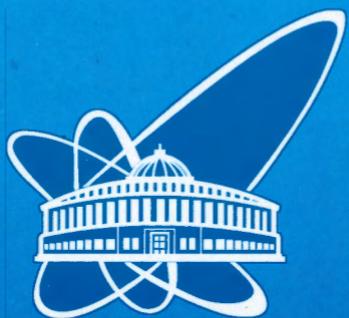


00-196



ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

00-196

P13-2000-196

Ю.Н.Пепельшев, А.К.Попов

ОСОБЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ИМПУЛЬСНОГО  
РЕАКТОРА ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ  
СОВМЕСТНО С ИНЖЕКТОРОМ\*

Направлено в журнал «Annals of Nuclear Energy»

\*Работа выполнена по проекту МНТЦ №682-97

2000

## 1. Введение

Импульсные реакторы периодического (ИБР-2, Дубна, Россия) или аperiodического действия (например, типа TRIGA) используются для генерации мощных импульсов нейтронов для широкого круга научно-технических и прикладных задач. По многим причинам при их эксплуатации необходима система стабилизации энергии каждого импульса или система формирования импульса мощности заданной формы и энергии. Например, по программе NSRR (JAERI, Япония) на реакторе TRIGA создана система формирования мощных одиночных импульсов различной формы для исследования ударных нагрузок на тепловыделяющие элементы. Для импульсных реакторов периодического действия актуально снижение случайных флуктуаций энергии импульсов, вызванных неконтролируемыми флуктуациями реактивности. Высокий уровень флуктуаций энергии импульсов (до ~50%) в реакторах периодического действия связан с высокой чувствительностью реактора к внешней реактивности (в ~20 раз большей, чем, например, для реакторов постоянной мощности с урановым топливом). Существующие системы стабилизации в основном ориентированы на стабилизацию средней мощности, т.е. на частотах близких к нулю. Стабилизация мощности на более высоких частотах традиционным путем, с помощью механических регуляторов, практически невозможна. В работе для решения этой задачи предлагается использовать внешний импульсный источник нейтронов, генерируемый на внутренней мишени пучком, например, электронов от ускорителя. При таком подходе появляется также возможность генерировать пачки нейтронных импульсов заданной длительности. Последнее, например, может найти применение для испытания топливных кассет аналогично программе NSRR. Ниже дано краткое изложение предлагаемых решений с численными оценками возможности их реализации на реакторе ИБР-2.

## 2. Регулирование энергии каждого импульса мощности

В импульсных реакторах на быстрых нейтронах, в которых импульсы мощности развиваются благодаря создаваемой вращающимся модулятором реактивности периодической надкритичности на мгновенных нейтронах, предусматривается только регулирование средней мощности реактора. В качестве регулятора реактивности в данном случае используется один из стержней аварийной защиты.

В интервалах между импульсами реактор глубоко подкритичен, однако, происходящие в течение этих интервалов изменения реактивности могут привести к существенным изменениям надкритичности в импульсах и, следовательно, к существенным флуктуациям энергии импульсов мощности. Скомпенсировать эти изменения реактивности в течение самого импульса мощности (его длительность, например, для ИБР-2 составляет 215 мкс) с помощью механических органов управления невозможно.

В 1969 г. была опубликована работа о возможности использования ускорителя электронов относительно малой мощности для регулирования энергии каждого импульса мощного реактора [1]. Эта работа не получила своего развития. Однако,

учитывая совершенствование за последние годы как стабильности ускорителей (разброс амплитуд импульсов тока в районе 1%), так и быстродействие электронной техники, целесообразно напомнить об этом варианте регулирования и продолжить его обсуждение.

В качестве исходных использованы известные уравнения кинетики одноточечной модели реактора, приведенные к безразмерной форме:

$$\begin{aligned} \tau \frac{dP}{dt} &= \epsilon P + S + S_1, \\ \frac{1}{\lambda_i} \frac{dS_i}{dt} + S_i &= \mu_i \beta P, \quad i = 1, \dots, 6, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\epsilon = (1 - \beta)k_{эфф} - 1$  – реактивность на мгновенных нейтронах,  $k_{эфф}$  – эффективный коэффициент размножения,  $\lambda_i, \beta, \beta = \sum \beta_i$  – соответственно постоянная распада и доля источников запаздывающих нейтронов группы  $i$  и суммарная доля,  $\mu_i = \beta_i / \beta$  – относительная доля запаздывающих нейтронов группы  $i$ ,  $\tau$  – эффективное время жизни мгновенных нейтронов,  $P$  – мощность в относительных единицах,  $S = \sum S_i$ ,  $S_1$  – интенсивность источников запаздывающих нейтронов и внешнего источника, обусловленного инжектором в относительных единицах,  $t$  – время.

При решении уравнений (1) энергия импульса мощности

$$E = E_I + E_R \quad (2)$$

представлена в виде двух составляющих: одна обусловлена инжектором  $E_I$ , другая – собственно реактором  $E_R$  без учета инжекции. Из-за малости значений мощности в начале и в конце импульса достаточно оценивать энергию в интервале времени  $t_1 + t_2$  (рис. 1) более узком, чем ширина импульса реактивности.

В качестве внешнего источника нейтронов рассмотрена мишень ускорителя, расположенная в активной зоне реактора, которая под действием импульса электронов генерирует в интервале времени  $t_1 + t_1 + \Delta t$  прямоугольный импульс нейтронов длительностью  $\Delta t$ , амплитудой  $S_1$  и интегралом

$$I = \int_{t_1}^{t_1 + \Delta t} S_1 dt = S \Delta t = \text{const}. \quad (3)$$

Составляющая энергии, обусловленная инжектором, зависит от момента инжекции  $t_1$  (рис. 1):

$$E_I \approx \frac{1}{\tau} \int_{t_1}^{t_1 + t_2} \exp\left(\frac{1}{\tau} \int_{t_1}^{t'} \epsilon dt'\right) dt, \quad (4)$$

и достигает своего максимального значения  $E_{I\max}$  при  $t_1 = t^+$  (рис. 1). Реактивность  $\epsilon$  в районе максимума  $\epsilon_m$  хорошо аппроксимируется параболой

$$\epsilon = \epsilon_m - \alpha t^2, \quad (5)$$

где  $\alpha$  – параметр параболы. Одно и то же значение  $E_I$  можно получить как при  $t_1 < t^+$ , так и при  $t_1 > t^+$ . При  $t_1 < t^+$  в моменты наиболее резкого роста мощности ( $t > t^+$ ) форма импульса будет плавной, без излома.

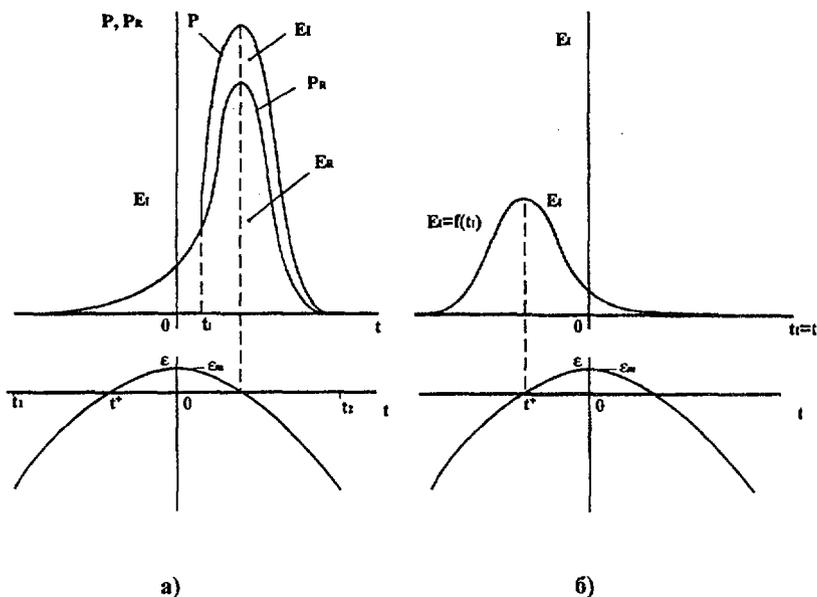


Рис.1. а) Реактивность  $\epsilon$ , мощность реактора с учетом инъекции  $P$  и ее доля без учета инъекции  $P_R$  как функции времени.

б) Доля энергии импульса  $E_I$ , обусловленная инжектором при фиксированном значении  $\epsilon_m$ , как функция момента инъекции  $t$ .

$E_R$  – доля энергии импульса, обусловленная собственно реактором (без учета эффекта инъекции)

Чтобы регулировать энергию импульса инжектором, необходимо для каждого импульса определять значение  $\epsilon_m$ . Это можно сделать, замеря энергию  $E_0$  в некоторые интервалы времени, которые для всех импульсов мощности будут одинаковы, если будут связаны с пространственным положением модулятора реактивности. Так как значения мощности в импульсе и между импульсами отличаются на несколько порядков, эти моменты времени желательно выбрать близкими моментам переходов реактивности из области отрицательных значений в область положительных значений  $t^+$ . В этом случае, начиная с моментов замеров и в течение импульса мощности, т.е. в течение достаточно короткого интервала времени, случайный характер изменения реактивности проявляется слабо. Кроме того, поскольку во время замеров значения реактивности близки к нулю, мощность реактора достаточно велика, т.е. слабо проявляется и стохастический характер ядерных процессов.

При работе в реакторном режиме (без инжектора) интервал времени, в течение которого реактор находится в надкритическом состоянии, т.е. от момента  $t^+$  до момента максимума импульса мощности (рис. 1), равен  $2|t^+| \approx 0,4 \cdot 10^{-3}$  с. На рис. 2 показан

зарегистрированный импульс мощности ИБР-2 при средней мощности реактора 2 МВт. Указанный на рис. 2 момент времени, равный 2 мс, соответствует моменту перехода реактора в надкритическое состояние  $t^+$ . При средней мощности 2 МВт амплитуда импульса мощности составляет 1500 МВт. Таким образом, как видно из рис.2, моменту  $t^+$  соответствует достаточно большое значение мощности ( $\sim 12$  МВт). До момента  $t^+$  на протяжении  $\sim 0,2 \cdot 10^{-3}$  с замеренная мощность импульса представляет собой практически гладкую кривую без существенных колебаний. Этот интервал и может быть выбран для замера энергии  $E_0$ , по которой будет вычисляться значение надкритичности  $\epsilon_m$ .

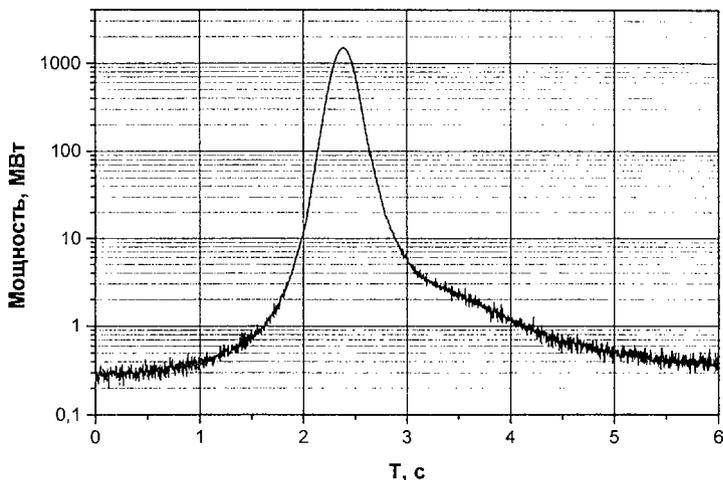


Рис. 2. Усредненная форма импульса мощности реактора ИБР-2. Усреднение по 600 импульсам, средняя мощность 2 МВт

Последовательность вычислений для определения момента инжекции  $t_i$ , необходимого для поддержания  $E$  на уровне  $E^*$ , показана на рис. 3. Указанные там переменные  $E_R$  и  $E_{lmax}$ , а также параметры  $a$  и  $b$  подчиняются уравнениям:

$$E_R \approx S_0 \frac{\pi}{\alpha^{1/2} \epsilon_m^{1/2}} \exp\left(\frac{4}{3} \frac{\epsilon_m^{1/2}}{\tau \alpha^{1/2}}\right), \quad (6)$$

где  $S_0$  – значение  $S$  перед началом развития импульса мощности, определяемое из второго уравнения системы (1). При стабильной энергии импульсов  $E$

$$S_0 = E\beta \sum_i \frac{\mu_i \lambda_i}{\exp(\Gamma \lambda_i) - 1}, \quad (7)$$

$$E_{lmax} = I \frac{\pi}{\tau} \alpha^{1/4} \epsilon_m^{1/4} \exp\left(\frac{4}{3} \frac{\epsilon_m^{3/2}}{\tau \alpha^{1/2}}\right), \quad (8)$$

$$t_1 = at^* = -a\epsilon_m^{1/2} / \alpha^{1/2}, \quad \text{где } a \geq 1,$$

$$b = (\tau \alpha^{1/2} / \epsilon_m^{3/2}) \ln(E_l / E_{lmax}) = \frac{2}{3} - a + \frac{1}{3} a^3. \quad (9)$$

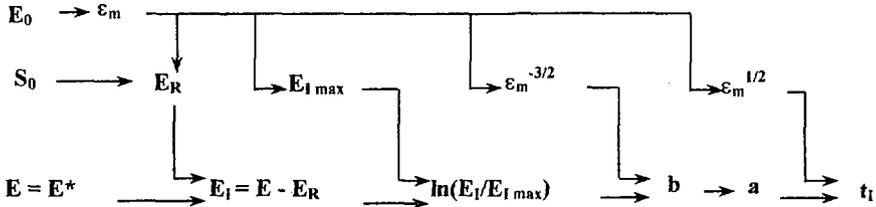


Рис. 3. Последовательность вычислений переменных и параметров для определения необходимого момента инжекции

Уравнения (6), (8) получены путем аналитического решения уравнений (1) в предположении, что мощность в районе максимума по форме близка к кривой Гаусса. В этом случае энергия импульса пропорциональна его амплитуде. Интенсивность  $S_0$  в уравнении (6) пропорциональна средней мощности реактора  $P$  и примерно равна

$$S_0 \approx \beta P. \quad (10)$$

Диапазон изменений доли энергии импульса  $E_R$  от  $E_{Rmin}$  до  $E_{Rmax}$  оценивался кратностью разброса:

$$m = E_{Rmax} / E_{Rmin}. \quad (11)$$

Для компенсации этого разброса необходимо, чтобы

$$E_{lmax} + E_{Rmin} = E^*, \quad E_{Rmax} = E^*. \quad (12)$$

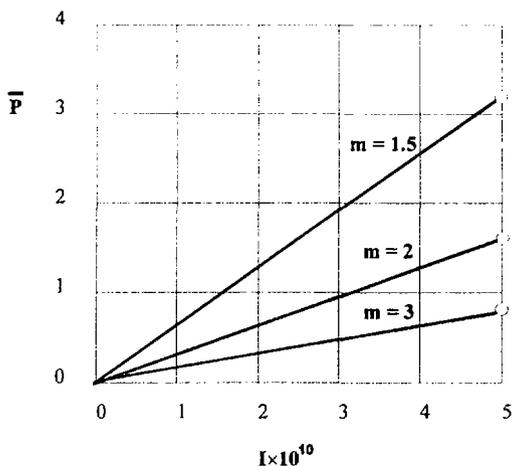
Во втором равенстве (12) принято  $E_{lmin} = 0$ . При  $E_R = E_{Rmin}$ , т.е. при  $\epsilon_m = \epsilon_{mmin} > 0$ , инжектор должен обеспечить  $E_{lmax} = E^* - E_{Rmin}$ . Из этого требования вытекает необходимое значение интеграла интенсивности мишени:

$$I \approx S_0 \frac{E_{lmax}}{E_{Rmin}} \frac{\sqrt{\pi} \tau}{\alpha^{1/4} \epsilon_{mmin}^{1/4}} = S_0 (m-1) \frac{\sqrt{\pi} \tau}{\alpha^{1/4} \epsilon_{mmin}^{1/4}}. \quad (13)$$

Итак, формула (13) дает связь между интенсивностью мишени и средней мощностью реактора ( $P \approx S_0 / \beta$ ), при которой обеспечивается компенсация разброса энергии импульсов мощности в  $m$  раз, который имел бы место при отсутствии инжектора.

Следует отметить, что причиной разброса  $E_R$  является разброс  $\epsilon_m$  от  $\epsilon_{m\min}$  до  $\epsilon_{m\max}$ . В качестве  $\epsilon_{m\max}$  принято значение  $\epsilon_m = \epsilon_{m0}$ , при котором реактор без инжектора работал бы в равновесном режиме. При работе с инжектором изначально устанавливается надкритичность  $\epsilon_{m\min} < \epsilon_{m\max} = \epsilon_{m0}$ .

В качестве примера на рис. 4 показаны зависимости средней мощности реактора с параметрами ИБР-2 от интеграла интенсивности вольфрамовой мишени при различных кратностях  $m$  разброса энергии импульсов в чисто реакторном режиме, равных 3, 2 и 1,5. Рис. 4 показывает, что мощный реактор может регулироваться инжектором относительно малой мощности.

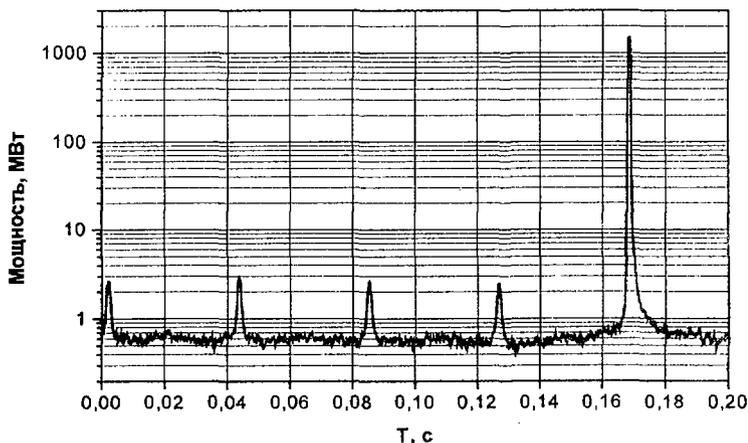


**Рис. 4.** Зависимость средней мощности реактора с параметрами ИБР-2  $\bar{P}$  (МВт) от интеграла интенсивности вольфрамовой мишени  $I$  (нейтр.) при различных кратностях  $m$  разброса энергии импульсов в чисто реакторном режиме. Точки ° соответствуют линейному ускорителю ЛУЭ-40 (35 МэВ, 0,35 А в импульсе, ширина импульса 2 мкс, интеграл  $I = 5 \cdot 10^{10}$  нейтр.)

### 3. Формирование периодических пачек импульсов мощности

Модулятор реактивности состоит из основного подвижного отражателя (ОПО), вращающегося со скоростью 1500 об/мин, и дополнительного подвижного отражателя (ДПО). В штатном реакторном режиме (первый режим работы модулятора) ДПО вращается со скоростью 300 об/мин. Импульсы мощности развиваются при прохождении мимо активной зоны реактора одновременно ОПО и ДПО и имеют

частоту 5 имп/с, т.е. период 0,2 с. Помимо этих основных импульсов мощности при прохождении мимо активной зоны только ОПО развиваются побочные импульсы. Однако их амплитуда на три порядка меньше амплитуды основных импульсов (рис. 5). Этот режим при заданной средней мощности  $\bar{P}$  реактора характеризуется наибольшей энергией импульсов мощности  $E_{Rmax}$ . При работе реактора с заторможенным ДПО (второй режим) частота импульсов мощности увеличивается в 5 раз (25 имп/с), соответственно, энергия импульсов уменьшается в 5 раз.



**Рис. 5.** Усредненная форма измеренного фона между импульсами мощности реактора ИБР-2. Средняя мощность 2 МВт

Если флуктуации реактивности и вызванный ими разброс энергии импульсов мощности не являются существенными, то с помощью инжектора можно обеспечить такой режим, при котором реактор будет генерировать импульсы мощности в виде периодических пачек. Импульсы в пачках формируются благодаря инжектированию электронов в мишень. Между пачками инжектирование не производится. При этом импульсам и в пачках, и в промежутках между ними соответствует надкритическое состояние реактора, но с реактивностью меньшей равновесного значения.

В первом режиме работы модулятора реактивности (частота повторения импульсов равна 5 1/с) каждая пачка будет состоять из  $N_R$  импульсов с интервалами между ними 0,2 с и с той же наибольшей допустимой энергией, что и в штатном периодическом режиме. Из условия безопасности ограничивается не только средняя мощность реактора, но и энергия импульса мощности. Поэтому средняя мощность реактора при формировании пачек импульсов будет меньше номинальной средней мощности.

При втором режиме работы модулятора (частота повторения импульсов равна 25 1/с) можно с помощью инжектора формировать периодические пачки импульсов при сохранении номинальной средней мощности реактора. В этом случае импульсы мощности в пачках с наибольшей допустимой энергией следуют с интервалом не 0,2 с, а 0,04 с. Между этими пачками мощных импульсов следуют импульсы с тем же интервалом 0,04 с, но с энергией в несколько раз меньшей, чем энергия импульсов в пачках.

При оценочных расчетах можно считать, что энергия импульсов в интервалах между пачками  $E_R$  постоянна, поскольку она в несколько раз (в  $m$  раз) меньше, чем энергия импульсов в пачках  $E$  (рис. 6):

$$E_R = E/m. \quad (14)$$

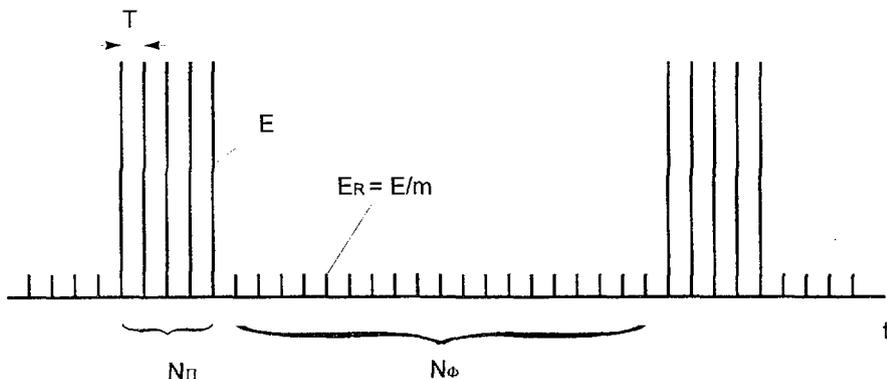


Рис. 6. Периодические пачки импульсов мощности

Из условия сохранения в этом режиме той же средней мощности  $P$ , что и в штатном реакторном режиме, вытекает следующее соотношение:

$$\frac{N_{\phi}}{N_{\pi}} = \left( \frac{E}{PT} - 1 \right) / \left( 1 - \frac{E}{PTm} \right), \quad (15)$$

где  $N_{\pi}, N_{\phi}$  - соответственно количество импульсов мощности в пачке и между пачками,  $T$  - интервал между импульсами (для ИБР-2  $T=0,04$  с). В относительных единицах  $P=1$  и  $E=0,2$  с.

Отношение энергии, выделяемой в пачке  $E_{\pi}$ , к энергии фона  $E_{\phi}$ , выделяемой между пачками, а также доля энергии фона от полной энергии соответственно равны

$$\frac{E_{\pi}}{E_{\phi}} = \frac{m}{N_{\phi}/N_{\pi}}, \quad \frac{E_{\phi}}{E_{\pi} + E_{\phi}} = \frac{N_{\phi}/N_{\pi}}{m + N_{\phi}/N_{\pi}}. \quad (16)$$

Если бы реактор работал без инжектора в равновесном режиме с энергией импульсов  $E_R$  и периодом  $T=0,04$  с (т.е. с частотой 25 имп/с), то выполнялось бы соотношение

$$\frac{E_R}{S_0} = 1 / \left( \beta \sum_i \frac{\mu_i \lambda_i}{\exp(T \lambda_i) - 1} \right), \quad (17)$$

равное для ИБР-2 18,6 с. Этому значению  $E_R/S_0$  соответствовала бы надкритичность  $\epsilon_{m0}=0,81 \cdot 10^{-3}$ . В режиме же работы реактора совместно с инжектором надкритичность должна быть выбрана меньше, чем  $\epsilon_{m0}$ . При этом, для того чтобы режим с периодическими пачками (рис. 6) был равновесным, должно выполняться условие

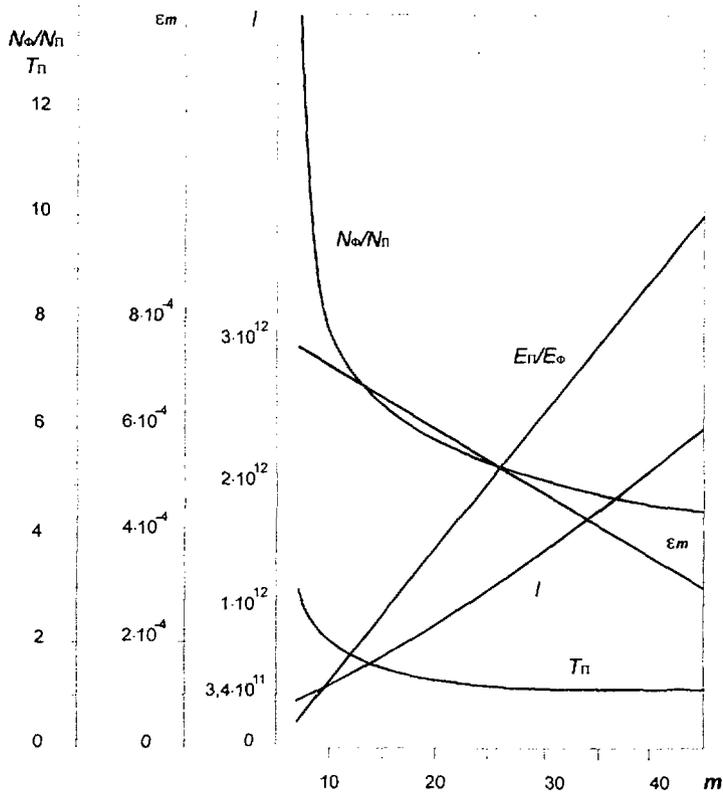
$$\frac{E_{lmax}}{S_0} \approx 1 / \left\{ \beta \left( \frac{1}{m} \sum_i \frac{\mu_i \lambda_i}{\exp(T \lambda_i) - 1} + N_{\Pi} \left( 1 - \frac{1}{m} \right) \sum_i \frac{\mu_i \lambda_i}{\exp(T_n \lambda_i) - 1} \right) \right\}, \quad (18)$$

где период пачек

$$T_{\Pi} = TN_{\Pi} (1 + N_{\Phi} / N_{\Pi}) \quad (19)$$

Совместное решение уравнений (14), (15), (17) – (19) при заданных значениях  $N_{\Pi}$  и  $m$  позволяет выбрать необходимое значение надкритичности  $\epsilon_m < \epsilon_{m0}$  и в соответствии с уравнением (8) определить значение интеграла мишени  $I$ , который необходим для осуществления выбранного режима пачек.

В качестве примера рассмотрен режим с пятью импульсами в пачке ( $N_{\Pi}=5$ ). При средней мощности ИБР-2 1,5 МВт подогрев топлива за один импульс в наиболее напряженном месте активной зоны составляет по оценкам около 19°C. При  $N_{\Pi}=5$  подогрев с учетом остывания между импульсами составит около 80° С, что вполне допустимо из соображений безопасности. На рис. 7 показаны зависимости параметров,  $I, \epsilon_m, T_{\Pi}, N_{\Phi} / N_{\Pi}, E_{\Pi} / E_{\Phi}$  от кратности  $m$ . Из рис. 7 следует, что для создания режима периодических пачек импульсов требуется достаточно мощный ускоритель. Так, например, при  $m=7$  требуемый интеграл мишени  $I=3,36 \cdot 10^{11}$  нейтр. не обеспечивается ни ускорителем ЛУЭ-40 (интеграл его вольфрамовой мишени  $I=0,5 \cdot 10^{11}$  нейтр.), ни ускорителем по программе ИРЕН с проектными параметрами 212 МэВ, 1,5 А в импульсе при ширине импульса 0,25 мкс (интеграл его вольфрамовой мишени  $I=1,6 \cdot 10^{11}$  нейтр., т.е. в два раза меньше требуемого). Однако достигнуть требуемого уровня  $I$  с помощью последнего ускорителя можно при замене вольфрамовой мишени делящейся мишенью из урана-235.



**Рис. 7.** Зависимость интеграла мишени  $I$  (нейтр.), надкритичности  $\epsilon_m$ , периода пачек  $T_\pi$  (с), кратности длительности фона и пачки  $N_\phi/N_\pi$  и кратностями энергии, выделяемой в пачке и между пачками,  $E_\pi/E_\phi$  от кратности энергии импульса в пачке и между пачками  $m$

## Заключение

С помощью инъекции электронных импульсов в активную зону импульсного реактора периодического действия можно осуществить особые режимы работы: режим регулирования энергии каждого импульса мощности и режим периодических пачек импульсов мощности.

В режиме регулирования импульсов регулирующим параметром является момент инъекции электронов в мишень, расположенную в активной зоне реактора.

Поскольку с помощью модулятора реактивности реактор на короткое время выводится в надкритическое состояние на мгновенных нейтронах, оказывается возможным регулировать мощный реактор инжектором относительно малой мощности.

Так как при работе с инжектором надкритичность реактора ниже равновесного значения, то при отключении инжектора мощность реактора падает, т.е. инжектор, помимо функции автоматического регулятора, выполняет также функцию дополнительной аварийной защиты.

Для формирования периодических пачек импульсов мощности требуется более мощный инжектор, чем для режима регулирования, или замена вольфрамовой мишени мишенью из делящегося материала.

## Литература

1. Попов А.К. Регулирование энергии импульса быстрого реактора посредством инжектора. Атомная энергия, 1969, т. 27, вып. 6, с. 554-556.

Рукопись поступила в издательский отдел  
14 августа 2000 года.