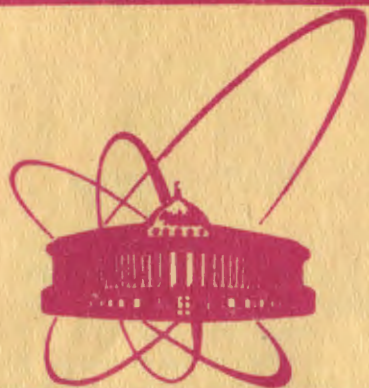


80-675



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

126/2-81

12/1-81

P3-80-675

В.Л.Ломидзе, Нго Куанг Зуй, Е.П.Шабалин

О ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ЭФФЕКТА
САМОГАШЕНИЯ ИМПУЛЬСОВ МОЩНОСТИ
РЕАКТОРОВ ТИПА ИБР

Направлено в АЭ

1980

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Отличительной особенностью реакторов типа ИБР является их высокая чувствительность к изменениям реактивности. Поэтому для таких реакторов требуется ограничение области допустимых отклонений реактивности, вызываемых колебаниями деталей конструктивных узлов, в частности, модулятора реактивности. Для ИБР-2, например, установлено предельное отклонение реактивности за один период пульсации $1,5 \cdot 10^{-4} K_{эфф}$; соответственно смещение лопасти основного подвижного отражателя в направлении активной зоны не должно превышать 0,3 мм. Отклонение реактивности $1 \cdot 10^{-3} K_{эфф}$ уже вызовет разрушение активной зоны. Очевидно, что расширение области допустимых изменений реактивности, т.е. повышение безопасности работы реактора, является одной из важных задач при создании и эксплуатации импульсного реактора.

Решение этой задачи можно найти, используя свойство самогашения реактора вследствие отрицательного температурного эффекта. В обычных условиях эффект самогашения импульса проявляется слабо, однако можно достичь значительного эффекта при помощи модулятора с гетерогенной структурой^{1/1}.

Такой модулятор состоит из двух отражателей с решетками, движущимися навстречу друг другу. Реактивность как функция времени выражается суммой двух составляющих: параболической, которая обусловлена движением отражателей мимо активной зоны, и гармонической, описывающей изменение реактивности за счет периодического перекрытия щелей одного отражателя пластинами решеток второго. Для случая модуляции реактивности, изображенного на рис. 1, реактор на каждый период пульсации реактивности будет генерировать подряд три импульса мощности. Второй импульс реактивности, наиболее высокий, создает главный импульс мощности, а первый и третий импульсы дают небольшие побочные импульсы мощности. При внесении внешней положительной реактивности все импульсы мощности увеличатся, однако первый, побочный импульс, нагревая реактор, вносит дополнительную отрицательную реактивность и гасит главный импульс мощности, в результате чего суммарная энергия импульсов растет медленнее или даже падает с ростом реактивности в некоторых интервалах ее изменения. Для того, чтобы эти интервалы были широкими, первый импульс мощности в номинальном режиме работы

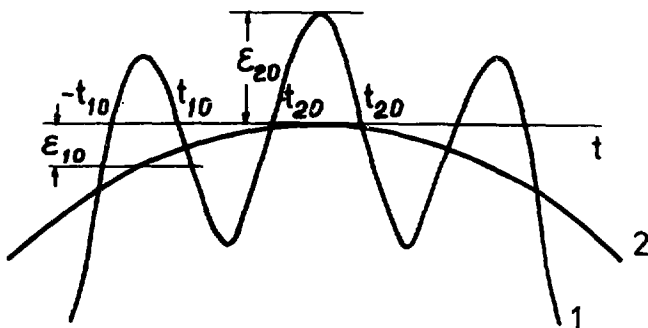


Рис. 1. Временная зависимость реактивности вблизи максимума для модулятора гетерогенной структуры. 1 - суммарное изменение реактивности, 2 - изменение реактивности по параболическому закону вследствие движения отражателей как целого.

реактора должен быть достаточно большим, чтобы действие его температурного эффекта оказалось значительным, но не слишком большим, чтобы он не становился главным импульсом. С точки зрения использования пучков нейтронов в физических экспериментах побочные импульсы мощности должны быть как можно меньше.

Настоящая работа посвящена выбору параметров импульсов реактивности, так, чтобы все эти требования удовлетворялись оптимально. В дальнейшем анализе третьим импульсом мощности пренебрегаем из-за его гашения главным импульсом мощности.

2. ИМПУЛЬСЫ РЕАКТИВНОСТИ

Зависимость реактивности от времени выражается в следующем виде:

$$\epsilon(t) = \epsilon_0 - \alpha v^2 t^2 + \epsilon_{20} \cos \omega t, \quad //$$

где $(\epsilon_0 - \alpha v^2 t^2)$ - изменение реактивности по параболическому закону, $\epsilon_{20} \cos \omega t$ - гармоническое изменение реактивности, α - коэффициент параболы, v - линейная скорость отражателей относительно активной зоны, ϵ_{20} и ω - соответственно амплитуда и круговая частота гармонических колебаний реактивности.

Поскольку член $\alpha v^2 t^2$ медленно изменяется в области второго импульса реактивности, этот импульс может быть описан приближенной формулой:

$$\epsilon_2(t) = \epsilon_0 + \epsilon_{20} \cos \omega t \quad (-t_{20} \leq t \leq t_{20}).$$

Величину ϵ_0 можно определить, исходя из условия минимальной длительности импульса мощности, которая обратно пропорциональ-

на квадратному корню из
$$Y_{20} = \left. \frac{d\epsilon_2(t)}{dt} \right|_{t=-t_{20}} = \epsilon_{20} \omega \sin \omega t_{20} \quad /2/$$

Следовательно, вышесказанное условие требует выбора t_{20} так, чтобы при заданных ϵ_{20} и ω величина Y_{20} достигала максимального значения, т.е.

$$Y_{20} = \epsilon_{20} \omega. \quad /2/$$

Тогда $\sin \omega t_{20} = 1$ и $t = \frac{\pi}{2\omega}$. Последнее вместе с условием

$\epsilon_2(-t_{20}) = \epsilon_0 + \epsilon_{20} \cos \omega t_{20} = 0$ дает $\epsilon_0 = 0$. Таким образом, второй импульс реактивности имеет следующий вид:

$$\epsilon_2(t) = \epsilon_{20} \cos \omega t. \quad /3/$$

Из формулы /3/ следует, что равновесной надкритичностью является амплитуда гармонической функции реактивности ϵ_{20} . В связи с этим параметры решеток отражателя должны быть выбраны такими, чтобы амплитуда изменения реактивности по гармоническому закону была равна требуемой равновесной надкритичности.

Что касается первого импульса реактивности, то предположим, что он имеет правильный гармонический вид с амплитудой ϵ_{20} и сдвинут на отрезок $\epsilon_{10} = \alpha v^2 t_0^2$ относительно нулевого уровня реактивности, где $t_0 = 2\pi/\omega$ - период гармонической функции изменения реактивности. Тогда этот импульс описывается формулой:

$$\epsilon_1(t) = \epsilon_{20} \cos \omega t - \epsilon_{10} \quad \text{для} \quad -t_{10} \leq t \leq t_{10} \quad /4/$$

/нуль отсчета времени для первого импульса сдвинут на $-t_0$ относительно второго импульса/.

В формулах /3/ и /4/ величина t_{20} задана, ϵ_{20} определяется из критического условия реактора, а ϵ_{10} /или αv^2 / предстоит определить из условия наилучшего самогашения реактора.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСОВ РЕАКТИВНОСТИ

Определим ϵ_{20} в предположении, что мощность реактора в основном создается вторым импульсом реактивности. В рамках одноточечной модели кинетики реактора энергия его импульса в номинальном режиме определяется с погрешностью ~5% следующим выражением /1/ :

$$Q_{20} = \frac{2\pi S}{\gamma_{20}} e^{b_{20}}, \quad /5/$$

где S - интенсивность запаздывающих нейтронов. Считаем величину S постоянной в течение импульса реактивности. Показатель степени в уравнении /5/ есть

$$b_{20} = \frac{1}{r} \int_{-t_{20}}^{t_{20}} \epsilon_2(t) dt = \frac{2\epsilon_{20}}{\omega r}, \quad /6/$$

где r - среднее время жизни мгновенных нейтронов.

Используя критическое условие реактора '1', получим следующее уравнение для нахождения величины ϵ_{20} :

$$\frac{2\pi n \beta}{\omega \epsilon_{20}} e^{2\epsilon_{20}/\omega r} + \frac{\beta}{|\epsilon_{\phi}|} = 1, \quad /7/$$

где n - частота повторения импульсов мощности, β - доля запаздывающих нейтронов, $|\epsilon_{\phi}|$ - абсолютное значение реактивности между импульсами.

Решение уравнения /7/ для параметров

$$\left. \begin{aligned} n &= 5 \text{ с}^{-1}, & \beta &= 2,2 \cdot 10^{-3}, & |\epsilon_{\phi}| &= 3,5 \cdot 10^{-2} \\ t_{20} &= 100 \text{ мкс}, & r &= 6 \cdot 10^{-8} \text{ с} \end{aligned} \right\} /8/$$

дает $\epsilon_{20} = 3 \cdot 10^{-3}$ абс ед. реактивности.

Для определения ϵ_{10} предположим, что в номинальном режиме:

$$Q_{10} = \xi Q_{20}, \quad /9/$$

где

$$Q_{10} = \frac{2\pi S}{\gamma_{10}} e^{b_{10}} \quad /10/$$

- энергия импульса мощности ;

$$\left. \begin{aligned}
 \gamma_{10} &= \left. \frac{d\epsilon_1(t)}{dt} \right|_{t=t_{10}} = \omega \sqrt{\epsilon_{20}^2 - \epsilon_{10}^2}, \\
 b_{10} &= \frac{1}{r} \int_{-t_{10}}^{t_{10}} \epsilon_1(t) dt, \\
 &= \frac{2}{\omega r} \left[\sqrt{\epsilon_{20}^2 - \epsilon_{10}^2} - \epsilon_{10} \arccos\left(\frac{\epsilon_{10}}{\epsilon_{20}}\right) \right],
 \end{aligned} \right\} /11/$$

а $\xi \ll 1$.

Из формул /2/, /5/, /6/, /9/-/11/ следует, что

$$\xi = \frac{\epsilon_{20}}{\sqrt{\epsilon_{20}^2 - \epsilon_{10}^2}} \exp \left\{ \frac{2}{\omega r} \left[\sqrt{\epsilon_{20}^2 - \epsilon_{10}^2} - \epsilon_{20} - \epsilon_{10} \arccos\left(\frac{\epsilon_{10}}{\epsilon_{20}}\right) \right] \right\}. \quad /12/$$

Зависимость ξ от ϵ_{10} для вышеприведенных параметров дана на рис. 2, кривая 1. Из этого рисунка видно, что ϵ_{10} однозначно связана с ξ . Наша задача состоит в нахождении такого значения ξ /или ϵ_{10} /, которое обеспечивает наилучшее самогашение реактора. Пусть в критический реактор извне вносится положительная реактивность ϵ . Тогда первый импульс реактивности будет описываться так:

$$\epsilon_1(t) = \epsilon_{20} \cos \omega t - (\epsilon_{10} - \epsilon). \quad /13/$$

Для второго импульса реактивности, кроме ϵ , необходимо учитывать влияние отрицательного температурного эффекта, вызываемого первым импульсом мощности. В реакторах на быстрых нейтронах температурный эффект реактивности определяется в основном термическим расширением топлива. В нашем примере интервал времени между первым и вторым импульсами мощности /~400 мкс/ достаточен для того, чтобы ядерное топливо успело расшириться из-за нагрева в первом импульсе. Тогда первый импульс мощности внесет отрицательную реактивность $-\epsilon_{\mu}$ во второй импульс реактивности, который будет теперь определяться так:

$$\epsilon_2(t) = \epsilon_{20} \cos \omega t - (\epsilon_{\mu} - \epsilon), \quad /14/$$

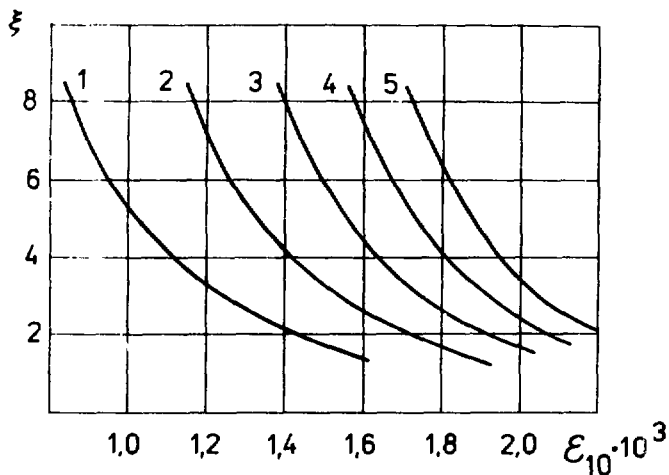


Рис.2. Зависимость отношения энергий первого и

второго импульсов мощности $\xi = \frac{Q_{10}}{Q_{20}}$ /% от разности надкритичностей второго и первого импульсов реактивности ϵ_{10} при разных значениях длительности первого импульса реактивности t'_0 :

1. $t'_0 = t_0$; 2. $t'_0 = 1,2 t_0$; 3. $t'_0 = 1,4 t_0$;
 4. $t'_0 = 1,6 t_0$; 5. $t'_0 = 1,8 t_0$;
 $t_0 = 400$ мкс.

где $\epsilon_{\mu} = \mu \frac{Q}{Q_0}$; $\mu = |A_T| \cdot \Delta T_0$. /15/

A_T - температурный коэффициент реактивности и ΔT_0 - средний подогрев топлива в номинальном импульсе энергии Q_0 . Для ИБР-2

$|A_T| \approx 6,10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $\Delta T_0 \approx 25 \text{ K}$, откуда $\mu \approx 1,5 \cdot 10^{-4}$. /16/

Номинальная энергия импульса реактора Q_0 равна

$$\left. \begin{aligned} Q_0 &= Q_{10} + Q_{20} = (1 + \xi) S M_{20} \\ M_{20} &= \frac{2\pi}{\gamma_{20}} e^{b_{20}} \end{aligned} \right\} \quad /17/$$

Импульсы мощности и суммарная мощность с учетом ϵ и ϵ_μ определяются уравнениями:

$$Q_1 = SM_1; \quad M_1 = \frac{2\pi}{\gamma_1} e^{b_1} \quad /18/$$

$$Q_2 = SM_2; \quad M_2 = \frac{2\pi}{\gamma_2} e^{b_2}, \quad /19/$$

$$Q = Q_1 + Q_2 = S(M_1 + M_2), \quad /20/$$

где

$$\gamma_1 = \omega \sqrt{\epsilon_{20}^2 - (\epsilon_{10} - \epsilon)^2},$$

$$\gamma_2 = \omega \sqrt{\epsilon_{20}^2 - (\epsilon_\mu - \epsilon)^2},$$

$$b_1 = \frac{2}{\omega r} \left[\sqrt{\epsilon_{20}^2 - (\epsilon_{10} - \epsilon)^2} - (\epsilon_{10} - \epsilon) \arccos\left(\frac{\epsilon_{10} - \epsilon}{\epsilon_{20}}\right) \right],$$

$$b_2 = \frac{2}{\omega r} \left[\sqrt{\epsilon_{20}^2 - (\epsilon_\mu - \epsilon)^2} - (\epsilon_\mu - \epsilon) \arccos\left(\frac{\epsilon_\mu - \epsilon}{\epsilon_{20}}\right) \right],$$

$$\epsilon_\mu = \frac{\mu}{1 + \xi} \frac{M_1}{M_{20}},$$

/21/

Коэффициент увеличения мощности реактора за счет внесения внешней реактивности определим таким образом:

$$R = \frac{Q}{Q_0} = \frac{M_1 + M_2}{(1 + \xi) M_{20}}. \quad /22/$$

На рис. 3 приведены кривые, описывающие зависимость отношения R от ϵ при заданных ξ для реактора типа ИБР-2 с модулятором реактивности гетерогенной структуры и параметрами /8/ и /16/. Из рисунка видно, что кривые с малыми значениями ξ ($\xi < 3\%$) быстро растут по экспоненциальному закону, что обусловлено вкладом одного второго импульса мощности. При больших значениях ξ кривые характеризуются тем, что имеют

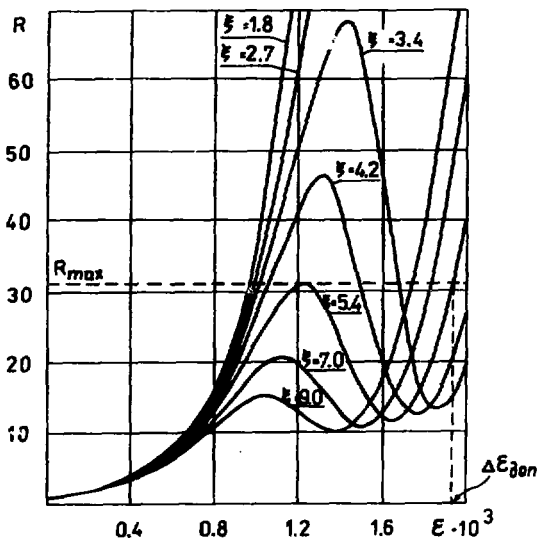


Рис. 3. Коэффициент увеличения энергии импульсов мощности R в зависимости от величины скачка внешней положительной реактивности ϵ при заданных значениях ξ (%).

частные максимум и минимум и после минимума опять растут по экспоненциальному закону. Участок до минимума в основном обусловлен вкладом второго импульса мощности с учетом температурного эффекта, а участок после минимума - первым импульсом мощности. Второй участок кривых смещается влево при увеличении ξ , что объясняется значительным вкладом первого импульса мощности. Из анализа кривых рис. 3 следует, что оптимальное условие для определения ξ можно сформулировать так: отношение R не превышает заданного предельного значения R_{\max} в наибольшей по возможности области изменения внешней реактивности ϵ . Для реактора ИБР-2 величина R_{\max} может быть принята равной 30, так как повышенные импульсы мощности в этих случаях вызывают только слабые или умеренные разрушения активной зоны [3]. В случае $R_{\max} = 30$ получим оптимальное значение $\xi \approx 6\%$ или $\epsilon_{10} \approx 9,5 \cdot 10^{-4} / \text{см}$. рис. 2, кривая 1/. Из рис. 3 видно, что тогда $\Delta \epsilon_{\text{доп}} \approx 1,9 \cdot 10^{-3}$, а это в 2 раза больше, чем область изменения ϵ в случае отсутствия температурного эффекта при таком же значении R_{\max} .

Оценим, каким должен быть коэффициент параболической модуляции реактивности α , чтобы обеспечить нужное значение ξ /или ϵ_{10} /. Для модулятора с двумя отражателями длиной $l = 100$ см, движущимися навстречу друг другу с относительной скоростью $2v = 4\pi l n_0$. где $n_0 \approx 20 \text{ с}^{-1}$, имеем

$$\alpha = \frac{\epsilon_{10}}{v^2 t_0^2} \approx 4 \cdot 10^{-5} \text{ см.}^{-2}$$

Такое значение α достигается очень легко.

Для того, чтобы снизить ξ при заданном R_{\max} или R_{\max} при заданном ξ , можно использовать модулятор, отражатели которого имеют неоднородную структуру решеток. В этом случае первый импульс реактивности подчиняется гармоническому закону с периодом $t'_0 > t_0$, где t_0 - период второго импульса реактивности. На рис. 4 показана зависимость ξ от отношения t'_0/t_0 при заданных параметрах $R_{\max} = 15, 20, 25$ и 30 . Из рисунка видно, что ξ

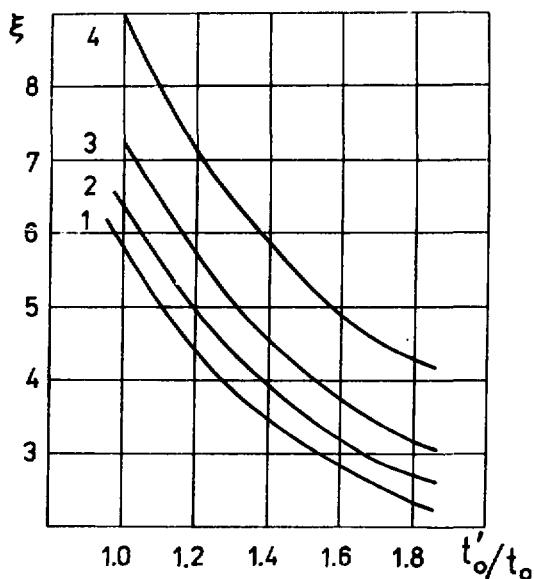


Рис. 4. Зависимость относительного значения ξ /%/ от отношения t'_0/t_0 :

1. $R_{\max} = 30$,
2. $R_{\max} = 25$,
3. $R_{\max} = 20$,
4. $R_{\max} = 15$.

убывает с увеличением $\frac{t'_0}{t_0}$ при фиксированном значении R_{\max} и R_{\max} убывает при заданном значении ξ . В случае $\frac{t'_0}{t_0} = 1,5$ ξ достигает значения 3% при $R_{\max} = 30$. С таким же значением t'_0/t_0 можно снижать R_{\max} до значения 15, если принять $\xi = 5,5\%$. Из полученных значений ξ определяем соответствующие значения ϵ_{10} по кривым на рис. 2 и затем необходимое значение коэффициента параболы a .

4. ВЫВОД

Используя модулятор реактивности гетерогенной структуры, можно при соответствующем выборе параметров модуляции значительно увеличить эффект самогашения, расширив тем самым область допустимых отклонений реактивности импульсного реактора на быстрых нейтронах периодического действия и увеличив ядерную безопасность такой установки.

Для реактора с параметрами ИБР-2 при амплитуде гармонической составляющей $3 \cdot 10^{-3}$ абс.ед. реактивности и коэффициенте параболы реактивности $4 \cdot 10^{-5}$ см⁻² предельное отклонение реактивности, еще не приводящее к разрушению активной зоны, составит $-2 \cdot 10^{-3}$, что в 2 раза больше, чем в случае штатного подвижного отражателя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шабалин Е.П. Импульсные реакторы на быстрых нейтронах. Атомиздат. М., 1976, с. 160.
2. Бондаренко И.И., Стависский Ю.Я. АЭ, 1959, т. 7, вып. 5, с. 417.
3. Ананьев В.Д. и др. ПТЭ, 1977, № 5, с. 17.

Рукопись поступила в издательский отдел
21 октября 1980 года.