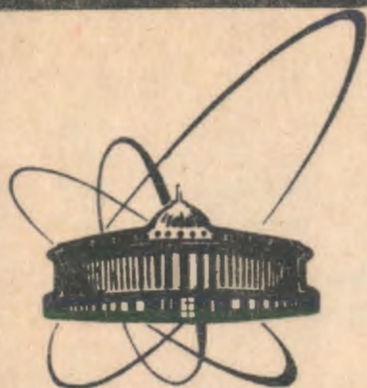


91-512



сообщения  
объединенного  
института  
ядерных  
исследований  
Дубна

P3-91-512

А. К. Попов

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В РЕАКТОРЕ ИБР-2  
ПРИ САМОПРОИЗВОЛЬНОМ СНИЖЕНИИ СКОРОСТИ  
ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ПОДВИЖНОГО ОТРАЖАТЕЛЯ

1991

В импульсном реакторе периодического действия в отличие от стационарного реактора может возникнуть аварийная ситуация, обусловленная нарушением кинематической связи между основным подвижным отражателем (ОПО) и дополнительным (ДПО).

Были рассчитаны переходные процессы в реакторе, когда скорость вращения ОПО сохраняется (1500 об/мин), а скорость вращения ДПО, равная при нормальном режиме 300 об/мин, снижается по экспоненциальному закону с постоянной времени  $T_{\omega}$ . При расчетах варьировались  $T_{\omega}$  (от 1 до 300 с) и средняя мощность реактора  $\bar{P}$  перед началом торможения ДПО (от 2 до 0,125 МВт). Расход теплоносителя и частота импульсов мощности до начала торможения ДПО принимались номинальными (5 имп/с и  $90 \text{ м}^3/\text{час}$ ).

Реактивность реактора представлялась в виде суммы реактивностей, обусловленных 1) органами управления, 2) основным подвижным отражателем, 3) дополнительным подвижным отражателем и 4) температурной обратной связью. При нормальном режиме работы совмещение максимумов реактивностей ОПО и ДПО происходит в физическом центре реактора. При расцеплении ОПО и ДПО скорость ДПО начинает падать, вследствие чего точка встречи ОПО и ДПО смещается относительно физического центра.

Реактивность ОПО  $\rho_{\text{ОПО}}$  как функция угла смещения ОПО относительно физического центра  $\varphi_{\text{ОПО}}$  описывалась сопряженными парабололами (рис. 1).

При  $-\varphi_n \leq \varphi_{\text{ОПО}} \leq \varphi_n$ , где  $\varphi_n = 4^\circ$ ,  $\rho_{\text{ОПО}} = -\alpha_{\varphi} \cdot \varphi_{\text{ОПО}}^2$ ,  
 где  $\alpha_{\varphi} = 3 \cdot 10^{-4} \text{ 1/град}^2$ .

При  $\varphi_n \leq \varphi_{\text{ОПО}} \leq \varphi_{\phi}$   $\rho_{\text{ОПО}} = -\Delta K_{\text{ОПО}} + \alpha_{\varphi_{\phi}} (\varphi_{\phi} - \varphi_{\text{ОПО}})^2$ .

При  $-\varphi_{\phi} \leq \varphi_{\text{ОПО}} \leq -\varphi_n$   $\rho_{\text{ОПО}} = -\Delta K_{\text{ОПО}} + \alpha_{\varphi_{\phi}} (\varphi_{\text{ОПО}} + \varphi_{\phi})^2$ ,

где эффективность ОПО  $\Delta K_{\text{ОПО}} = 2,5 \cdot 10^{-2}$  абсолютных единиц реактивности, а  $\varphi_{\phi}$  и  $\alpha_{\varphi_{\phi}}$ , вычисленные по формулам

$$\varphi_{\phi} = \frac{\Delta K_{\text{ОПО}}}{\alpha_{\varphi} \varphi_n}, \quad \alpha_{\varphi_{\phi}} = \frac{\alpha_{\varphi} \varphi_n}{\varphi_{\phi} - \varphi_n}, \quad \text{соответственно равны}$$

$20,8^\circ$  и  $0,715 \cdot 10^{-4} \text{ 1/град}^2$ .

Реактивность ДПО  $\rho_{\text{ДПО}}$  (рис. 2), как функция угла смещения ДПО относительно физического центра  $\varphi_{\text{ДПО}}$ , описывалась в диапазоне  $-2^\circ \leq \varphi_{\text{ДПО}} \leq 2^\circ$  параболой  $\rho_{\text{ДПО}} = -\alpha_{\text{ДПО}} \cdot \varphi_{\text{ДПО}}^2$ , где  $\alpha_{\text{ДПО}} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ 1/град}^2$ . При иных значениях углов реактивность

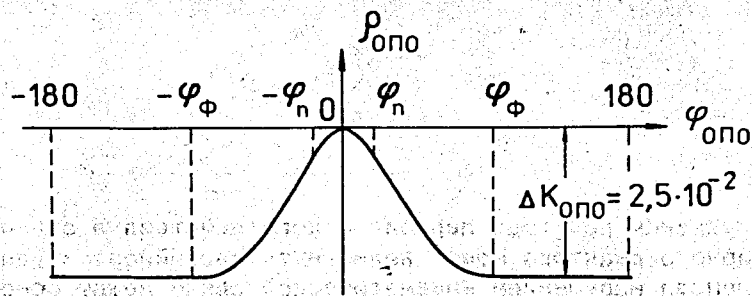


Рис.1. Реактивность основного подвижного отражателя.

$\rho_{ОПО}$  - в абсолютных единицах,  $\varphi_{ОПО}$  - в градусах.

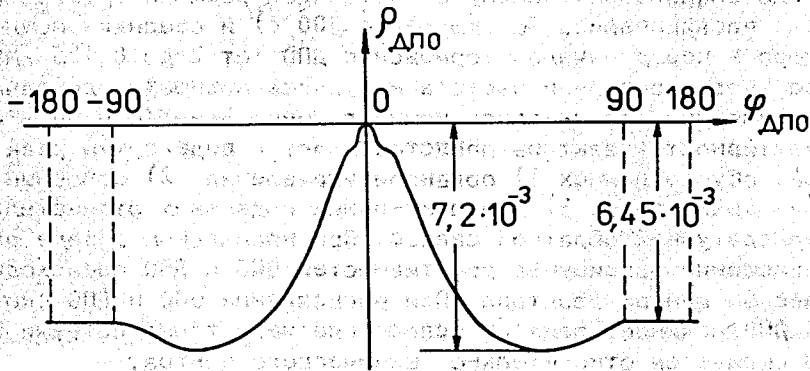


Рис.2. Реактивность дополнительного подвижного отражателя.  $\rho_{ДПО}$  - в абс. ед.,  $\varphi_{ДПО}$  - в градусах.

аппроксимировалась отрезками прямых, координаты точек которых приведены в табл. 1 и 2.

Температурная обратная связь (о.с.) выражалась в виде зависимости реактивности о.с.  $\rho_{о.с.}$  от текущего значения мощности реактора. На основании обработки экспериментальных данных импульсная переходная характеристика о.с. описывалась тремя экспонентами <sup>1,2/</sup>:

$$w_{o.c.}(t) = \sum_{l=1}^3 \frac{k_l}{T_l} \exp(-t/T_l),$$

где  $t$  - время,  $k_l$  - коэффициент передачи,  $T_l$  - постоянная времени,  $w_{o.c.}$  - реактивность о.с., обусловленная единичным импульсом мощности с энергией 1 МДж.

Таблица 1

$\varphi_{ДПО}$ , град	$\rho_{ДПО}$	$\varphi_{ДПО}$ , град	$\rho_{ДПО}$
-3	$-4,06 \cdot 10^{-4}$	3	$-4,89 \cdot 10^{-4}$
-5	$-7,25 \cdot 10^{-4}$	5	$-9,46 \cdot 10^{-4}$
-7	$-9,78 \cdot 10^{-4}$	7	$-1,19 \cdot 10^{-3}$
-9	$-1,23 \cdot 10^{-3}$	9	$-1,35 \cdot 10^{-3}$
-11	$-1,4 \cdot 10^{-3}$	11	$-1,62 \cdot 10^{-3}$
-13	$-1,81 \cdot 10^{-3}$	13	$-2,07 \cdot 10^{-3}$
-16	$-3,2 \cdot 10^{-3}$	15	$-2,83 \cdot 10^{-3}$
		17	$-3,43 \cdot 10^{-3}$

Таблица 2

$\varphi_{ДПО}$ , град	$\rho_{ДПО}$
$\pm 28$	$-5,4 \cdot 10^{-3}$
$\pm 40$	$-6,45 \cdot 10^{-3}$
$\pm 52$	$-7 \cdot 10^{-3}$
$\pm 65$	$-7,2 \cdot 10^{-3}$
$\pm 78$	$-7 \cdot 10^{-3}$
$\pm 90$	$-6,45 \cdot 10^{-3}$
$\pm 180$	$-6,45 \cdot 10^{-3}$

Параметры экспонент, определенные для различных уровней средней мощности, различны и в соответствии с оценками Е.П.Шабалина были описаны аналитически:

$$T_1 = 7 + 3(2/P)^{0,65}; \quad T_2 = 1,2; \quad T_3 = 0,3(2/P)^{0,65} \text{ с},$$

$$k_1 = -6,5; \quad k_2 = 1,2; \quad k_3 = -0,5(2/P)^{0,65} \beta_u / \text{МВт}$$

или в абсолютных единицах реактивности, учитывая, что импульсная доля запаздывающих нейтронов  $\beta_u = 1,6 \cdot 10^{-4}$

$$k_1 = -10,4 \cdot 10^{-4}; \quad k_2 = 1,92 \cdot 10^{-4}; \quad k_3 = -0,8 \cdot 10^{-4} (2/P)^{0,65} \text{ 1/МВт.}$$

При расчетах полагалось, что эти соотношения, пригодные для статических режимов, сохраняются и в динамике.

Расчеты переходных процессов проводились для двух вариантов. В первом предполагалось, что уравнения о.с. одинаковы и

для промежутков между импульсами и для самих импульсов. Во втором варианте предполагалось, что влияние о.с. в течение импульса реактивности ОПО отсутствует, т.е. влияние ее проявляется лишь в интервалах между импульсами.

Некоторые из рассчитанных переходных процессов приведены на рис. 3, 4, 5. На них для различных  $T_{\omega}$  представлены последовательности энергии импульсов мощности в относительных единицах  $E_N/E_0$ , где  $E_N$  - энергия текущего импульса мощности,  $E_0$  - энергия импульса до начала торможения,  $N$  - номер импульса,  $t$  - время в с. Кроме того, на рис. 4 отмечены оценочные значения максимальной температуры в активной зоне  $T_m$  (в  $^{\circ}\text{C}$ ). При этом были использованы следующие допущения:

- а)  $T_m$  пропорциональна усредненной по активной зоне температуре  $T_{cp}$ ,
- б) реактивность температурной о.с. пропорциональна  $T_{cp}$ ,
- в) соотношение между  $P$  и  $T_m$  (1МВт -  $412^{\circ}\text{C}$ ), установленное для статики, справедливо и в динамике. Здесь под температурами понимаются их превышения над опорной температурой, равной  $250^{\circ}\text{C}$ . Переходным процессам при меньших значениях  $P$  соответствовали и меньшие значения  $T_m$ .

Для всех рассчитанных переходных процессов характерно резкое падение энергии импульсов на несколько порядков сразу после начала торможения ДПО. Первый импульс с энергией, в несколько раз превышающей исходный уровень, который был до начала торможения, появляется спустя существенный интервал времени - от нескольких секунд до десятков секунд.

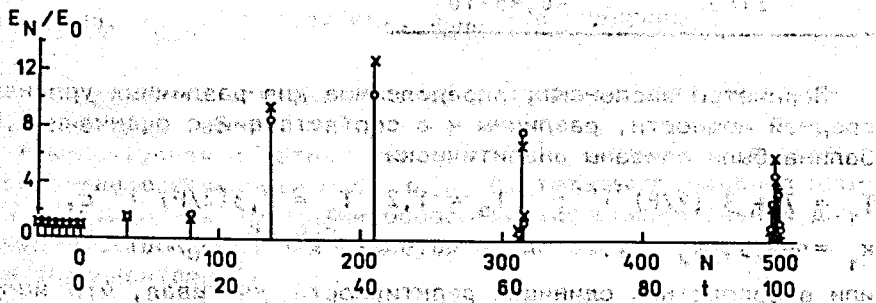


Рис. 3. Изменение энергии импульсов мощности  $E_N/E_0$  при постоянной времени падения скорости ДПО  $T_{\omega} = 10$  с. Средняя мощность реактора до начала торможения ДПО  $P = 2$  МВт.  $\circ$  - с учетом температурной обратной связи в течение импульса,  $\times$  - без учета температурной о.с. в течение импульса.

Таким образом, проведенные расчеты подтверждают, что если обеспечивается быстрое срабатывание аварийной защиты при падении энергии импульса мощности или при появлении фазового сдвига ДПО относительно ОПО, то тем самым обеспечивается и защита реактора при торможении дополнительного подвижного отражателя.

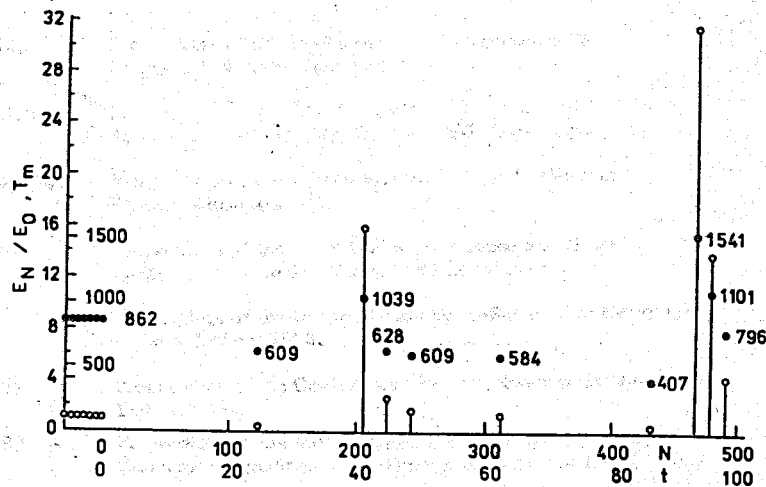


Рис. 4. Изменение энергии импульсов мощности  $E_N/E_0$  и максимальной температуры в активной зоне реактора  $T_m$  при  $T_{\omega} = 45$  с и  $P = 2$  МВт.  $\circ$  -  $E_N/E_0$ ,  $\bullet$  -  $T_m$ . Цифрами при знаках  $\bullet$  отмечены оценочные значения  $T_m$  в  $^{\circ}\text{C}$ .

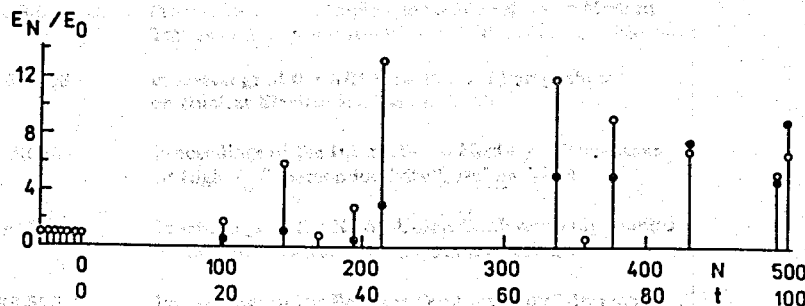


Рис. 5. Изменение энергии импульсов мощности  $E_N/E_0$  при  $T_{\omega} = 120$  с и различных значениях средней мощности реактора  $P$  перед началом торможения ДПО.  $\circ$  -  $P = 2$  МВт,  $\bullet$  -  $P = 1$  МВт.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шабалин Е.П. и др. - Атомная энергия, 1991, т.70, вып.5, с.326-329 (Препринт ОИЯИ, Р3-90-29, Дубна, 1990).
2. Попов А.К. - Сообщение ОИЯИ, Р13-90-203, Дубна, 1990.

Рукопись поступила в издательский отдел  
21 ноября 1991 года.