

6213

ЭКЗ. ЧИТ. ЗАЛА

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

13 - 6213



Б.Н.Бунин, В.М.Левин, С.К.Николаев,  
В.Т.Руденко, А.Н.Семенов, В.Л.Смирнов,  
А.С.Торопов, В.К.Хохлов

ПУСК РЕАКТОРА ИБР-30  
В РЕЖИМЕ ИМПУЛЬСНОГО БУСТЕРА

ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ

1972

13 - 6213

Б.Н.Бунин, В.М.Левин, С.К.Николаев,  
В.Т.Руденко, А.Н.Семенов, В.Л.Смирнов,  
А.С.Торопов, В.К.Хохлов

ПУСК РЕАКТОРА ИБР-30  
В РЕЖИМЕ ИМПУЛЬСНОГО БУСТЕРА

**Научно-техническая  
библиотека  
ОИЯИ**

Бунин Б.Н., Левин В.М., Николаев С.К.,  
Руденко В.Т., Семенов А.Н., Смирнов В.Л.,  
Торопов А.С., Хохлов В.К.

13-6213

#### Пуск реактора ИБР-30 в режиме импульсного бустера

В марте 1970 г. в Лаборатории нейтронной физики произведен пуск реактора ИБР-30 в режиме размножения нейтронов, генерируемых в плутониевой мишени импульсным электронным пучком линейного ускорителя (режим импульсного бустера). Получена средняя мощность

9 квт при полуширине нейтронной вспышки 3 мксек и частоте следования импульсов 100 гц.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований  
Дубна, 1972

Использование импульсного реактора как размножителя нейтронов, генерируемых в мишени электронного ускорителя-микротрона, было осуществлено в Лаборатории нейтронной физики в 1964 г. В этом режиме длительность нейтронной вспышки снижена в 15+20 раз по сравнению с импульсом мощности реактора и соответственно улучшено энергетическое разрешение нейтронов по методу времени пролета<sup>1,2,3/</sup>. Для увеличения средней мощности одновременно с реконструкцией импульсного реактора<sup>3/</sup> было решено заменить и инжектор. В качестве инжектора для реактора ИБР-30 выбран линейный ускоритель электронов на бегущей волне. Ускорители такого типа, разработанные в НИИЭФА<sup>4/</sup>, обладают хорошими эксплуатационными характеристиками и при энергии электронов 35-50 Мэв позволяют получать мощность электронного пучка на порядок выше, чем в микротроне. Пуск реактора ИБР-30 в режиме размножения нейтронов был осуществлен в марте 1970 г.

Схема установки показана на рис. 1.

#### 1. Линейный ускоритель электронов

Электронная пушка ускорителя (1) генерирует электронный импульс длительностью 1,7 мксек, максимальный импульсный ток 0,3 а. Ускоряющая система состоит из двух секций (4,7) и представляет собой диафрагмированный волновод с фазовым сдвигом на период структуры  $\pi/2$ . Захват электронов в режим ускорения и их группировка в сгустки с фазовой протяженностью  $\sim 30^\circ$  осуществляются на начальном участке 1-й секции длиной 0,54 м. Ускоряющая часть 1-й секции и вторая секция имеют по-

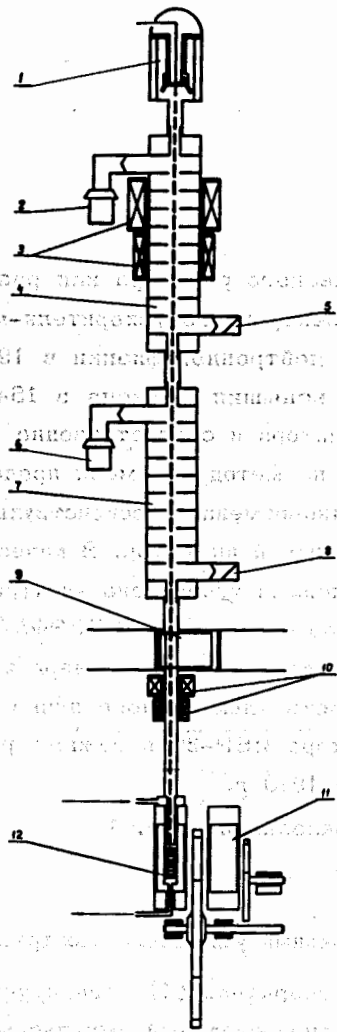


Рис. 1. Схема ИБР-30 с инжектором - линейным ускорителем электронов.  
 1 - электронная пушка; 2, 6 - клистроны; 3 - фокусирующие соленоиды;  
 4, 7 - диафрагмированные волноводы секций №1 и №2, 5, 8 - водяные на-  
 грузки; 9 - вакуумный защитный шибер; 10 - квадрупольные линзы;  
 11 - активная зона ИБР-30; 12 - нейтронпроизводящая мишень.

стоянный импеданс. Параметр нагружения  $\frac{\sigma}{\lambda} = 0,14$ , где  $\sigma$  - радиус от-  
 верстия в нагружающем диске,  $\lambda = 10,7$  см - рабочая длина волны. По  
 длине 1-й секции включены 2 пары ячеек с четырьмя радиальными разре-  
 зами/5/. Благодаря этому длина однородного волновода для гибридной вол-  
 ны  $EH_{11}$ , ограничивающей ускорение больших импульсных токов, сокраща-  
 ется в 3 раза. Вторая ускоряющая секция длиной 3 м полностью изготов-  
 лена из ячеек с радиальными разрезами, что гарантирует ускорение в ней  
 импульсных токов не менее 0,5 а без возникновения эффекта укорачива-  
 ния импульса тока/6/.

Семейство нагрузочных характеристик ускорителя в зависимости от  
 импульсного значения высокочастотной мощности, поступающей на вход  
 секций №1 и №2 ( $P_1 + P_2$ ), описывается формулой

$$E_0 - E = BI,$$

где

$$E_0 = A \sqrt{P_1 + P_2},$$

$I$  - импульсное значение тока,  $E$  - энергия электронов,  $E_0$  - энергия  
 электронов при  $I \rightarrow 0$ ,  $A$  и  $B$  - коэффициенты, зависящие от параметров  
 тракта ускорения. Приведенная на рис. 2 нагрузочная характеристика уско-  
 рителя получена сложением экспериментальной характеристики секции №1  
 и расчетной характеристики секции №2.

В связи с рядом ограничений в системе электропитания клистронов  
 при частоте импульсов 100 герц максимальная импульсная высокочастот-  
 ная мощность, которая может быть получена с клистрона первой секции,  
 равна 10 Мвт, а с клистрона второй секции - 5 Мвт. При пуске уско-  
 рителя средняя энергия электронов оценивалась по кривой поглощения, сня-  
 той с помощью цилиндра Фарадея, установленного на выходе второй сек-  
 ции. Электронный импульс имеет форму, близкую к прямоугольной, дли-  
 тельность - 1,6 мксек.

При энергии электронов 32 Мэв ток в импульсе составил 0,16 а.  
 Некоторое снижение параметров полученного электронного пучка по срав-  
 нению с нагрузочной характеристикой, по-видимому, связано с недоста-  
 точной стабильностью частоты магнетронного генератора возбуждения

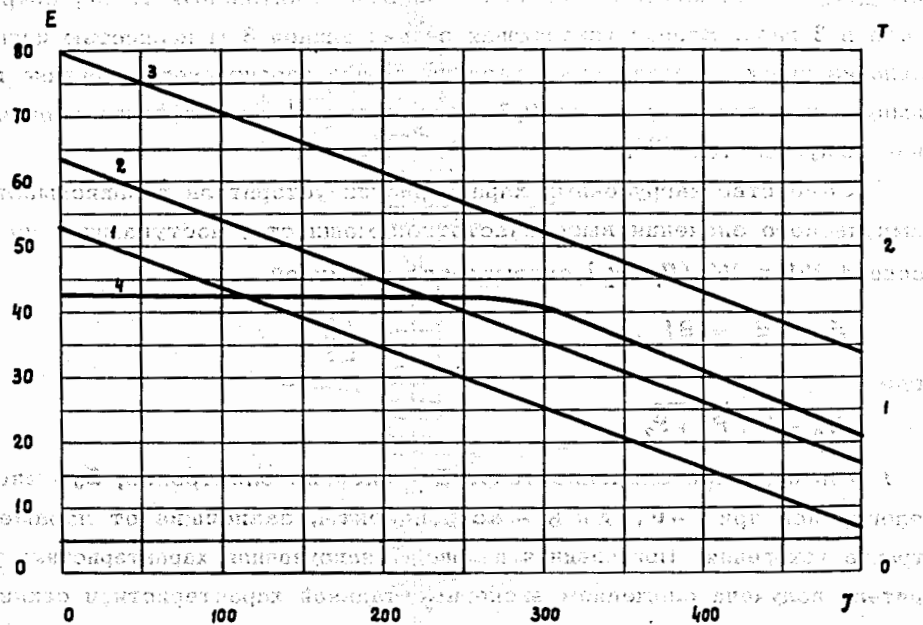


Рис. 2. Нагрузочные характеристики линейного ускорителя. 1 - импульсная с.в.ч. мощность (10 + 5) Мвт; 2 - (10 + 10) Мвт; 3 - (16 + 16) Мвт; 4 - длительность электронного импульса ( $T$ , мксек),  $E$  - энергия электронов, Мэв;  $I$  - импульсный ток электронов, ма.

клизотронов. Диаметр электронного пучка, падающего на мишень, не превышает 5 мм.

Радиальная фокусировка электронного пучка обеспечивается системой состоящей из двух соленоидов секции №1 (3). Высокочастотная мощность в ускоряющие секции подается от двух клизотронных усилителей КИУ-12АМ (2,6) через съемные согласователи и волноводный тракт. Электрическая прочность волноводного тракта обеспечивается наполнением его азотом под давлением 6 атм. На входе и выходе ускорителя для разделения вакуумного и газонаполненного объемов установлены специальные керамические окна, прозрачные для рабочего диапазона частот. Система контроля с.в.ч. мощности обеспечивает возможность наблюдения параметров импульса мощности и защиты элементов ускорителя при появлении отраженной волны. Клизотроны возбуждаются магнетронным генератором, стабильность частоты которого  $\sim 5 \cdot 10^{-5}$ . Рабочий вакуум в объеме ускорителя не хуже  $5 \cdot 10^{-7}$  торр. Система вакуумных вентилях дает возможность вскрывать отдельные вакуумные объемы без нарушения вакуума всей системы. Электроны поступают на мишень по электропроводу длиной 8 м. На электропроводе установлены две квадрупольные линзы (10) для фокусировки пучка и корректирующие катушки.

Выход нейтронов из мишени зависит от ее материала и энергии электронов/7/, а ценность генерируемых нейтронов определяется их энергетическим спектром/8/ и расположением мишени в активной зоне. Для тяжелых неделящихся элементов (свинец, вольфрам) выход нейтронов в два раза ниже, а для урана-235 и плутония - в 1,5 раза выше, чем для урана-238/9/. Малый объем и резко выраженная неравномерность энерговыделения по высоте мишени делают задачу ее охлаждения достаточно сложной/9,10,11/.

Мишень линейного ускорителя изготовлена из тугоплавких соединений плутония/12/ и помещена в центральную часть активной зоны реактора. Охлаждение мишени производится газообразным гелием.

#### Параметры установки

Основные параметры системы - средняя мощность и длительность вспышки зависят от размножения реактора. С увеличением размножения растет средняя мощность, но одновременно импульс становится шире.

Качество ( $\eta$ ) импульсного источника определяется отношением удельной полезной мощности к квадрату эффективной длительности вспышки.

$$\eta = \frac{W}{V \theta^2} . \quad (1)$$

Зависимость одиночной вспышки бустера от времени и параметров реактора и электронного импульса может быть получена решением точечного кинетического уравнения /2,13/:

$$\frac{dW(t)}{dt} = \frac{W(t) \epsilon(t)}{\tau} + \frac{S}{\tau \nu} , \quad (2)$$

где  $W(t)$  - мгновенное значение мощности,  $\epsilon(t)$  - зависимость реактивности реактора от времени,  $\tau$  - время жизни мгновенных нейтронов в активной зоне,  $\nu$  - число нейтронов на акт деления,  $S$  - мощность источника нейтронов. При  $\epsilon(t) = \epsilon_0$  решение уравнения имеет вид:

$$W_1(t) = \frac{S}{\nu \epsilon_0} \left( \exp \frac{\epsilon_0}{\tau} t - 1 \right) , \quad 0 \leq t \leq T . \quad (3)$$

После прекращения электронной вспышки (ее длительность равна  $T$ ) мощность достигает максимального уровня

$$W_{max} = \frac{S}{\nu \epsilon_0} \left( \exp \frac{\epsilon_0}{\tau} T - 1 \right) , \quad (4)$$

а затем происходит ее спад (обычно  $\epsilon_0 < 0$ ):

$$W_2(t) = W_{max} \left[ \exp \frac{\epsilon_0}{\tau} (t - T) \right] , \quad t \geq T . \quad (5)$$

Энергия импульса

$$E = - \frac{S}{\nu \epsilon_0} T , \quad (6)$$

а эффективная длительность вспышки

$$\theta = \frac{E}{W_{max}} = \frac{T}{\exp \frac{\epsilon_0}{\tau} T - 1} . \quad (7)$$

Длительность импульса на половине высоты

$$\theta_{1/2} T = \frac{\tau}{\epsilon_0} \ln \left( \exp \frac{\epsilon_0}{\tau} T + 1 \right). \quad (8)$$

Для определения доли средней энергии, выделяемой в импульсах, можно записать уравнение баланса энергии за один цикл работы в виде:

$$E_p = E_{и} + E_{\phi} + E_c, \quad (9)$$

здесь  $E_{и}$ ,  $E_{\phi}$ ,  $E_c$  - энергия импульса и фона. Тогда

$$\frac{E_{и}}{E_p} = \left( 1 - \frac{E_{\phi} + E_c}{E_p} \right). \quad (10)$$

На рис. 3 приведены рассчитанные для ИБР-30 с инжектором зависимости

$\frac{E_{и}}{E_{\phi}}$  и доля энергии фона от уровня подкритичности реактора. Мощность источника нейтронов из мишени ускорителя

$$S = \frac{1}{1,6} 10^{19} I K(E), \quad (11)$$

где  $K(E)$  - коэффициент генерации нейтронов в мишени<sup>17/</sup>. Принимая, что ценность нейтронов мишени при ее центральном расположении в активной зоне равна единице, найдем из уравнения баланса энергии (10) среднюю мощность бустера:

$$W = \frac{0,0726 n I T K(E)}{\epsilon_0 (1 - \alpha)}, \quad (12)$$

где  $\alpha = \frac{E_{\phi} + E_c}{E_p}$  - доля энергии, выделяющаяся между вспышками.

Используя соотношения (11) и (12), нагрузочную характеристику ускорителя (1 на рис. 2) и коэффициент генерации нейтронов, мы рассчитали зависимости ряда параметров бустера (среднюю мощность, источник



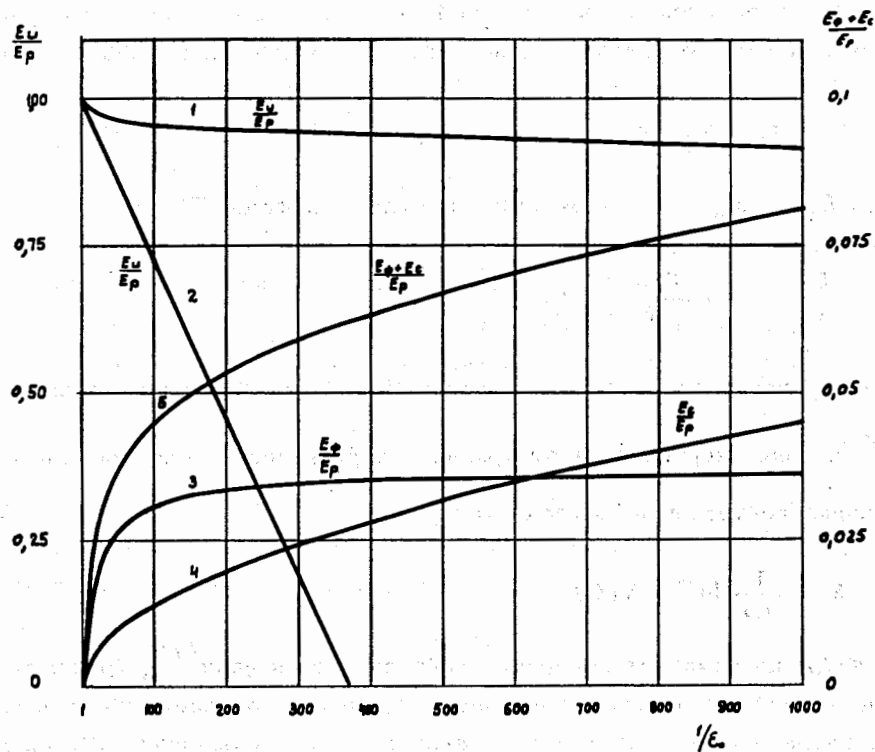


Рис. 3. Соотношение между полезной ( $E_u$ ) и фоновой ( $E_f, E_c$ ) энергиями бустера в зависимости от умножения ( $1/\epsilon_0$ ).  $E_p$  - энергия бустера за один цикл работы, 1 - доля энергии, выделяющаяся в импульсе ( $\frac{E_u}{E_p}$ ) доля энергии фона: 3 -  $\frac{E_f}{E_p}$ , 4 -  $\frac{E_c}{E_p}$ ; 5 -  $\frac{E_f+E_c}{E_p}$ ; 2 -  $\frac{E_u}{E_p}$  в стационарном реакторе.

и др.) от тока ускоренных электронов. Максимальная мощность в режиме импульсного бустера при размножении 200 составляет 15,6 кВт и достигается при импульсном токе ускоренных электронов 0,2а.

Подставив в уравнение (1) долю средней мощности (12) бустера, которая выделяется в импульсах, и значение  $\theta$  (7), получим

$$\eta = \frac{0,0726 n I K(E) (1 - \exp \frac{\epsilon_0}{T})^2}{V \epsilon_0 T} \quad (1')$$

Здесь  $V$  - объем активной зоны реактора. Зависимость качества бустера от  $\epsilon_0$  показана на рис. 4. При длительности электронного импульса 1,6мксек качество бустера достигает максимального значения при размножении 80.

Поведение мощности бустера при  $\epsilon_0 \rightarrow 0$  можно определить решением кинетического уравнения (2) с учетом зависимости реактивности реактора от времени. В области  $0 \leq t \leq T$  зависимость мощности от времени остается без изменений (3), но максимальное значение амплитуды импульса (4) стремится к пределу

$$\lim_{\epsilon_0 \rightarrow 0} \frac{W_{max}}{S/\nu} = \frac{T}{r} \quad (13)$$

В этой области изменения реактивности реактора контроль за мощностью бустера по возрастанию амплитуды импульса становится неэффективным.

В формуле спада импульса (5) появляется множитель  $\exp[-\frac{\alpha v^2(t^3 - T^3)}{3r}]$ , сильно зависящий от времени. Длительность вспышки на половине высоты при  $\epsilon_0 = 0$  стремится к предельному значению (для малых  $T$ )

$$\lim_{\epsilon_0 \rightarrow 0} \theta_{1/2} = -\frac{T}{2} + (T^3 - \frac{3r}{\alpha v^2} \ln 0,5)^{1/3} \approx 1,28 \left(\frac{r}{\alpha v^2}\right)^{1/3} \quad (14)$$

Здесь  $v$  - скорость основной подвижной зоны реактора,  $\alpha$  - параметр параболы, которой описывается реактивность реактора при движении основной подвижной зоны (ОПЗ).



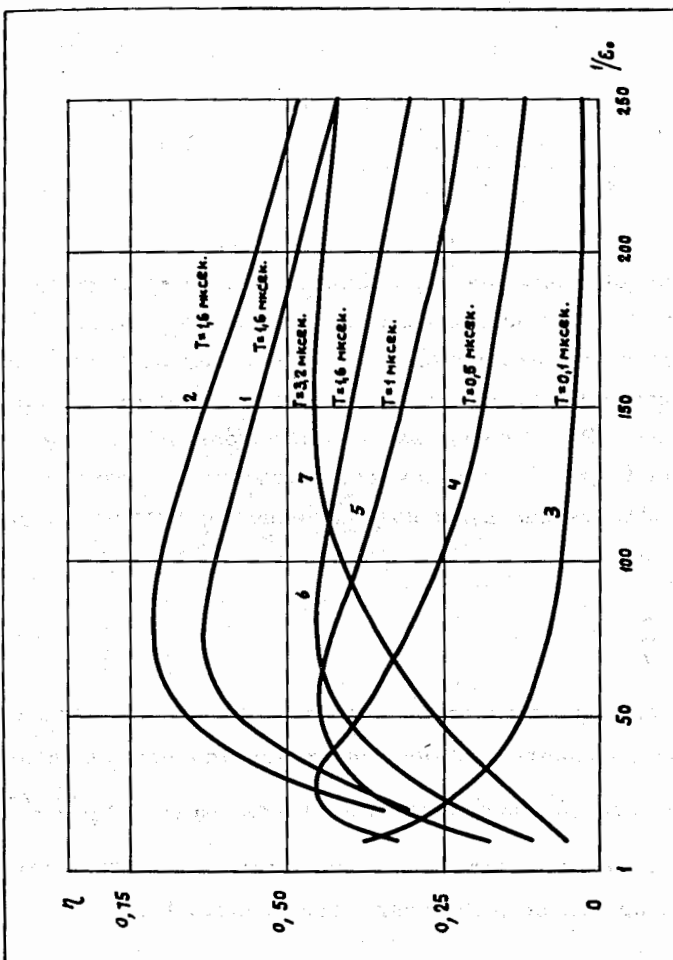


Рис. 4. Качество бустера,  $1/\epsilon_0$  - размножение реактора;  $T$  - длительность электронного импульса;  $\eta$  - качество бустера квт/л.мксек<sup>2</sup>, 1 - частота импульсов мощности 50 гц, уровень с.в.ч. мощности: 16 Мвт в каждую секцию, 2 - частота импульсов мощности 100 гц, уровень с.в.ч. мощности: 10 Мвт в каждую секцию, 3,4,5,6,7 - частота импульсов 100 гц, уровень с.в.ч. мощности: 10 Мвт в секцию №1 и 5 Мвт - в секцию №2.

Рост энергии вспышки происходит за счет возрастания ее длительности, и при  $\epsilon_0 = 0$  (мгновенная критичность реактора) средняя мощность ( $W$ ) бустера становится равной

$$W = E_n = \frac{1,28 S T n}{a^{1/3} \nu^{2/3} \tau^{2/3} \nu} \quad (15)$$

где

$$E \approx \theta_{1/2} W_{max}$$

$n$  - частота импульсов. С увеличением размножения длительность вспышки бустера растет, но она остается ниже длительности вспышки реактора, работающего с такой же частотой. Это объясняется тем, что передний фронт импульса формируется электронной вспышкой ускорителя, а в гашении вспышки с ростом размножения все более существенную роль играет снижение реактивности реактора.

Таким образом, в режиме работы ИБР-30 с инжектором можно выделить несколько характерных областей. В области низких размножений (до 20) модуляция реактивности слабо влияет на фон между вспышками. Минимальный уровень размножения, который можно получить на ИБР-30, составляет 15-20 (ОПЗ и органы регулирования реактора выведены из неподвижной зоны). Этому размножению соответствует средняя мощность бустера 1 квт и полуширина вспышки 1,6 мксек.

Использование средних размножений (20-500) требует модуляции реактивности для снижения фона. В этой области пульсация реактивности еще не влияет на форму вспышки.

В области высоких размножений (от 500 до мгновенной критичности) длительность импульса продолжает увеличиваться с ростом умножения. В точке мгновенной критичности длительность импульса на половине высоты составляет 65 мксек, а средняя мощность 30 квт достигается при частоте следования вспышек 20 гц.

Схема работы ИБР-30 с инжектором приведена на рис. 5. На верхнем графике показано изменение реактивности реактора ИБР-30 за один оборот диска основной подвижной зоны (на диске 2 зоны). Реактивность реактора от некоторого фоновых значения ( $\epsilon_\phi$ ) повышается в момент времени  $t = 0$  до максимального уровня ( $\epsilon_0$ ), равного ( $\epsilon_\phi - \epsilon_{опз}$ ), где  $\epsilon_{опз}$  - реактивность основной подвижной зоны реактора,  $\epsilon = 0$  соответствует уровню критичности реактора по мгновенным нейтронам. Реактивности основных подвижных зон (ОПЗ №1 и ОПЗ №2) в реакторе ИБР-30 неодинаковы. По измерениям, эта разность ( $\Delta \epsilon_2$ ) не превышает  $2,3 \cdot 10^{-5}$ . Электронные импульсы линейного ускорителя синхронизованы с вращением основных подвижных зон реактора. Опорные импульсы, определяющие момент старта электронной вспышки, формируются двумя датчиками по числу подвижных зон реактора. Из-за неточности установки датчиков интервал времени между стартовым импульсом и максимальной реактивностью ОПЗ №1 не равен этому интервалу для ОПЗ №2. Разница составляет  $\phi = 5$  мсек. Так как опорные импульсы, включающие пучок ускорителя, одновременно запускают аппаратуру измерительного центра, неточность установки датчиков не вызывает эффективного размазывания импульсов мощности при их статистической регистрации. Но старт импульса ускорителя от датчика ОПЗ №2 сдвинут по отношению к максимуму ее реактивности. За время 5 мсек диск ОПЗ поворачивается, и реактивность реактора снижается от своего максимального значения на величину  $\Delta \epsilon_1 = a v^2 \phi^2$ . Эта величина при частоте вращения диска ОПЗ 50 1/сек равна  $\sim 1 \cdot 10^{-6}$ .

На среднем графике показана зависимость мощности реактора от времени  $W(t)$ . В промежутке между импульсами мощность реактора  $W$  определяется размножением запаздывающих нейтронов в неподвижной зоне реактора. Подкритичность реактора в это время ( $\epsilon_\phi$ ) равна  $5,5 \cdot 10^{-2}$ , а его размножение  $\sim 18$ . По мере совмещения основной подвижной зоны с неподвижной реактивность реактора и его фоновая мощность увеличиваются. В момент старта электронного пучка на этом фоне развивается рабочий импульс, форма которого описывается уравнением (2) и (4). После снижения реактивности реактора его мощность снова падает.

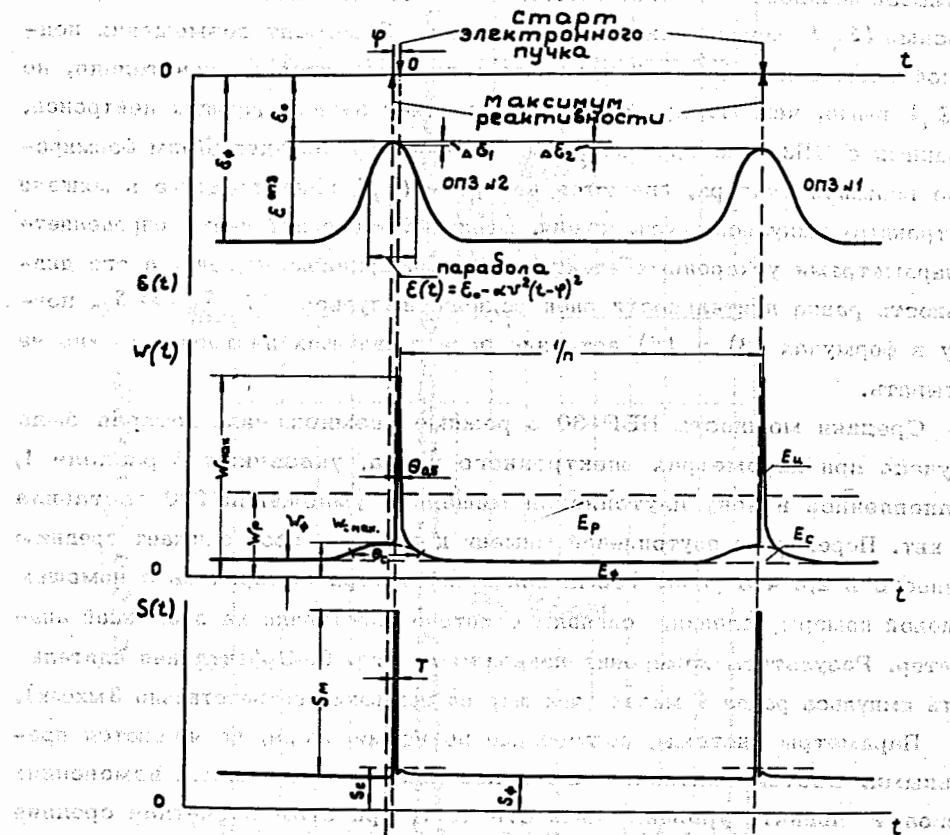


Рис. 5. Схема работы импульсного бустера.

На нижнем графике приведено изменение во времени источника нейтронов,  $S(t)$ . Между рабочими импульсами источник запаздывающих нейтронов определяется средней мощностью ( $W_p$ ) реактора. Так как частота импульсов мощности высокая (обычно  $n = 100$  гц), источник между импульсами ( $S_{\phi}$ ) можно считать постоянным. В момент совмещения подвижной зоны с неподвижной источник также меняется незначительно, но он ( $S_c$ ) выше, чем между вспышками, за счет запаздывающих нейтронов, связанных с ОПЗ реактора. Основным источником, определяющим формирование вспышки бустера, являются нейтроны ( $S_M$ ), генерируемые в мишени электронным импульсом ускорителя. Величина этого источника определяется параметрами ускоренных электронов и материалом мишени, а его длительность равна длительности электронного импульса ( $T$ ).  $S_M \gg S_{\phi}$ , поэтому в формулах (3) и (5) источник запаздывающих нейтронов можно не учитывать.

Средняя мощность ИБР-30 в режиме размножения, которая была получена при параметрах электронного пучка, указанных в разделе 1, установленной в зону плутониевой мишени и умножении 200 составила ~9 квт. Переход от плутониевой мишени к вольфрамовой снижает среднюю мощность в 2,5 + 3 раза. Форма вспышки бустера измерялась с помощью ториевой камеры деления, сигналы с которой поступали на временной анализатор. Результаты измерения показаны на рис. 6. Эффективная длительность импульса равна 4 мксек (полуширина вспышки соответственно 3 мксек).

Параметры системы, полученные во время пуска, не являются предельными. Система питания клистронов при незначительных изменениях позволяет поднять уровень мощности с.в.ч. при этом расчетная средняя мощность может быть увеличена до 25 квт при размножении 200. В необходимых случаях возможна работа при частоте 50 гц с одновременным увеличением импульсной с.в.ч. мощности до 16 Мвт в каждую секцию для частичной компенсации снижения средней мощности. При этом расчетная средняя мощность бустера составит 21 квт.

В заключение считаем своим приятным долгом поблагодарить И.М. Франка и Ф.Л. Шапиро за интерес к работе и полезные обсуждения, В.П. Попова, В.П. Воронкина, Н.М. Уткина, В.К. Ушанова, Н.Л. Владимиров, Г.В. Ветохина, Н.А. Мацуева за помощь в монтаже и наладке ряда систем инжектора.

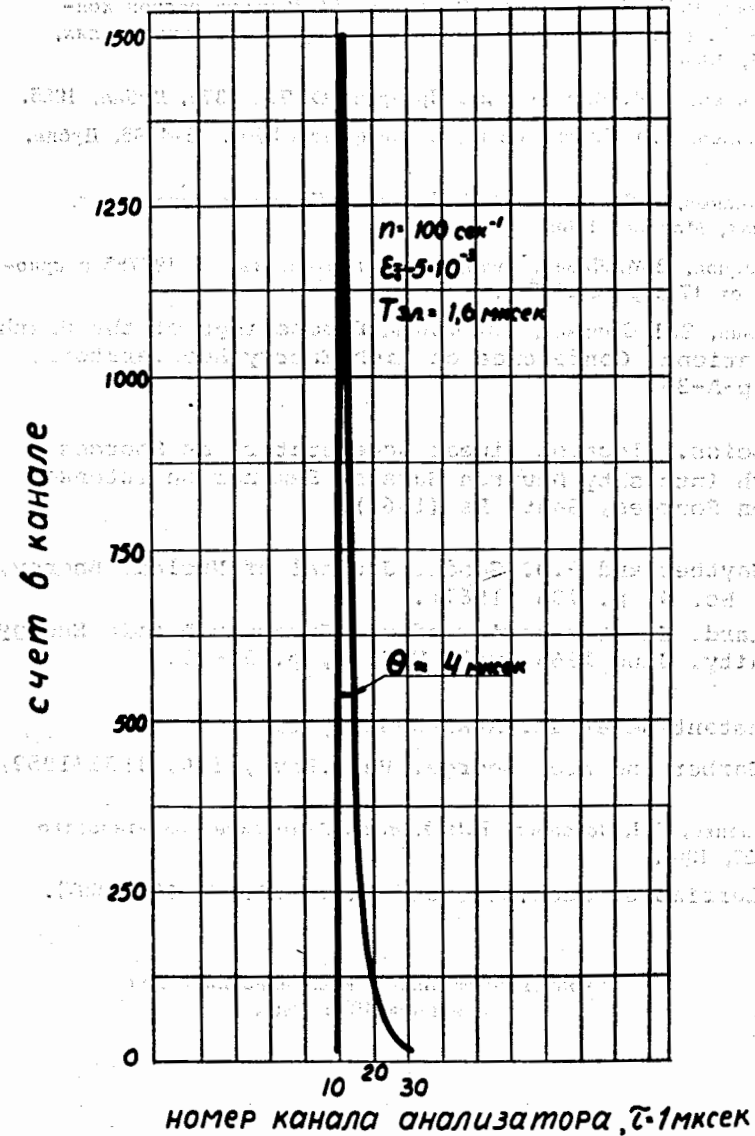


Рис. 6. Форма нейтронной вспышки бустера.

## Л и т е р а т у р а

1. Б.Н. Бунин, И.М. Матора и др. Доклад на III Международной конференции ООН по использованию атомной энергии в мирных целях, 28/р/324, 1964.
2. В.Д. Ананьев, И.М. Матора и др. Препринт ОИЯИ, 2372, Дубна, 1965.
3. В.Д. Ананьев, Д.И. Блохинцев и др. Препринт ОИЯИ, 13-4395, Дубна, 1969.
4. О.А. Вальднер, А.Д. Власов, А.В. Шальнов. Линейные ускорители. Атомиздат, Москва, 1969.
5. В.Л. Смирнов, В.М. Левин. Авторское свидетельство № 197785 с приоритетом от 17 апреля 1967 г.
6. В.М. Левин, В.Л. Смирнов, Л.П. Фомин. Proceedings of the Sixth International Conference on High Energy Accelerators, 1967, p-A-39.
7. J.E. Leiss. Electron Linear Accelerators as Sources of High Intensity Neutron Bursts. Seminar on Intense Neutron Sources, Santa Fe (1966).
8. D.B. Gayther and P.D. Goode. Journal of Nuclear Energy, v. 21, No. 9, p. 733 (1967).
9. C. Allard. Euratom review of the European Atomic Energy Community. June 1968, vol. VII, 2, p. 34-41.
10. C. Constantine et al. AERE-R-5205, 1967.
11. W.C. Barber and W.D. George. Phys.Rev., 116, 1551(1959).
12. В.Т. Руденко, Г.Н. Погодаев, Б.И. Куприн. Авторское свидетельство № 223222, 1968.
13. J.A. Larrimore. Nucl.Sci. and Eng., 29, 87-110 (1967).

Рукопись поступила в издательский отдел  
3 января 1972 года.