

**СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА**

P11-85-309

**Е.П.Шабалин**

**ВЛИЯНИЕ МОЩНОСТНОГО ЭФФЕКТА  
РЕАКТИВНОСТИ НА ФЛУКТУАЦИИ МОЩНОСТИ  
В ИМПУЛЬСНОМ РЕАКТОРЕ**

*Случай знакопеременной пульсации реактивности*

**1985**



## 1. ВВЕДЕНИЕ

В работе<sup>/1/</sup> было показано, что в случае знакопеременной пульсации реактивности /т.е. при периодических изменениях реактивности с частотой, в 2 раза ниже частоты повторения импульсов реактора/ при некотором значении мощности может возникнуть неустойчивость реактора - флуктуации амплитуды импульсов мощности в неограниченное число раз превзойдут флуктуации реактивности. Кроме того, был сделан вывод, что импульсный реактор может находиться в критическом, равновесном состоянии не только при постоянном значении энергии импульсов, но и при любой знакопеременной пульсации энергии импульсов. Эти результаты были получены в линейном приближении вида связи реактивности и энергии импульсов мощности и при некоторых других упрощениях. Ниже выводятся соотношения между флуктуациями реактивности и мощности, справедливые в значительно большем диапазоне изменений реактивности и мощности.

## 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ, ОБОЗНАЧЕНИЯ

Пусть в импульсном реакторе периодического действия, пульсирующем с частотой  $f_p = 1/T_p$ , имеются периодические возмущения реактивности с частотой  $f_p/2$  и амплитудой  $\rho$  /реактивность измеряется в долях  $\beta_{и}$  /. Требуется найти флуктуации энергии импульсов мощности при условии, что реактор находится в критическом, равновесном состоянии. Флуктуации энергии импульсов определим величиной  $x_n = (Q_n - \bar{Q})/\bar{Q}$ , где  $Q_n$  - энергия  $n$ -го импульса мощности,  $\bar{Q}$  - средняя энергия импульса:  $\bar{Q} = P \cdot T_p$ , где  $P$  - средняя мощность реактора /значением величины фона между импульсами пренебрегаем/. Считаем, что мощностной эффект реактивности пропорционален температуре активной зоны с коэффициентом пропорциональности  $k_T$ . Теплоемкость активной зоны обозначается  $'c'$ ; для параметров запаздывающих нейтронов использованы традиционные обозначения.

### 3. ВЫВОД УСЛОВИЯ КРИТИЧНОСТИ

#### 3.1. Соотношение для температуры активной зоны; реактивность обратной связи

Реактивность, вносимая обратной связью, в  $n$ -м импульсе может быть представлена в виде

$$\rho_{o.c.} = k_T (T_0 + \delta T_n), \quad /1/$$

где  $T_0$  - средняя температура активной зоны в моменты генерации импульсов /см.рис.1/,  $\delta T_n$  - отклонение температуры от среднего значения. Очевидно, постоянная составляющая  $k_T \cdot T_0$  компенсируется органами регулирования, и ее не следует принимать во внимание. Также очевидно, что  $\delta T_1 = -\delta T_2$ , поэтому в дальнейшем оставим в рассмотрении только величину  $\delta T = \delta T_1$ . Пусть изменение температуры в промежутке между импульсами  $\Delta T$  пропорционально максимальной температуре в импульсе с коэффициентом пропорциональности  $\gamma < 0$  /это в точности справедливо, например, в случае однородного цилиндрического или сферического тепловыделяющего элемента, где  $\gamma = e^{-aT_p} - 1$ /. Тогда можно записать систему уравнений для  $\Delta T_n$ :

$$\Delta T_1 = (T_0 + \delta T + Q_1/c) \gamma, \quad /2/$$

$$\Delta T_2 = (T_0 - \delta T + Q_2/c) \gamma,$$

из которой легко вычислить  $T_0$ , используя очевидное соотношение  $\Delta T_1 + \Delta T_2 = -2\bar{Q}/c$ :

$$T_0 = -\frac{1+\gamma}{\gamma} \cdot \frac{\bar{Q}}{c}. \quad /3/$$

Величина  $\delta T$  определяется следующим образом. Существует связь между  $\delta T$  для четного и нечетного импульсов:

$$-\delta T = \delta T + Q_1/c + \Delta T_1. \quad /4/$$

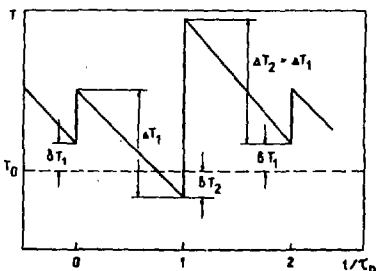


Рис.1. График, иллюстрирующий характер изменения температуры активной зоны реактора во времени при знакопеременной пульсации реактивности; 0,1,2 - моменты появления импульсов мощности,  $T_p$  - промежуток времени между импульсами мощности, остальные обозначения - в тексте.

Используя соотношения /2/ и /3/, получим из /4/ явное выражение для  $\delta T$  через  $x_1$  и  $y$  :

$$\delta T = -\frac{1+y}{2+y} \cdot (Q_1/c - \bar{Q}/c) = -\frac{1+y}{2+y} x_1 \bar{Q}/c. \quad /5/$$

Величина  $y < 0$ , и обычно  $|y| \ll 1$ .

Для дальнейшего рассмотрения удобно ввести параметр

$$r_T = \frac{2(1+y)}{2+y} k_T \bar{Q}/c, \quad /6/$$

который отличается от параметра  $r$ , использованного в первой части работы, множителем  $2(1+y)/(2+y)$ , близким к 1. Таким образом, реактивность обратной связи в нечетном импульсе будет равна

$$\rho_{o.c.} = k_T \delta T = -\frac{r_T}{2} x \quad /7/$$

/здесь опущен индекс "1" при  $x$ , т.е.  $x_1 = -x_2$  /.

### 3.2. Интенсивность источника запаздывающих нейтронов

Баланс ядер-предшественников запаздывающих нейтронов /я.п.з.н./ в реакторе аналогичен балансу тепла, поэтому можно сразу записать выражение для отклонения числа я.п.з.н.  $i$ -й группы в нечетном импульсе от среднего значения  $C_{0i}$  :

$$\delta C_i = -\frac{1+y_s}{2+y_s} \beta_i \bar{Q} x,$$

где  $y_s$  для запаздывающих нейтронов есть  $(e^{-\lambda_i T_p} - 1)$ . Тогда

$$\delta C_i = -\frac{e^{-\lambda_i T_p}}{1+e^{-\lambda_i T_p}} \cdot \beta_i \bar{Q} x.$$

Отклонение интенсивности источника запаздывающих нейтронов в нечетном импульсе будет равно

$$\delta S = \sum_{i=1}^6 \lambda_i \delta C_i = -x \bar{Q} \sum_{i=1}^6 \frac{\lambda_i \beta_i e^{-\lambda_i T_p}}{1+e^{-\lambda_i T_p}}.$$

Среднее значение интенсивности источника запаздывающих нейтронов, вычисленное аналогично величине  $T_0$ , есть

$$S_0 = \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_{i0} = \bar{Q} \sum_{i=1}^6 \frac{\lambda_i \beta_i e^{-\lambda_i T_p}}{1-e^{-\lambda_i T_p}}.$$

Интенсивности источника запаздывающих нейтронов в нечетном и четном импульсах будут равны соответственно:

$$S_1 = S_0 + \delta S; \quad S_2 = S_0 - \delta S.$$

Введя обозначения

$$\Phi = \frac{1}{\beta f_p} \sum_{i=1}^6 \frac{\lambda_i \beta_i e^{-\lambda_i T_p}}{1 - e^{-\lambda_i T_p}} \quad /8/$$

и

$$r_s = 2 \sum_{i=1}^6 \frac{\lambda_i \beta_i e^{-\lambda_i T_p}}{1 + e^{-\lambda_i T_p}} / \sum_{i=1}^6 \frac{\lambda_i \beta_i e^{-\lambda_i T_p}}{1 - e^{-\lambda_i T_p}}, \quad /9/$$

получим

$$S_1 = \bar{Q} \Phi \beta f_p \left(1 - \frac{r_s}{2} x\right) \dots, \quad /10/$$

$$S_2 = \bar{Q} \Phi \beta f_p \left(1 + \frac{r_s}{2} x\right) \dots \quad /11/$$

### 3.3. Соотношения критичности

Энергию импульсов мощности можно выразить следующими соотношениями:

$$Q_1 = S_1 \mathcal{M}(\rho_{m1}),$$

$$Q_2 = S_2 \mathcal{M}(\rho_{m2}), \quad /12/$$

$$Q_1 + Q_2 = 2\bar{Q},$$

где  $\mathcal{M}(\rho_m)$  - фактор умножения нейтронов в импульсе <sup>/2,3/</sup>.

Максимальное значение реактивности в импульсе  $\rho_m$  можно записать через ее составляющие

$$\rho_m = \rho_{m0} + \Delta\rho + \rho_n + \rho_{o.c.},$$

где  $\rho_{m0}$  - равновесная импульсная надкритичность при отсутствии обратной связи и флуктуаций реактивности,  $\Delta\rho$  - изменение импульсной надкритичности вследствие появления флуктуаций реактивности,  $\rho_n$  - внешняя реактивность в  $n$ -м импульсе. Величину  $\mathcal{M}$ , как известно, можно представить в довольно широкой области изменений  $\rho_m$  около  $\rho_{m0}$  в экспоненциальном виде:

$$\mathbb{M}(\rho_m) \approx \mathbb{M}(\rho_{m0}) e^{(\Delta\rho + \rho_n + \rho_{o.c.})} \quad /13/$$

Теперь вместо /12/, применив соотношения /7, 10, 11 и 13/ и  $x$  вместо  $Q_n$ , имеем

$$1+x = \Phi \beta f_p \left(1 - \frac{r_s}{2} x\right) \mathbb{M}(\rho_{m0}) e^{(\Delta\rho + \rho - \frac{r_T}{2} x)}$$

$$1-x = \Phi \beta f_p \left(1 + \frac{r_s}{2} x\right) \mathbb{M}(\rho_{m0}) e^{(\Delta\rho - \rho + \frac{r_T}{2} x)}$$

/Здесь использовано очевидное равенство:  $\rho_1 = -\rho_2 = \rho$  /.

Учитывая, что  $\mathbb{M}(\rho_{m0}) \cdot \Phi \beta f_p = 1$  /критическое условие для реактора без обратной связи и флуктуаций/, окончательно получаем систему уравнений, определяющую значения  $x$  и  $\Delta\rho$  в критическом реакторе при наличии знакопеременных колебаний реактивности с амплитудой  $\rho$ :

$$1+x = \left(1 - \frac{r_s}{2} x\right) \exp\left(\Delta\rho + \rho - \frac{r_T}{2} x\right),$$

$$1-x = \left(1 + \frac{r_s}{2} x\right) \exp\left(\Delta\rho - \rho + \frac{r_T}{2} x\right). \quad /14/$$

#### 4. РЕШЕНИЕ И АНАЛИЗ СИСТЕМЫ /14/

Решение и анализ системы /14/, представляющей собой критическое условие для и.р.п.д. при наличии обратной связи и колебаний реактивности, нетрудно осуществить при условии, что  $r_s \ll 1$  /см. ф-лу /9//. Это условие выполняется для  $T_p < 1$ с. В таком приближении можно считать, что  $1 \pm r_s x/2 \approx \exp(\pm r_s x/2)$ , и тогда вместо /14/ имеем

$$1+x = \exp(\Delta\rho + \rho - r^* x/2) \dots, \quad /15'/$$

$$1-x = \exp(\Delta\rho - \rho + r^* x/2) \dots, \quad /15''/$$

где  $r^* = r_T + r_s$  /см. /6/ и /9//. Можно исключить  $\Delta\rho$ , разделив уравнение /15'/ на /15''/:

$$\frac{1+x}{1-x} = e^{2\rho - r^* x} \quad /16/$$

Последнее уравнение дает связь между амплитудой колебаний реактивности  $\rho$  и амплитудой относительного изменения энергии импульсов мощности  $x = (Q_1 - \bar{Q})/\bar{Q}$ . Для  $\rho \ll 1$  и  $x \ll 1$  получаем выведенное в работе /1/ соотношение  $x = \rho / (1 + r^*/2)$ . где вместо величины  $r = k_T Q/c$  стоит ее эффективное значение  $r^* = r_T + r_s$ .

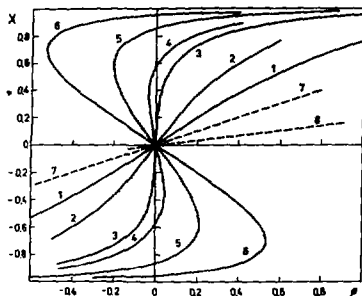


Рис.2. Связь амплитуды относительного отклонения энергии импульсов мощности от среднего значения ( $x$ ) с амплитудой колебаний реактивности  $\rho$ , доли  $\beta_n$  при разных значениях параметра обратной связи ( $\gamma^*$ ): кривая 1 -  $-\gamma^* = 0$ ; 2 -  $-\gamma^* = -1$ ; 3 -  $-\gamma^* = -2$ ; 4 -  $-\gamma^* = -2,3$ ; 5 -  $-\gamma^* = -3$ ; 6 -  $-\gamma^* = -4$ , 7 -  $-\gamma^* = +2$ , 8 -  $-\gamma^* = +10$ .

более точно учитывающее изменение температуры в реакторе и изменение источника запаздывающих нейтронов /см.ф-лы /6/ и /9//.

Решение уравнения /16/ для разных  $\gamma^*$  приведено на рис.2. Для  $\gamma^* > 0$  колебания мощности ( $x$ ) меньше, чем при  $\gamma^* = 0$ , т.е. положительная обратная связь уменьшает флуктуации мощности, вызванные знакопеременными колебаниями реактивности. Для  $-2 < \gamma^* < 0$  значения  $x$  выше, чем для  $\gamma^* = 0$ , при любых  $\rho$ , т.е. отрицательная о.с. увеличивает колебания мощности. Сложное поведение и.р.п.д. обнаруживается при глубокой отрицательной обратной связи, когда  $\gamma^* < -2$ . Как видно из рис.2, в этой области значений  $\gamma^*$  функция  $x(\rho)$  неоднозначна /имеет три значения/ в некотором диапазоне  $|\rho| < \rho_0 / \rho_0$  зависит от  $\gamma^*$  / . Иными словами, и.р.п.д. может находиться в одном из трех критических состояний, каждое из которых характеризуется своим значением  $x$ . Например, если  $\gamma^* = -3$  и  $\rho = 0,1 \beta_n$ , то возможны следующие значения  $x$ :  $x = 0,2$  ( $Q_1 = 1,2 \bar{Q}$ ;  $Q_2 = 0,8 \bar{Q}$ );  $x = 0,8$  ( $Q_1 = 1,8$ ,  $Q_2 = 0,2$ ) и  $x = 0,9$  ( $Q_1 = 1,9$ ,  $Q_2 = 0,1$ ). Какое из этих состояний "выберет" реактор, зависит от начальных условий. Некоторые из этих состояний /по крайней мере, то, для которого  $x \sim \rho$  / могут оказаться неустойчивыми. Интересно, что импульсная надкритичность ( $\rho_{m0} + \Delta\rho$ ) ниже, чем в отсутствие флуктуаций, т.к.  $\Delta\rho < 0$ . Действительно, перемножив уравнения /15' / и /15'' /, получим:

$$1 - x^2 = \exp(2 \Delta\rho) \dots \dots \dots /17/$$

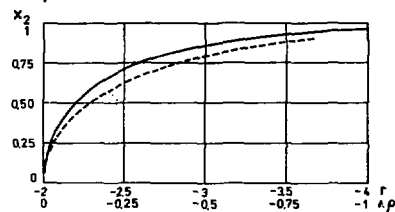
Из соотношения /17/ видно, что при  $x \neq 0$   $\Delta\rho$  отрицательна и тем больше по модулю, чем больше  $x$  /см. рис.3/.

Для  $\rho > \rho_0 / \rho_0 = 0,21$  при  $\gamma^* = -3$  / функция  $x(\rho)$  становится однозначной и имеет значения, близкие к 1; например, при  $\gamma^* = -2,3$  и  $\rho = \rho_0 = 0,04 \beta_n$   $x = 0,67$  - такое же, как при  $\rho = 0,84 \beta_n$  и  $\gamma^* = 0$ .

Следует отметить, что трехзначность  $x$  имеет место и при  $\rho = 0$ , т.е. в отсутствие флуктуаций реактивности. Один из корней уравнения /16/ при  $\rho = 0$  всегда нулевой, что соответствует



Рис. 3. Амплитуда относительного отклонения энергии импульсов мощности в критическом состоянии реактора ( $\chi_2$ ) как функция параметра обратной связи ( $\gamma$ ) и отклонения реактивности от равновесного значения  $|\Delta\rho$ , доли  $\beta_n$  /.



традиционному условию постоянства энергии импульсов мощности в критическом реакторе; второй и третий корни равны по модулю, противоположны по знаку и увеличиваются с уменьшением  $\gamma^*$  /рис.3/. Таким образом, в принципе возможна работа и.р.п.д. в критическом состоянии с чередующимися значениями энергии импульсов. Можно предполагать, что критические состояния и.р.п.д. существуют и при более сложном периодическом изменении энергии импульсов, чем простое чередование. Однако вопрос об устойчивости реактора при значениях параметра  $\gamma^* < -2$  требует специального рассмотрения; за полезные дискуссии по этому вопросу автор признателен А.К.Попову.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Шабалин Е.П. ОИЯИ, Р11-85-52, Дубна, 1985.
2. Бондаренко И.И., Стависский Ю.Я. АЭ, 1959, т.7, вып.5, с.417.
3. Шабалин Е.П. Импульсные реакторы на быстрых нейтронах. Атомиздат, М., 1976.

**Вниманию организаций и лиц, заинтересованных в получении публикаций Объединенного института ядерных исследований**

Принимается подписка на препринты и сообщения Объединенного института ядерных исследований.

Установлена следующая стоимость подписки на 12 месяцев на издания ОИЯИ, включая пересылку, по отдельным тематическим категориям:

ИНДЕКС	ТЕМАТИКА	Цена подписки на год
1.	Экспериментальная физика высоких энергий	10 р. 80 коп.
2.	Теоретическая физика высоких энергий	17 р. 80 коп.
3.	Экспериментальная нейтронная физика	4 р. 80 коп.
4.	Теоретическая физика низких энергий	8 р. 80 коп.
5.	Математика	4 р. 80 коп.
6.	Ядерная спектроскопия и радиохимия	4 р. 80 коп.
7.	Физика тяжелых ионов	2 р. 85 коп.
8.	Криогеника	2 р. 85 коп.
9.	Ускорители	7 р. 80 коп.
10.	Автоматизация обработки экспериментальных данных	7 р. 80 коп.
11.	Вычислительная математика и техника	6 р. 80 коп.
12.	Химия	1 р. 70 коп.
13.	Техника физического эксперимента	8 р. 80 коп.
14.	Исследования твердых тел и жидкостей ядерными методами	1 р. 70 коп.
15.	Экспериментальная физика ядерных реакций при низких энергиях	1 р. 50 коп.
16.	Дозиметрия и физика защиты	1 р. 90 коп.
17.	Теория конденсированного состояния	6 р. 80 коп.
18.	Использование результатов и методов фундаментальных физических исследований в смежных областях науки и техники	2 р. 35 коп.
19.	Биофизика	1 р. 20 коп.

Подписка может быть оформлена с любого месяца текущего года.

По всем вопросам оформления подписки следует обращаться в издательский отдел ОИЯИ по адресу: 101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79.

Шабалин Е.П.

P11-85-309

Влияние мощностного эффекта реактивности  
на флуктуации мощности в импульсном реакторе.  
Случай знакопеременной пульсации реактивности

Выводятся соотношения между амплитудой знакопеременных колебаний внешней реактивности в импульсном реакторе и колебаниями энергии импульсов мощности с учетом температурного мощностного эффекта реактивности. Делается вывод об усилении колебаний мощности при отрицательной обратной связи. Показано, что при средней мощности, выше некоторого определенного значения, незатухающие колебания мощности могут возникнуть и в отсутствие пульсаций внешней реактивности. Импульсный реактор может находиться в равновесии, критическом состоянии не только при постоянном значении энергии импульсов мощности, но и при пульсирующих значениях энергии.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1985

Перевод О.С.Виноградовой

Shabalin E.P.

P11-85-309

Influence of the Power Reactivity Effect  
on the Power Fluctuation in a Pulsed Reactor.  
The Case of Alternating Reactivity Oscillation

The reactivity-power relations for a periodically pulsed reactor are derived in the case when the outer reactivity oscillates alternately from one pulse to another, with reactivity-power feedback taken into account. The previous approximate result (amplification of power oscillations by the negative feedback) is confirmed by precise solution. It is shown that undamped oscillations of the energy of the pulses may occur at the mean power of the reactor greater than a definite limit with no meaning the reactivity oscillates or it does not. The pulsed reactor can be in the critical state with the energy of the pulses oscillating alternately.

The investigation has been performed at the Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1985

12 коп.

Редактор М.И.Зарубина. Макет Н.А.Киселевой.  
Набор В.С.Румянцевой, Н.И.Коротковой.

Подписано в печать 14.06.85.

Формат 60x90/16. Офсетная печать. Уч.-изд.листов 0,79.

Тираж 465. Заказ 36350.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований.  
Дубна Московской области.