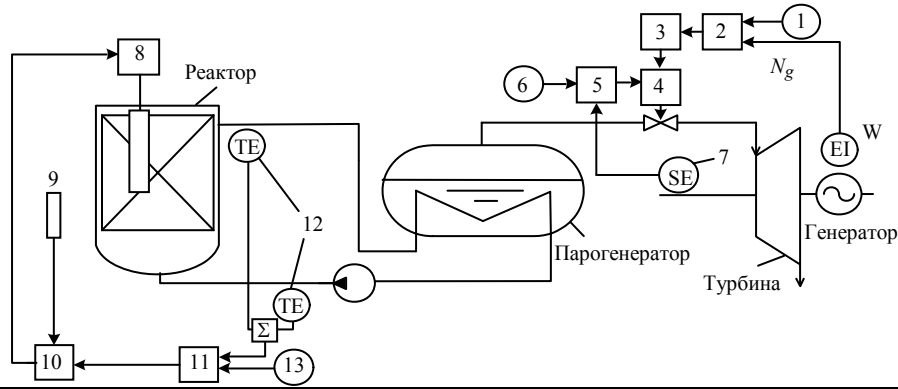


Рис. 3

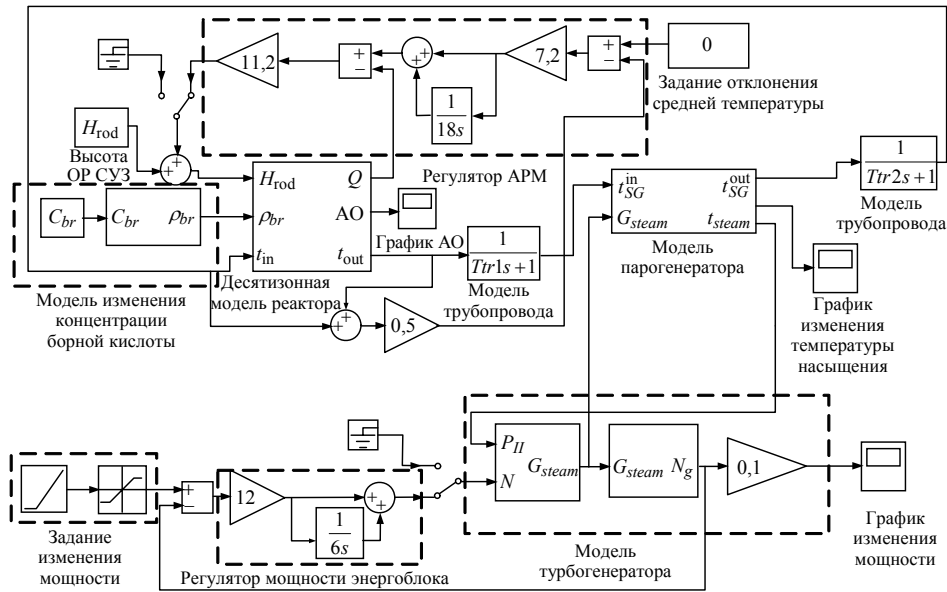


Рис. 4

В дальнейшем качество переходных процессов регулирования оценивалось по прямым показателям качества. Качество переходных процессов при определенных параметрах регулятора средней температуры теплоносителя первого контура было таким: время регулирования  $t_p = 70$  с, степень затухания колебаний переходного процесса  $\psi = 1$ , динамический коэффициент регулирования  $Rd = 0,22$ ; для регулятора мощности энергоблока — переходный процесс аperiodический, не имеет колебаний, время регулирования  $t_p = 35$  с; для регулятора нейтронной мощности реактора — время регулирования  $t_p = 230$  с, статическая ошибка регулирования  $\Delta X_{last} = 0,2\%$ , степень затухания колебаний переходного процесса  $\psi = 0,93$ , динамический коэффициент регулирования  $Rd = 0,38$ .

Также на разработанной модели энергоблока была реализована САУ мощностью энергоблока АЭС с ВВЭР-1000, алгоритм управления которой реализует программу регулирования с  $P_{II} = \text{const}$  (рис. 5), где 18 — задатчик давления пара во втором контуре; 19 — регулятор давления пара во втором контуре; 20 — датчик давления пара во втором контуре.

Для моделирования САУ мощностью энергоблока АЭС с ВВЭР-1000, которая реализует программу регулирования с  $P_{II} = \text{const}$  в Simulink (рис. 6), было принято, что регулятор давления пара во втором контуре и регулятор мощности энергоблока подчиняются ПИ-закону регулирования, а регулятор нейтронной мощности реактора — П-закону регулирования.

Качество переходных процессов при определенных параметрах регулятора давления пара во втором контуре было таким: время регулирования  $t_p = 85$  с, степень затухания колебаний переходного процесса  $\psi = 1$ , динамический коэффициент регулирования  $Rd = 0,2$ ; для регулятора мощности энергоблока — переходный процесс аperiодический, не имеет колебаний, время регулирования  $t_p = 30$  с; для регулятора нейтронной мощности реактора — время регулирования  $t_p = 180$  с, статическая погрешность регулирования  $\Delta X_{last} = 0,2\%$ , степень затухания колебаний переходного процесса  $\psi = 0,94$ , динамический коэффициент регулирования  $Rd = 0,39$ .

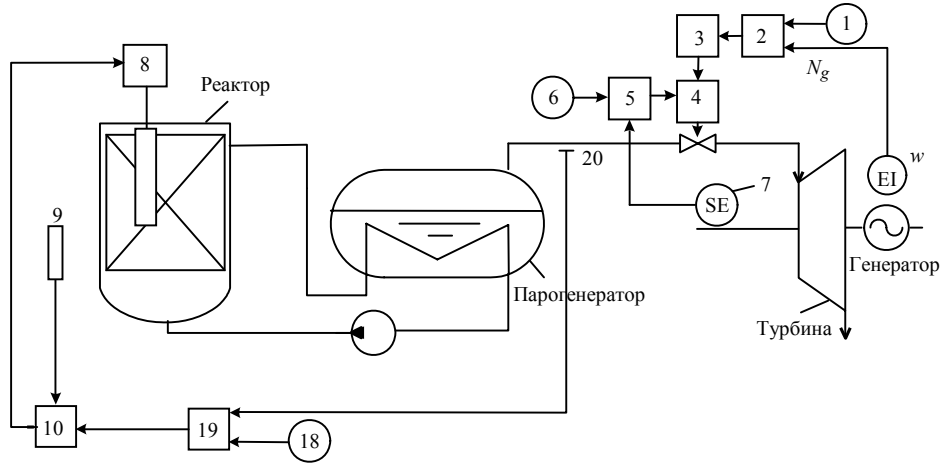


Рис. 5

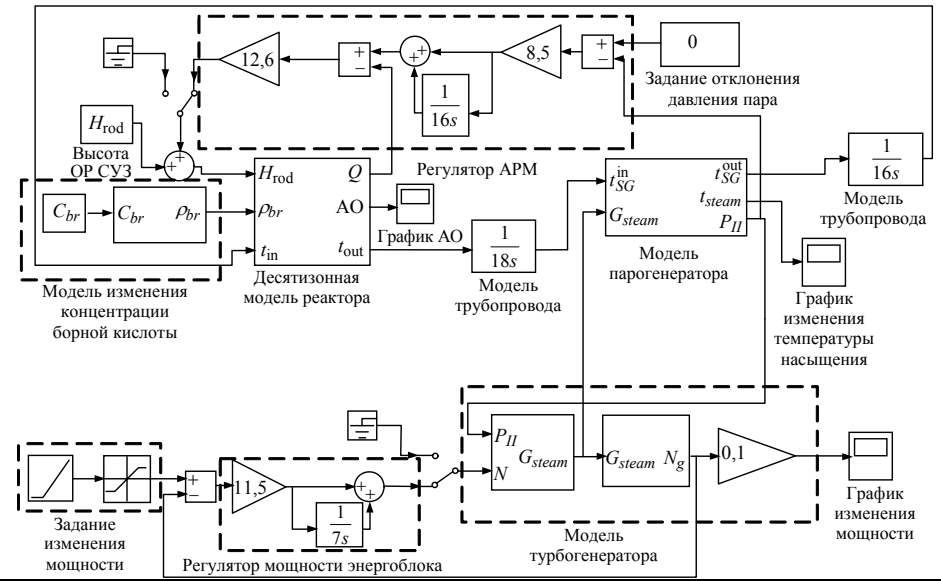


Рис. 6

На имитационной модели реализована усовершенствованная САУ мощностью энергоблока, алгоритм управления которой реализует новую программу регулирования  $t_{in} = \text{const}$  следующим образом. Энергоблок не менее 4 часов работал на номинальной мощности. При поступлении заявки на снижение мощности на  $\Delta N_g$  задается значение, равное  $\Delta N_g / 2$ , задатчику мощности энергоблока 2, который формирует управляющее воздействие на ввод

борной кислоты в теплоноситель первого контура. Раствор борной кислоты вводится в теплоноситель непрерывно с регламентной скоростью через бак подпиточных насосов 15. При достижении заданного значения мощности энергоблока, регулятор отключается. Дальнейшее снижение мощности энергоблока происходит за счет отравления реактора йодом и ксеноном. После достижения максимума отравления, примерно через 3–3,5 часа, наступает процесс разотравления, т.е. йод и ксенон начинают постепенно выгорать и мощность реактора начинает расти. Процесс отравления/разотравления длится около 6,5 часов.

В то же время для поддержания постоянной величины регулятора АО 10, сравнивая заданное 9 и фактическое 14 значения, АО формирует управляющее воздействие на приводы регулирующих стержней 8.

Одновременно регулятор температуры теплоносителя на входе в активную зону реактора 17, сравнивая заданное 16 и действительное 12 значения температуры теплоносителя на входе в активную зону, формирует управляющее воздействие на механизм управления турбиной (МУТ) 3 и далее сервомотору 4, который изменяет положение регулирующих клапанов турбины. Принципиальная схема САУ мощностью энергоблока  $N_g$  с реактором ВВЭР–1000, что функционирует по программе регулирования  $t_{in} = \text{const}$ , показана на рис. 7.

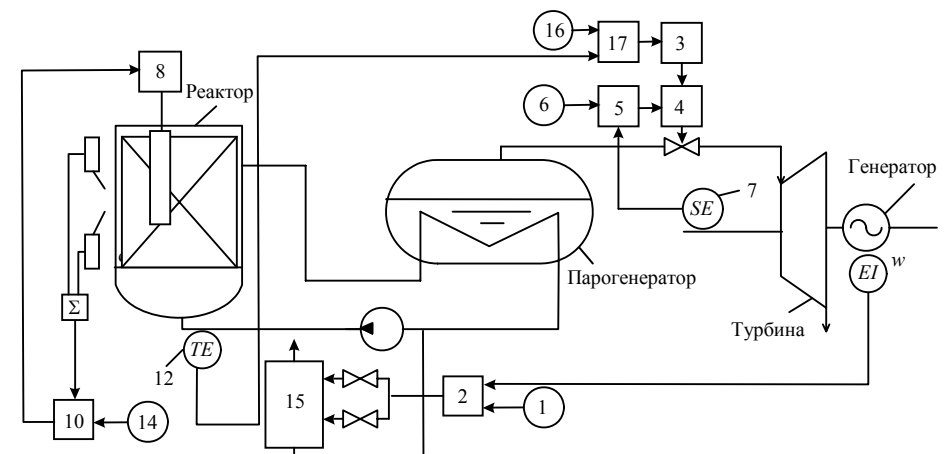


Рис. 7

После того как за счет разотравления мощность энергоблока увеличилась на  $\Delta N_g / 2$ , включается регулятор мощности энергоблока для его вывода на номинальный уровень мощности (т.е. увеличение мощности на  $\Delta N_g / 2$ ).

Суточное маневрирование мощностью энергоблока при работе усовершенствованной САУ обеспечит равномерное изменение нейтронного потока по высоте активной зоны реактора, вследствие чего выгорание топлива и накопление отравителей по высоте активной зоны произойдет равномерно, что гарантирует отсутствие ксеноновых колебаний.

Таким образом, особенностью усовершенствованной САУ является новый контур управления, в котором температура теплоносителя на входе в активную зону реактора поддерживается постоянной за счет регулирования давления пара в парогенераторе.

Еще одна особенность усовершенствованной САУ — еще один новый контур управления — контур управления офсетом, в котором значение АО поддерживается постоянным за счет перемещения регулирующей группы ОР СУЗ.



Таблица 3

Часы		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$ \Delta_{\max} $
$N_g, \%$	САУ1	100	86,5	80	80	80	80	80	80	80	90	100	20
	САУ2	100	89	83,5	82,3	80,5	80	80,1	82,8	87,6	93,4	100	20
	САУ3	100	90	84	81,7	80,4	80	80,2	83	88	95,5	100	20
$H_{\text{rod}}, \text{см}$	САУ1	318,2	280,2	292,9	294,6	294,6	294,2	293,6	287,9	280,3	299,3	318,2	38
	САУ2	318,2	283,7	294,1	295,8	296	296	295,1	290,1	284,2	300,4	318,2	34,5
	САУ3	318,2	304,6	297,5	296,3	296,2	296,2	297,8	300	306,8	315,8	318,2	22
АО, %	САУ1	-3,41	-6	-3,82	-3,49	-3,54	-3,63	-3,95	-4,74	-5,99	-5	-3,38	2,59
	САУ2	-3,41	-4,9	-3,61	-3,52	-3,56	-3,58	-3,65	-3,81	-4,74	-3,8	-3,4	1,49
	САУ3	-3,41	-3,41	-3,41	-3,41	-3,41	-3,41	-3,41	-3,41	-3,41	-3,41	-3,41	0

Из сравнения изменения мощности энергоблока, положения регулирующей группы ОР СУЗ и АО во время суточного маневра при работе трех систем автоматического управления можно заключить следующее.

- Наибольшее максимальное перемещение регулирующей группы ОР СУЗ происходит при работе САУ, функционирующей по программе регулирования  $t_{med}=\text{const}$  и составляет 38 см. Наименьшее максимальное перемещение происходит при работе усовершенствованной САУ, которая функционирует по программе регулирования с  $t_{in}=\text{const}$  и составляет 22 см. Уменьшение амплитуды перемещения регулирующей группы ОР СУЗ способствует более равномерному выгоранию топлива и уменьшению поврежденности оболочек топлива.

- Наибольшее максимальное отклонение АО произошло при работе САУ, функционирующей по программе регулирования с  $t_{med}=\text{const}$  и составило 2,59%. Наименьшее максимальное отклонение АО произошло при работе усовершенствованной САУ, которая функционирует по программе регулирования  $t_{in}=\text{const}$ , значение АО во время суточного маневрирования мощностью не изменялось.

### Заключение

Актуальной задачей для поддержания баланса мощности в энергосистеме страны стала задача перевода действующих энергоблоков АЭС из стационарного в маневренный режим. Однако в маневренных режимах существует опасность возникновения аксиальных ксеноновых колебаний, которые в некоторых случаях могут привести к полной потере устойчивости реактора.

Количественной мерой устойчивости реактора является величина АО. Показано, что в маневренных режимах наибольшее влияние на величину АО оказывают температурный  $\rho_t$  и мощностной  $\rho_Q$  эффекты реактивности, а также эффект реактивности, вносимый изменением концентрации отравителей (ксенона и йода) в топливе  $\rho_{Xe}$ .

Компенсировать это влияние можно двумя управляющими воздействиями на активную зону реактора: вводом/выводом борной кислоты в теплоноситель первого контура и перемещением регулирующей группы ОР СУЗ. Однако, так как ввод/вывод борной кислоты в теплоноситель первого контура —

процесс инерционный, а регулирующая группа ОР СУЗ, ввиду конструктивных особенностей, не может повлиять на энерговыделение нижней половины активной зоны реактора без влияния на верхнюю половину, то для дальнейшего исследования было рассмотрено, как изменяются технологические параметры в разных программах регулирования.

Показано, что так как возмущение, которое вызвано изменением температуры теплоносителя на входе в активную зону реактора, некомпенсируемо, для поддержания постоянного АО необходимо, чтобы  $t_{in} = \text{const}$  или  $J = \min \Delta t_{in}$ , а также показана необходимость соблюдения следующего  $J = \min \Delta H_{rod}$ .

Для исследования изменения АО в существующих САУ была разработана имитационная модель энергоблока, главной особенностью которой является десятизонная модель реактора.

В статье также предложена усовершенствованная система автоматического управления мощностью энергоблока, функционирующая по программе регулирования с  $t_{in} = \text{const}$ . Главная особенность этой программы регулирования — поддержание постоянной температуры теплоносителя первого контура на входе в активную зону реактора. Это позволило устранить ксеноновые колебания и стабилизировать нижнюю половину реактора.

На имитационной модели были реализованы САУ, функционирующие по представленным программам регулирования, и проведен сравнительный анализ между ними. Результаты сравнительного анализа приведены в табл. 3. Результаты сравнительного анализа показали, что при работе усовершенствованной САУ, которая функционирует по программе регулирования  $t_{in} = \text{const}$ , реактор имеет стабильный АО по сравнению с САУ, функционирующей по программе регулирования  $t_{med} = \text{const}$ , и с САУ, функционирующей по программе регулирования  $P_{II} = \text{const}$ . Поскольку АО — количественная мера устойчивости реактора, его постоянство на протяжении маневра свидетельствует о том, что аксиальные ксеноновые колебания не возникают и что при работе усовершенствованной САУ мощности энергоблока реактор находится в устойчивом состоянии.

*М.В. Максимов, Т.О. Цисельська, Є.О. Кокот*

### СПОСІБ КЕРУВАННЯ РЕАКТОРНОЮ УСТАНОВКОЮ ІЗ ВВЕР-1000 У МАНЕВРЕНОМУ РЕЖИМІ

Наведено вдосконалену систему автоматизованого керування потужністю ядерної енергетичної установки з реактором ВВЕР-1000. Цей спосіб дозволить експлуатувати ядерну установку в маневреному режимі для підтримки балансу потужності в енергосистемі країни упродовж доби. Умовою надійної та безпечної роботи енергоблока АЕС є підтримка постійної величини аксіального офсету, для цього вперше запропоновано стабілізувати температуру теплоносія на вході в активну зону реактора, а також зменшити амплітуду переміщення регулюючої групи ОР СУЗ. Запропоновано принципову схему вдосконаленої системи автоматизованого керування. Наведено результати чисельного моделювання.

## THE METHOD OF CONTROL OF NUCLEAR POWER PLANT WITH VVER-1000 REACTOR IN MANEUVERABLE MODE

An improved system of automatic power control of nuclear power plant with VVER-1000 reactor is presented. This method will allow to operate a nuclear power plant while maneuvering to maintain the balance of power in the energy system of the country during the day. A condition of the successful and safe operation of the nuclear power plant is to maintain a constant axial offset, to this end for the first time it was proposed to stabilize the temperature of the coolant at the inlet of the reactor core, as well as to reduce the amplitude of movement of the regulatory group of control rods. A basic scheme of the improved system of automated control is proposed. The results of numerical modeling are presented.

1. *Maksimov M.V., Pelykh S.N., Maslov O.V., Baskakov V.E.* Model of cladding failure estimation for a cycling nuclear unit // Nuclear Engineering and Design. — 2009. — **239**, N 12. — P. 3021–3026.
2. *Филимонов П.Е., Мамичев В.В., Аверьянова С.П.* Программа «Имитатор реактора» для моделирования маневренных режимов работы ВВЭР-1000 // Атомная энергия. — 1998. — **84**, № 6. — С. 560–563.
3. *Pelykh S.N., Maksimov M.V.* Cladding rupture life control methods for a power-cycling VVER-1000 nuclear unit // Nuclear Engineering and Design. — 2011. — **241**, N 8. — P. 2956–2963.
4. *Pelykh S.N., Maksimov M.V., Parks G.T.* A method for VVER-1000 fuel rearrangement optimization taking into account both fuel cladding durability and burnup // Ibid. — 2013. — **257**, N 4. — P. 53–60.
5. *Pelykh S.N., Maksimov M.V., Baskakov V.E.* Grounds of VVER-1000 fuel cladding life control // Annals of Nuclear Energy. — 2013. — N 58. — P. 188–197.
6. *Maksimov M.V., Pelykh S.N., Gontar R.L.* Principles of controlling fuel-element cladding lifetime in variable VVER-1000 loading regimes // Atomic Energy. — 2012. — **112**, N 4. — P. 241–249.
7. *Pelykh S.N., Maksimov M.V.* The method of fuel rearrangement control considering fuel element cladding damage and burnup // Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Physics of Radiation Effect and Radiation Materials Science. — 2013. — N 5(87). — P. 24–36.
8. *Pelykh S.N., Maksimov M.V.* Theory of VVER-1000 fuel rearrangement optimization taking into account both fuel cladding durability and burnup // Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Physics of Radiation Effect and Radiation Materials Science. — 2013. — N 2(84). — P. 50–54.
9. *Maksimov M.V., Beglov K.V., Tsiselskaya T.A.* A model of a power unit with VVER-1000 as an object of power control // Пр. Одес. політехн. ун-ту. — Одеса, 2012. — Вип. 1(38). — С. 99–106.

*Получено 04.12.2014*