

2372

СФ. ЧИТ. ЗОЛН

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна



2372

ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ

В.Д.Ананьев, И.М.Матора, Г.Н.Погодаев,
В.Т.Руденко, Е.П.Шабалин,
Ф.Л.Шапиро, И.М.Франк

ИМПУЛЬСНЫЙ РЕАКТОР ЛНФ ОИЯИ И
ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ
ИМПУЛЬСНЫХ РЕАКТОРОВ
В НЕЙТРОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

1965

2372

В.Д.Ананьев, И.М.Матора, Г.Н.Погодаев,
В.Т.Руденко, Е.П.Шабалин,
Ф.Л.Шапиро, И.М.Франк

ИМПУЛЬСНЫЙ РЕАКТОР ЛНФ ОИЯИ И
ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ
ИМПУЛЬСНЫХ РЕАКТОРОВ
В НЕЙТРОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

**Научно-техническая
библиотека
ОИЯИ**

В в е д е н и е

Пять лет эксплуатации импульсного реактора на быстрых нейтронах показали его высокую надежность и безопасность^{/1/}. Он оказался удобным источником нейтронов для исследований с применением метода времени пролета. Были получены интересные результаты в экспериментах по изучению состояний атомных ядер, определению величины нейтронных сечений и изучению состояния конденсированных сред с помощью рассеяния нейтронов.

Однако растущие потребности в проведении более сложных и тонких экспериментов требуют более мощных, чем ИБР, источников нейтронов, позволяющих получать высокие угловые и энергетические разрешения. Таковы, например, эксперименты по изучению закономерностей рассеяния медленных нейтронов в жидкостях на очень малые углы порядка $2-5^\circ$ или по определению резонансных параметров реакции (σ , α). Во всех странах и организациях, занимающихся исследованиями с помощью нейтронов, отчетливо видно стремление к увеличению интенсивности установок.

В настоящей работе мы, во-первых, расскажем о режимах работы ИБРа при повышенной мощности и улучшенном разрешении, попутно обсудив некоторые перспективы дальнейшего улучшения характеристик ИБРа; во-вторых, рассмотрим возможности совершенствования импульсных реакторов периодического действия и опишем конкретный проект Евратома импульсного реактора SORA большой мощности; и, наконец, проведем общее сравнение экспериментальных возможностей на импульсных реакторах периодического действия с возможностями других импульсных источников нейтронов.

1. Режим работы ИБРа с микротроном

В настоящее время широкое распространение получило использование ускорителей (особенно линейных электронных ускорителей) в качестве импульсных источников нейтронов для исследований методом времени пролета. Преимущество ускорителей состоит, как известно, в возможности получения коротких импульсов, обеспечивающих большую разрешающую способность метода. Использование ускорителя в сочетании с подкритическим реактором представляется выгодным, т.к. умножение числа нейтронов в реак-

торе в известной мере эквивалентно увеличению тока в ускорителе в соответствующее число раз.

Однако практически возможности такого метода удавалось реализовать лишь в малой степени. Препятствием при значительном коэффициенте размножения является большой фон между импульсами, обусловленный размножением запаздывающих нейтронов.

В работе /1/ сообщалось о строящемся в Лаборатории нейтронной физики микротроне на 30 Мэв и предполагаемом использовании его в качестве инжектора нейтронов для импульсного реактора, находящегося в подкритическом состоянии.

В конце 1964 г. начата эксплуатация микротрона; совместно с реактором он проработал 250 часов /2/.

Малые габариты микротрона позволили установить его в имеющемся помещении над залом реактора. Схема расположения установки изображена на рис. 1. Электронный пучок фокусируется на урановую мишень, расположенную в канале внутри неподвижной части активной зоны реактора, и генерирует в ней фотонейтроны. Запуск микротрона осуществляется импульсом, связанным с вращающимся диском ИБРа, так что импульс микротрона приходится на момент наибольшего значения коэффициента размножения.

Очевидно, полное число нейтронов в импульсе реактора будет равно: $N = \frac{ST}{|\epsilon|}$ где

S - число нейтронов в секунду, генерируемых в мишени ускорителя во время вспышки;

T - длительность электронного импульса;

$\epsilon = K_{\text{мгн}} - 1$ - реактивность для мгновенных нейтронов (отрицательная).

При этом передний фронт импульса (рис. 2) имеет продолжительность T, а задний фронт представляет затухающую экспоненту с периодом $r/|\epsilon|$, где r - среднее время жизни нейтрона в реакторе (для ИБРа $r = (1,3 \pm 0,2) \cdot 10^{-8}$ сек.).

Таким образом, длительность вспышки реактора можно считать равной $\theta = T + r/|\epsilon|$.

Во многих случаях оптимальной является мощность, при которой $\theta = T + r/|\epsilon|$, т.е.

$\theta = 2T$ и $N = \frac{ST^2}{r} (1)$. В этом случае для $T = 2$ мксек оптимальная реактивность

$$\epsilon = - \frac{r}{T} = \frac{-1,2 \cdot 10^{-8}}{2 \cdot 10^{-6}} = -0,6 \cdot 10^{-2}$$

Это соответствует величине умножения источника на мгновенных нейтронах

$$Y_{\text{мгн}} = \frac{1}{|\epsilon|} = 170 \text{ и на запаздывающих нейтронах}$$

$$Y_{\text{зап}} = \frac{1}{|\epsilon + \beta_{\text{эф}}|} = \frac{1}{8 \cdot 10^{-3} - 3 \cdot 10^{-3}} = 330$$

Ясно, что при таких же параметрах стационарного реактора фон между импульсами составлял бы 1/2 всей мощности. Этот пример показывает большое преимущество

импульсных реакторов перед стационарными при использовании их для размножения импульсного источника; по этой причине электронный линейный ускоритель со стационарным множителем в Харуэлле может эффективно работать для нейтронной спектроскопии только при размножении $\approx 10^{13}$.

В настоящее время обычный режим работы характеризуется следующими величинами:

Ток в импульсе	0,04 - 0,06 а
Длительность импульса электронов, T	1,5 - 2,2 мксек
Частота импульсов	50 1/сек
Средняя мощность реактора при $\epsilon = -5,10^{-3}$	400 - 600 вт
Длительность вспышки	4,1 - 4,8 мксек
Глобальное число нейтронов в секунду	$(1,4 - 2,2) \cdot 10^{13}$

На рис. 3 изображена экспериментальная форма резонанса Ag^{109} при $F_0 = 72,4$ эв, измеренная (x, y) - детектором при пролетной базе 30 м для нескольких значений подкритичности реактора на мгновенных нейтронах в импульсе, а в таблице 1 - экспериментальные и расчетные значения периода спада. Так как собственная ширина резонанса с учетом доплеровского уширения при этой пролетной базе $\approx 0,6$ мксек, то для длительности импульса порядка нескольких микросекунд форма резонанса с хорошей точностью соответствует форме импульса. Собственная ширина резонанса сказывается, по-видимому, только в случае $\epsilon = -1,1 \cdot 10^{-2}$.

Работа ИБРа в режиме размножения импульсов микротрона позволила улучшить разрешение в экспериментах с резонансными нейтронами более чем на порядок и увеличить интенсивность потока нейтронов на базе при одинаковом с ИБРом разрешении в 15 раз.

Надо отметить, что в настоящее время интенсивность нейтронного потока установок еще недостаточна для многих экспериментов. Дальнейший прогресс в этом направлении будет связан с усовершенствованием инжектора электронов.

Возможно также увеличение интенсивности вспышки за счет укорочения среднего времени жизни нейтронов в реакторе (см. формулу (1)). Так, удаление отражателя ИБРа и дополнительная загрузка активной зоны может дать уменьшение r примерно в два раза.

2. Повышение мощности реактора до 6 квт и дальнейшие перспективы

В конце 1963 г. реактор ИБР был остановлен на профилактический ремонт с целью осмотра состояния тепловыделяющих элементов и узлов технологической машины, а

также выполнения ряда конструктивных изменений, необходимых для увеличения мощности реактора и улучшения его эксплуатационных характеристик. Проверка тепловыделяющих элементов на герметичность методом дозиметрического контроля показала, что герметичность элементов не нарушена. Хорошее состояние плутониевых тепловыделяющих элементов позволило оставить их для повторной загрузки. Особый интерес представляла проверка состояния вкладыша основной подвижной зоны. В процессе эксплуатации урановый сердечник вкладыша подвержен помимо ядерного нагрева сжатию до 25 кг/мм^2 от центробежной силы, а оболочка U вкладыша работает на растяжение с максимальной нагрузкой до 10 кг/мм^2 . Поведение тепловыделяющих элементов в таких условиях работы ранее не исследовалось. Осмотр показал, что сердечник вкладыша остаточных деформаций не имеет, но на оболочке вкладыша под действием центробежной силы образовалась полуовална с амплитудой около 1,0 мм. Для увеличения стойкости оболочки из нержавеющей стали ее толщина для нового вкладыша была увеличена с 0,4 мм до 0,6 мм.

Неподвижная зона реактора ИБР имеет воздушное охлаждение. Чтобы обеспечить увеличение мощности реактора, расход охлаждающего воздуха, проходящего через зону, увеличен с 90 до 170 $\text{м}^3/\text{час}$, а также введено охлаждение стержней аварийной защиты, ранее не имевших охлаждения. В марте 1964 г. мощность реактора была повышена до 3 квт (в три раза). В процессе повышения мощности были выполнены измерения температур оболочек тепловыделяющих элементов. Кроме того, были исследованы причины, влияющие на рассинхронизацию дисков основной и вспомогательной подвижных зон, а следовательно, и на устойчивость работы реактора, и разработана методика синхронизации дисков.

Особое внимание было уделено контролю за состоянием вкладышей основной подвижной зоны. Выполненная на ИБРе система дистанционного контроля позволяет непрерывно контролировать профиль вкладышей в процессе работы реактора. При плановых остановках реактора профиль вкладышей дополнительно измерялся с помощью индикатора через специальные отверстия в защите.

Низкие температуры оболочек стержней неподвижной зоны и удовлетворительное состояние вкладышей позволило в феврале 1965 г. после улучшения охлаждения стержней аварийной защиты поднять мощность реактора до 6 квт. При этом уровне мощности температура оболочек стержней неподвижной зоны поднялась до 180°C .

При повышении мощности было обращено внимание на оценку температуры вкладыша подвижной зоны. Непосредственное измерение температуры сердечника вкладыша очень сложно, а точный расчет затруднен из-за неопределенности в коэффициенте теплопередачи от вкладыша в окружающую среду. Температура урана в центре вкладыша была оценена с помощью термочувствительных красок, которые наносились на поверх -

ность оболочки и на диск вблизи вкладыша. Оценка температуры урана в центре вкладыша на мощности 6 квт составила $190 \pm 260^\circ\text{C}$.

В настоящее время планируется дальнейшее увеличение мощности реактора. При существующей конструкции ИБРа предельная мощность определяется температурой основной подвижной зоны, увеличение охлаждения которой технически трудно выполнимо. В связи с этим перспективен вариант ИБРа с двумя рабочими вкладышами из U^{235} (путем замены противовеса из U^{238} на второй рабочий вкладыш), что позволит разделить тепловую нагрузку между ними. Так как импульсы от каждого из вкладышей не должны при этом отличаться более чем на 10 - 20%, должна быть очень высокой точность изготовления вкладышей.

Реактор ИБР, как известно, помещен внутри зала с толстыми бетонными стенами, обеспечивающими биологическую защиту. Повышение мощности приводит к значительной активации узлов машины и механизмов внутри зала реактора, что затрудняет работы, связанные с профилактическим осмотром и ремонтом установки. Однако мы считаем, что вполне реально повышение мощности ИБРа до нескольких десятков киловатт при сравнительно небольших затратах.

3. Перспективы импульсных реакторов на быстрых нейтронах

Величина средней мощности ИБРа в несколько десятков квт не является пределом для импульсных реакторов такого типа. Однако дальнейшее увеличение мощности может быть достигнуто за счет довольно значительного изменения конструкции реактора, а именно: интенсификации охлаждения (переход к жидкометаллическому теплоносителю), замены подвижного вкладыша из делящегося материала на подвижный отражатель из рассеивателя, а также изменения конструкции биологической защиты. При мощности реактора порядка нескольких мегаватт необходимо учитывать импульсный характер тепловыделения. Выделение энергии в одном импульсе ИБРа при частоте 5 1/сек составляет 0,3 ккал, что приводит к мгновенному подогреву тепловыделяющих элементов не более чем на $0,6^\circ\text{C}$; в этом случае импульсность тепловыделения можно не принимать во внимание. Рассмотрим влияние импульсности при большой мощности реактора. В этом случае не только должен быть обеспечен полный теплоотвод при сохранении допустимых значений температур твэл'ов, но необходимо, чтобы твэл'ы имели прочность к тепловому удару, соответствующему мгновенному подогреву. Средняя мощность реактора W и мгновенный подогрев Δt связаны соотношением

$$W = \frac{c_p \Delta t M \cdot n}{K}$$

где c_p - теплоемкость материалов твэл'ов;

Δt - мгновенный подогрев твэл'а за один импульс в наиболее напряженной области реактора;

M - вес твэл'ов;

ν - частота импульсов мощности;

K_v - коэффициент неравномерности тепловыделения по объему реактора.

Отсюда видно, что Δt при данном W зависит от величины загрузки, теплоемкости горючего и частоты повторения всплеск. Например, для реактора с загрузкой 50 кг при частоте импульсов 10 1/сек и мощности 5 Мвт мгновенный подогрев достигнет 80°C. При таких значениях Δt прочность материала к тепловому удару не очевидна. По опубликованным расчетным данным допустимый мгновенный подогрев шарового слоя из урана не превышает 125°C/5/.

Определенные ограничения на мощность импульсного реактора накладывают и условия использования его как источника нейтронов для нейтронной спектроскопии.

Рассмотрим зависимость важнейших характеристик импульсного реактора на быстрых нейтронах от его размеров. Для определенности выберем следующую композицию реактора:

- активная зона на основе плутония;
- стационарный отражатель толщиной 5 ÷ 10 см;
- никелевый подвижный отражатель;
- охлаждение - жидкий натрий.

При рассмотрении необходимо принять во внимание следующее:

1.1. Длительность импульса мощности (θ) определяется в основном тремя факторами: средним временем жизни мгновенных нейтронов в реакторе (τ), эффектом изменения реактивности при смещении подвижного элемента вблизи максимума реактивности (α) и скоростью перемещения подвижного элемента относительно активной зоны (v): $\theta \approx 1,4 (\tau/\alpha v^2)^{1/3}$ [4]. Значения τ и α главным образом зависят от размеров активной зоны и отражателя: как показывают расчеты, τ растет примерно пропорционально общим размерам реактора, а α обратно пропорционально примерно четвертой степени радиуса активной зоны. Зависимость полуширины импульса от радиуса активной зоны приведена на рис. 4.

1.2. Мощность, выделяемая между импульсами, "фоновая" мощность (W_f), определяется так: $W_f = W_{cp} \cdot \beta_{эфф} / \epsilon_0$, где ϵ_0 - полная эффективность подвижного отражателя, $\beta_{эфф}$ - эффективная доля запаздывающих нейтронов. Естественно, что с увеличением размеров реактора падает эффективность подвижного отражателя и растет фон. На рис. 5 показана зависимость "фона" от радиуса зоны. Быстрое уве-

личение "фона" для $R > 15$ см ограничивает размеры активной зоны сверху.

1.3. Средняя мощность реактора W растет несколько быстрее, чем объем реактора, так как допустимый удельный теплосъем растет с увеличением размеров реактора из-за уменьшения оптимального диаметра твэл'ов. Ориентировочный расчет показывает, что $W \sim R^4$. В реакторе БР-5 объемом ≈ 10 литров с жидкометаллическим охлаждением достигается удельный теплосъем 500 кВт/л/8/. Эта цифра была положена в основу приблизительного расчета предельных значений тепловой мощности реакторов разных размеров, результаты которого приводятся в таблице 2.

Перейдем к характеристикам нейтронного потока, которые являются определяющими при оценке качества нейтронного источника, предназначенного для нейтронной спектроскопии. Для простоты остановимся только на нейтронах быстрых и тепловых.

2.1. В отличие от реакторов на тепловых нейтронах малые размеры реакторов на быстрых нейтронах, сравнимые с диаметром экспериментальных каналов, позволяют нам считать поток на детектор пропорциональным глобальному потоку. (Глобальные потоки нейтронов быстрых и тепловых - N_b и $N_t \frac{h}{T \text{ сек}}$). Источником тепловых нейтронов в импульсном реакторе будет водородосодержащий замедлитель, помещенный у внешней поверхности активной зоны реактора. Как показывают расчеты, спектр нейтронов в активной зоне для $R_{a.з.}$ в области 8 ÷ 15 см меняется слабо и поглощение нейтронов мало. Эти обстоятельства приводят к тому, что утечка нейтронов из реактора не зависит от размеров и будет пропорциональна мощности. Следовательно, число нейтронов, возникающих в импульсах,

$$N_b - N_t \approx W(1 - \beta_{эфф} / \epsilon_0).$$

2.2. В некоторых случаях (при малом диаметре канала или в экспериментах, где требуется высокое угловое разрешение) определяющими будут поток тепловых нейтронов с единицы поверхности замедлителя $N_{т.уд.} \frac{h}{\text{см}^2 \text{ сек}}$ и поток быстрых нейтронов с единицы поверхности активной зоны $N_{б.уд.}$. Ориентировочно можно считать, что удельный поток $N_{т.уд.} \sim N_t / (R+h)^2$, где h - толщина замедлителя, а $N_{б.уд.} \sim N_b / R^2$.

2.3. Существенной характеристикой является интенсивность нейтронного потока на пролетной базе l , соответствующей данной разрешающей способности спектрометра, которая определяется величинами T_b / l и T_t / l , где T_b и T_t - эффективные длительности всплески соответственно быстрых и тепловых нейтронов. Так как поток нейтронов $\sim l^{-2}$, то искомая величина пропорциональна N_b / T_b^2 и N_t / T_t^2 . Очевидно, что $T_b = \theta$; легко также получить, что $T_t = \frac{\theta}{1 - \epsilon_0 / \tau}$, где τ - время жизни тепловых нейтронов в замедлителе относительно захвата и утечки.

2.4. При использовании механических селекторов для сокращения времени вспышки определяющими будут удельные значения потоков в максимуме импульса, а именно:

$$N_{\text{б.уд.макс.}} - N_{\text{б.уд.}} / \theta \quad \text{и} \quad N_{\text{т.уд.макс.}} - N_{\text{т.уд.}} / T$$

На графиках 6,7,8 приведены относительные значения вышеперечисленных характеристик импульсного реактора как функции его тепловой мощности. Анализ кривых на графиках показывает, что полезные нейтронные потоки растут линейно с мощностью при малых мощностях, а затем довольно быстро достигают максимума. Это ставит предел увеличению мощности за счет увеличения размеров реактора. Для рассмотренного в настоящем работе плутониевого реактора с подвижным отражателем этот предел составляет несколько мегаватт.

По-видимому, аналогичные соображения были положены в основу проекта импульсного реактора, сделанного Евратомом в исследовательском центре ISPRA (Италия). Приведем его расчетные характеристики, взятые нами из работ /7/ и /8/.

Проектные характеристики реактора SORA

Средняя тепловая мощность	- 1 Мгвт
Частота импульсов	- 50 1/сек
Полуширина импульса мощности	- 50 мксек
Средний поток тепловых нейтронов в замедлителе	- $4 \cdot 10^{13} \frac{\text{н}}{\text{см}^2 \text{сек}}$
Максимальный поток тепловых нейтронов во время импульса	- $5,5 \cdot 10^{15} \frac{\text{н}}{\text{см}^2 \text{сек}}$
Полуширина импульса тепловых нейтронов	- 90 мксек
Максимальный поток эпитепловых нейтронов (в области энергий $22,6 \div 0,414$ эв)	- $2 \cdot 10^{15} \frac{\text{н}}{\text{см}^2 \text{сек}}$
Мощность, выделяемая между импульсами,	- 0,2 Мгвт

Горизонтальный разрез реактора вместе с прилегающими экспериментальными каналами показан на рисунках 9 и 10 (взято из /8/).

Активная зона реактора, имеющая объем 6 литров, набирается из урановых стержней, легированных молибденом, с наружным диаметром 15 мм и высотой уранового сердечника 240 мм. Стационарный отражатель из молибдена и стали имеет толщину около 180 мм. Подвижный отражатель из бериллия представляет собой параллелепипед размерами 24 x 11 x 7 см³. Он крепится на большом пропеллере, приводимом во

вращение электромотором с частотой 3000 об/мин. Линейная скорость бериллиевого отражателя вблизи активной зоны - 283 м/сек. Полная эффективность подвижного отражателя - 5β ; изменение реактивности при смещении отражателя на 1 см от положения максимальной реактивности - $7 \cdot 10^{-4}$ ед. реактивности.

Большое внимание при проектировании реактора SORA было уделено оснащению его экспериментальным оборудованием. Для оптимизации интенсивности нейтронов в области энергий от нескольких килоэлектронвольт до самых низких энергий на SORA предусматриваются четыре замедлителя:

1. Водородный замедлитель в кристате с температурой $20 \div 70^\circ \text{K}$ как источник холодных нейтронов. От источника отходят шесть экспериментальных каналов, внутренний диаметр каждого из которых в начале 10 см и длина 2 метра. Два из них оснащены вращающимися прерывателями, служащими для "обрезания" фона между импульсами.

2. Водородный замедлитель из льда легкой воды как источник тепловых нейтронов. Схема экспериментальных каналов для этого источника та же, что и для "холодного".

3. Вращающийся отражатель из бериллия может служить источником нейтронов с энергией несколько кэв. Один из двух горизонтальных каналов от этого источника будет иметь базу 1 км.

4. Вторым источником эпитепловых нейтронов является канал диаметром 28 см, отходящий от границы между отражателем реактора и графитовой тепловой защитой.

В проекте SORA предусмотрена возможность ввода в активную зону пучка электронов от линейного ускорителя на тот случай, если будет принято решение установить на SORA сильноточный линейный ускоритель. При среднем времени жизни нейтронов в реакторе SORA $\tau = (2 \div 2,5) \cdot 10^{-8}$ сек можно получить размножение нейтронов, генерируемых в мишени, равное $200 \div 250$ при длительности 5 мксек. Выбор урана-235 в качестве горючего, по нашему мнению, снижает достоинства импульсного реактора SORA. Ввиду большой доли запаздывающих нейтронов при делении U-235 ($\beta = 6 \cdot 10^{-3}$) мощность фона в 3 раза выше, нежели в таком же реакторе с горючим из Pu-239, используемом в реакторе ИБР. Кроме того, уменьшение частоты импульсов до 10 1/сек дало бы увеличение мгновенного потока с $5,5 \cdot 10^{15} \frac{\text{н}}{\text{см}^2 \text{сек}}$ до $2 \cdot 10^{16} \frac{\text{н}}{\text{см}^2 \text{сек}}$.

4. Сравнение экспериментальных возможностей на импульсных источниках разных типов

В этой части доклада мы коротко остановимся на сравнении импульсных реакторов с импульсными источниками других типов, применяемыми в настоящее время для целей нейтронной спектроскопии и исследования конденсированных сред.

Существующие импульсные источники очень сильно различаются как по длительности, частоте следования и интенсивности производимого ими импульса нейтронов, так и по своим размерам и конструкции. Сравнение различных источников импульсных нейтронов вследствие этого весьма не просто. Кроме того, немаловажную роль при выборе источника нейтронов играют соображения, выходящие за рамки его физических характеристик, например, такие, как стоимость строительства установки и ее эксплуатации. Требования, предъявляемые к установкам при выполнении той или иной экспериментальной задачи, не только многочисленны, но и часто противоречивы. Все это весьма затрудняет проведение точного сравнения их между собой. Детальному сравнению экспериментальных возможностей реакторов SORA и Брукхейвенского стационарного реактора VHFTR мощностью 100 Мгвт для широкого круга экспериментов во всей области энергий нейтронов посвящена большая работа Мюллера и Хааса^{/8/}, а также работа В.Клея^{/7/}. Мы же приведем некое обобщенное сравнение различных типов источников, безотносительное к конкретной экспериментальной задаче.

В таблице 3 собраны характеристики наиболее типичных импульсных приборов, как действующих, так и намечаемых на будущее.

а) Ускорители с мишенью, производящей нейтроны

Современные сильноточные линейные ускорители (типа американских RPI и PHERMEX^{/10/}) по средней интенсивности быстрых и тепловых нейтронов не превосходят даже ИБР с его 6 квт средней тепловой мощности. Однако из-за короткой вспышки их интенсивность как источника быстрых нейтронов при равном разрешении (N_6/θ^2) на 3 порядка выше, чем у ИБРа.

Реактор SORA с механическим прерывателем пучка быстрых нейтронов будет уже превосходить линейные ускорители при работе их в режиме вспышек ≈ 1 мксек. В режиме очень коротких вспышек ($\theta \approx 0,02$ мксек) величина N/θ^2 для линейных ускорителей оказывается выше, чем у SORA, на 2 порядка. Но использование большой частоты вспышек ускорителей затруднено в экспериментах с быстрыми нейтронами из-за наложения нейтронов более низких энергий от предыдущих импульсов. Поэтому практически, по-видимому, преимущества линейного ускорителя для экспериментов с быстрыми нейтронами и очень высоким разрешением несколько меньше.

Большое время жизни тепловых нейтронов в замедлителе не позволяет использовать короткую вспышку ускорителя, а поэтому интенсивность тепловых нейтронов при одинаковом разрешении на импульсном реакторе типа SORA в несколько сот раз выше, чем на ускорителе электронов.

Ожидаемые значения интенсивности нейтронов из мишени проектируемого в Чок-Ривере большого циклотрона превосходят на 2 порядка интенсивность SORA, и, видимо, поток тепловых нейтронов возможен до $10^{18} \frac{n}{cm^2 \cdot сек}$ при среднем значении $10^{16} \frac{n}{cm^2 \cdot сек}$.

На импульсном реакторе средней мощности 5 Мгвт и частоте 10 имп/сек можно получить поток тепловых нейтронов в максимуме до $1 \cdot 10^{17} \frac{n}{cm^2 \cdot сек}$ при среднем его значении $2 \cdot 10^{14} \frac{n}{cm^2 \cdot сек}$. Выигрыш на порядок достигается ценой более высоких затрат на сооружение гигантского ускорителя.

б) А периодические импульсные реакторы

За последние годы широкое развитие получили импульсные реакторы с самогасящейся вспышкой без специального интенсивного охлаждения. Реакторов на быстрых нейтронах с короткой вспышкой от 35 до 1000 мксек, в основном функционирующих в США^{/11/}, насчитывается сейчас около десятка. Реактор Super Kukla, строящийся сейчас, будет давать импульс до $2 \cdot 10^{18}$ дел. Импульсные реакторы на тепловых нейтронах (TRIGA, ИГР и т.д.,^{/12/, /13/}) дают импульсы от 10^{18} до 10^{21} дел. длительностью $10 \div 200$ мсек.

Все эти реакторы имеют высокий максимальный поток нейтронов (до $10^{18} \frac{n}{cm^2 \cdot сек}$) и в основном успешно применяются для исследования поведения материалов при мгновенных нагревах и для активационных измерений. Малая средняя мощность (см. табл. 4) делает эти реакторы непригодными для исследований по нейтронной спектроскопии.

в) Реакторы постоянного действия

В настоящее время самый распространенный импульсный источник для целей нейтронной спектроскопии - реактор постоянной мощности, оборудованный механическими селекторами. Увеличение интенсивности нейтронов идет здесь как по пути увеличения удельной мощности, так и по пути усложнения конструкции активной зоны - встраивания нейтронных "ловушек". На советском реакторе СМ-2 достигнут поток тепловых нейтронов $2,5 \cdot 10^{15} \frac{n}{cm^2 \cdot сек}$ при тепловой мощности 50 Мгвт^{/14/}.

На строящемся в США реакторе VHFTR тепловой мощностью 100 Мгвт намечается достигнуть потока $2 \cdot 10^{15} \frac{n}{cm^2 \cdot сек}$. Реактор SORA мощностью 1 Мгвт будет иметь максимальный поток до $5,5 \cdot 10^{15} \frac{n}{cm^2 \cdot сек}$, а в настоящее время можно считать реальным получение на импульсном реакторе потока до $1 \cdot 10^{17} \frac{n}{cm^2 \cdot сек}$ при средней мощности $5 \div 10$ Мгвт.

Таблица 5, заимствованная из работы /9/, показывает относительную интенсивность скорости счета детекторов аналогичных экспериментальных установок на реакторах SORA и VHFR для нескольких энергий монохроматических нейтронов и разрешения по энергии, одинакового для обеих установок. Почти во всей области низких энергий и разрешений SORA имеет преимущество. Быстрый спектр реакторов типа SORA и малые размеры зоны дают им еще большее преимущество в области высоких энергий. Поток быстрых нейтронов (выше 1 Мэв) на CM-2 равен $2.10^{15} \frac{n}{\text{см}^2 \text{сек}}$, в то время как значение потока быстрых нейтронов в импульсе для реактора SORA $6.10^{16} \frac{n}{\text{см}^2 \text{сек}}$. К тому же надо учитывать высокую стоимость и сложность эксплуатации реакторов мощности 50 ÷ 100 Мвт.

г) Подкритические реакторы как размножители импульсов ускорителя

Использование быстрого реактора в подкритическом состоянии для размножения импульсов нейтронов, генерируемых в мишени ускорителя, имело место не только на ИБРе, но и в Харуэлле /3/, и в США (частное сообщение проф. Хэвенса). Мы уже упоминали, что и в проекте SORA предусмотрена возможность ввода пучка электронов в реактор. Такой режим работы дает возможность как бы увеличить мощность ускорителя в 10 ÷ 100 раз, оставляя импульс нейтронов еще достаточно коротким. Как видно из таблицы 3, сочетание импульсного реактора с ускорителем позволяет поднять эффективность импульсного реактора в области надтепловых энергий нейтронов на 1 ÷ 2 порядка. Фактор увеличения эффективности ускорителя при работе его с реактором будет равен $T/4r$, т.е. оптимальное умножение равно T/r , а импульс удлиняется в 2 раза. r для быстрых реакторов типа SORA $\approx 2.10^{-8}$ сек, и при $T = 1$ мсек $\frac{T}{4r} \approx 10$; при $T = 0,1$ мсек $\frac{T}{4r} \approx 1$. Следовательно, установки типа ускоритель-реактор эффективны только для импульсов длительностью порядка 1 мсек.

д) Выводы

1. Импульсные реакторы периодического действия оптимальной тепловой мощности (несколько мегаватт) по удобству и эффективности являются, по-видимому, наиболее перспективными источниками тепловых и холодных нейтронов из всех существующих в настоящее время и проектируемых для работ, использующих метод времени пролета (за исключением, быть может, гигантского ускорителя в Чок-Ривере).

2. Использование импульсных реакторов как размножителей импульсов ускорителя дает удобный источник надтепловых нейтронов при длительности импульса порядка одной или нескольких микросекунд.

3. Для очень коротких импульсов (0,1 мсек и менее) применение импульсных реакторов как размножителей не эффективно.

Л и т е р а т у р а

1. Б.Н.Буники и др. Доклад на III Международной конференции ООН по использованию атомной энергии в мирных целях, 23/p/324, 1964.
2. В.Д.Анапьев и др.. Препринт ОИЯИ, P-2313, Дубна, 1965.
3. Nuclear Power, Dec. 1959, p. 128.
4. И.И.Бондаренко, Ю.Я.Стависский. Атомная энергия, 7, 417 (1959).
5. В.Е.Колесов. Атомная энергия, 4, 309 (1964).
6. А.И.Лейпунский и др.. Атомная энергия, 5, 345 (1964).
7. W.Kley. Paper Prepared for the "Panel on Kinetics and Applications of Pulsed Research Reactors" held by the IAEA's . May 1965.
8. V.Raievski and others, N= SM 62/34 IAEA, Karlsruhe, 1965.
9. H.B.Muller, R.Haas. EUR 490^e, 1964.
10. D.Venable. Physics Today, Dec. 1964.
11. T.F.Wimett. N= SM 62/53 IAEA, Karlsruhe, 1965.
12. L.Mac Phee N= SM 62/59 IAEA, Karlsruhe, 1965.
13. И.В.Курчатов и др.. Атомная энергия, 6, 463 (1964).
14. С.М.Фейнберг и др.. Атомная энергия, 6, 452 (1964).

Рукопись поступила в издательский отдел
23 сентября 1965 г.

Таблица 1

Подкритичность в импульсе $ \epsilon $	Период спада импульса, мксек, эксперимент	Расчет, $r/ \epsilon $, мксек
$1,1 \cdot 10^{-2}$	$1,8 \pm 0,3$	$1,2 \pm 0,4$
$4,6 \cdot 10^{-3}$	$2,9 \pm 0,3$	$2,8 \pm 0,9$
$3,0 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \pm 0,5$	$4,4 \pm 1,5$
$1,44 \cdot 10^{-3}$	$8,1 \pm 0,8$	$9,0 \pm 3,6$

Таблица 2

Радиус активной зоны, см	7	9	11	14	18
Объем ак- тивной зоны, л	1,45	3,0	5,6	11,5	24,5
Предельная тепловая мощность, МГВт	0,4	1,1	2,7	6,9	14,7

Таблица 3
Характеристики периодических импульсных источников^{х/}

	1	2	3	4	5	6	7	8
Тепловая мощность установки, кВт	-	-	40 (малень)	6	0,4	1000	1000	-
Частота импульсов, 1/сек	60	60	200 (1000)	5	50	50	50	200 (200)
Длительность импульсов θ , мксек	0,025	0,025	1 (0,02)	60	4	50	5	5 (0,3)
Глобальный средний поток нейтронов, 1/сек N_6	2.10 ¹³	2.10 ¹³	2.10 ¹⁴ (2.10 ¹³)	3,3.10 ¹⁴	2,2.10 ¹³	5.10 ¹⁶	5.10 ¹⁶	9.10 ¹⁸ (10 ¹⁸)
Средний поток тепловых нейтронов, н/см ² -сек	2.10 ¹⁰	2.10 ¹⁰	1,6.10 ¹¹ (1,6.10 ¹⁰)	1,8.10 ¹¹	1,2.10 ¹⁰	4.10 ¹³	4.10 ¹³	10 ¹⁶
Максимальный поток тепловых нейтронов, н/см ² -сек N_6/θ^2	3.10 ¹²	3.10 ¹²	6.10 ¹² (10 ¹¹)	3,6.10 ¹⁴	2.10 ¹²	5,5.10 ¹⁵	8.10 ¹⁵	10 ¹⁸
(относительно ИБРА)	2	2	2.10 ³ (5.10 ⁵)	1	15	210	2.1.10 ⁴	3.10 ⁶ (10 ⁸)
То же с механическим селектором, Δt , сел. = 1 мксек	-	-	-	15	-	2,7.10 ³	-	-

^{х/} Значения величин для РР1 и циклотрона в Чок-Ривере, приведенные в скобках, соответствуют второму режиму работы.

Характеристики импульсных реакторов аперодического действия и ИБРа

	FBR	ИГР	ИБР	SORA
Число делений в импульсе	10 ¹⁷	10 ²¹	3.10 ¹³	5.10 ¹⁴
Полуширина импульса, мксек	35	2.10 ⁵	60	50
Частота повторения	0,5 час ⁻¹	0,04 час ⁻¹	5 сек ⁻¹	50 сек ⁻¹
Глобальный средний поток н/сек (утечка)	2,8.10 ¹³	-	3,3.10 ¹⁴	5.10 ¹⁶
Максимальный поток тепловых нейтронов, н/см ² сек	10 ¹⁸ */	10 ¹⁸	3,6.10 ¹⁴	5,5.10 ¹⁵
Поток тепловых нейтронов за 200 мксек, интервал, умноженный на число импульсов в сек.	2.10 ¹⁰	2.10 ⁹	1,8.10 ¹¹	4.10 ¹³

х/

Ожидаемое значение в случае наличия замедлителя.

Т а б л и ц а 5

Сравнение реакторов SORA и VNGR для экспериментов с нейтронами низких энергий

Скорость нейтрона, м/сек	500	1000	2000	4000
Разрешение по энергии, %	1 2,5 5 10 1 2,5 5 10 1 2,5 5 10 1 2,5 5 10			
<u>Интенсивность SORA</u>	0,8 1,5 3,3 6,7 0,55 0,8 1,7 3,3 1,8 2,7 8 25 3,3 1,5 2,6 8			
<u>Интенсивность VNGR</u>				

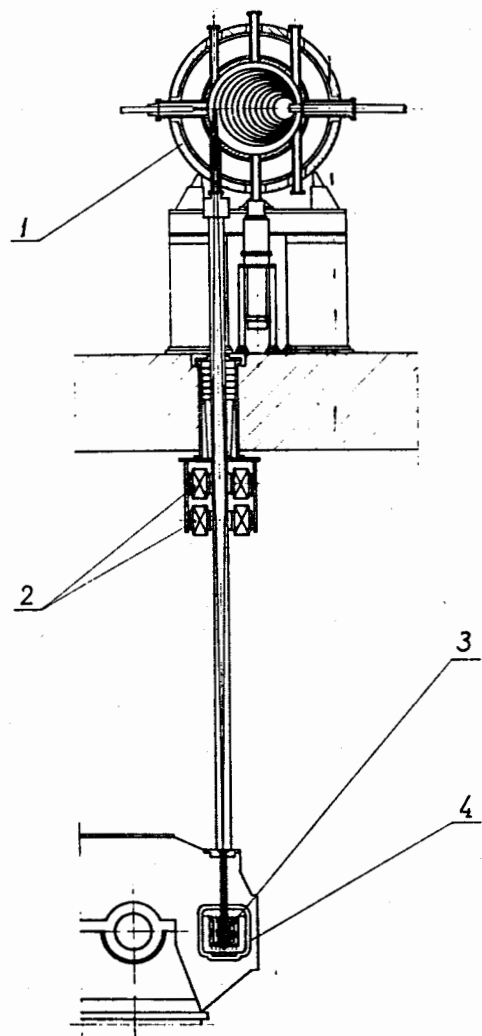


Рис. 1. Схема расположения микротрона в зале реактора: 1) камера микротрона; 2) фокусирующие магниты; 3) мишень; 4) реактор.

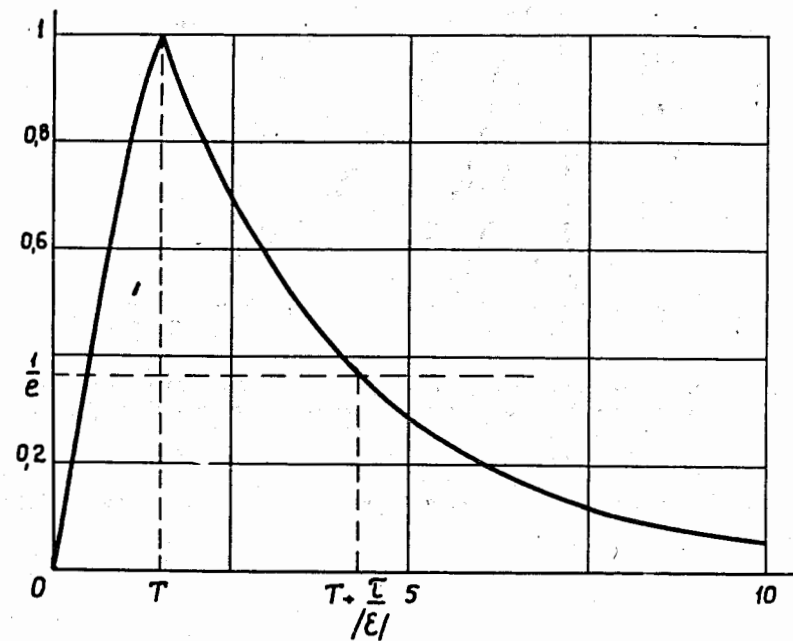


Рис. 2. Расчетная форма импульса ИБР в режиме размножения нейтронов, генерируемых в мишени микротрона. Импульс микротрона прямоугольной формы; $T = 1,5$ мсек; подкритичность $\epsilon = -4,6 \cdot 10^{-3}$; $\tau = 1,3 \cdot 10^{-2}$ мсек.

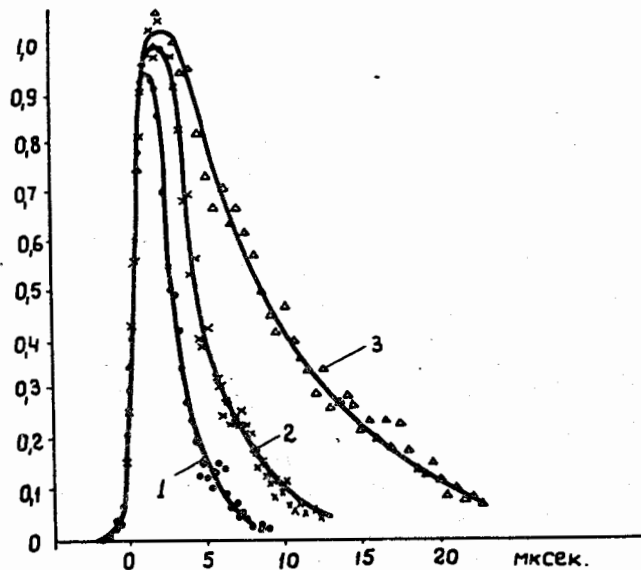


Рис. 3. Экспериментально измеренная форма импульса ИБРа в режиме совместной работы с микротроном для трех значений подкритичности в импульсе: кривая 1 - $\epsilon = -1,1 \cdot 10^{-2}$, кривая 2 - $\epsilon = -4,8 \cdot 10^{-3}$, кривая 3 - $\epsilon = -1,4 \cdot 10^{-3}$; и для $T = 1,5$ мксек. Кривые приведены к одной мощности в пике.

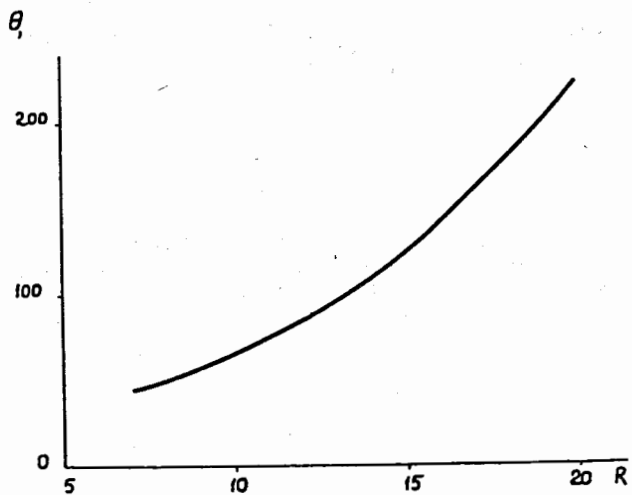


Рис. 4. Эффективная длительность импульса реактора с подвижным отражателем (θ) как функция размера (R) активной зоны; θ - в мксек, R - в см.

β/ϵ_0

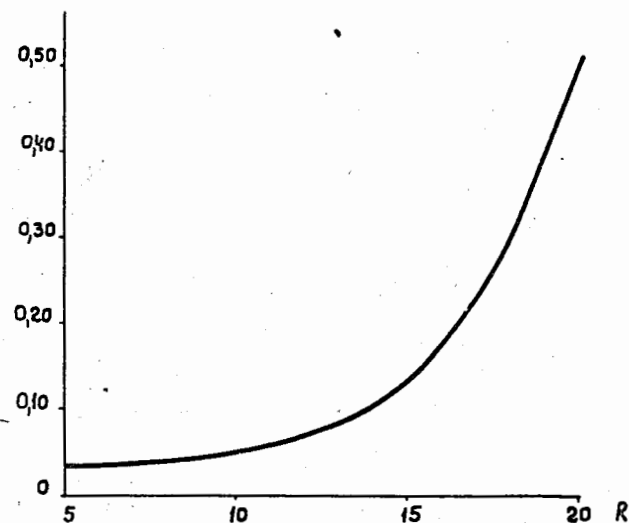


Рис. 5. Доля мощности, выделяемой между импульсами, от средней мощности импульсного реактора с плутониевым горючим и подвижным отражателем как функция размеров реактора; R - в см.

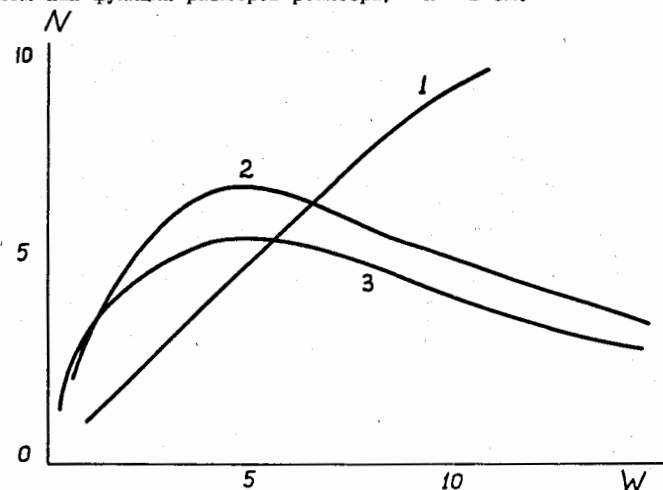


Рис. 6. Зависимость характеристик импульсных реакторов как источников быстрых нейтронов от полной тепловой мощности. Кривая 1 - глобальный поток быстрых нейтронов (утечка из реактора за время импульса); кривая 2 - интенсивность потока быстрых нейтронов на экспериментальной базе при одинаковом для всех реакторов разрешении; кривая 3 - удельный поток в максимуме импульса; N - в относительных единицах; W - в мегаваттах (при предельном теплосъеме согласно табл. 2).

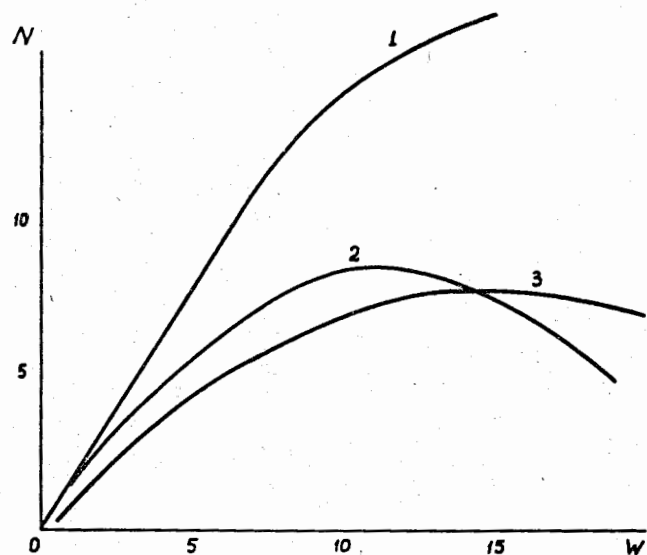


Рис. 7. Зависимость характеристик импульсных реакторов как источников тепловых нейтронов от полной тепловой мощности. Нейтроны замедляются в слое воды толщиной 5 см, полностью окружающем сферическую активную зону. Кривая 1 - глобальный поток тепловых нейтронов (утечка за время импульса); кривая 2 - интенсивность потока тепловых нейтронов на базе при заданном разрешении, если диаметр экспериментального канала больше размера замедлителя; кривая 3 - глобальный поток в максимуме импульса; N - в относительных единицах; W - в мегаваттах.

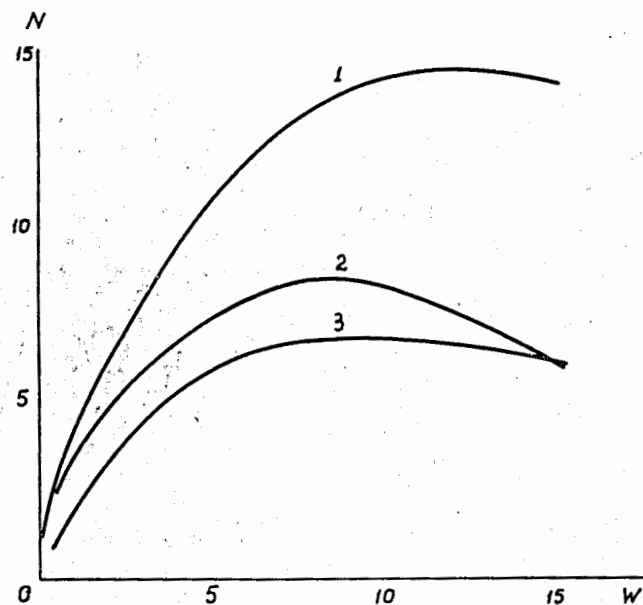


Рис. 8. Зависимость характеристик импульсных реакторов как источников тепловых нейтронов от тепловой мощности реактора. Замедлитель - тот же. Кривая 1 - поток тепловых нейтронов с единицы поверхности замедлителя; кривая 2 - интенсивность потока нейтронов на базе при заданном разрешении, если диаметр канала меньше размера замедлителя; кривая 3 - удельный поток с поверхности замедлителя в максимуме импульса; N - в относительных единицах; W - в мегаваттах.

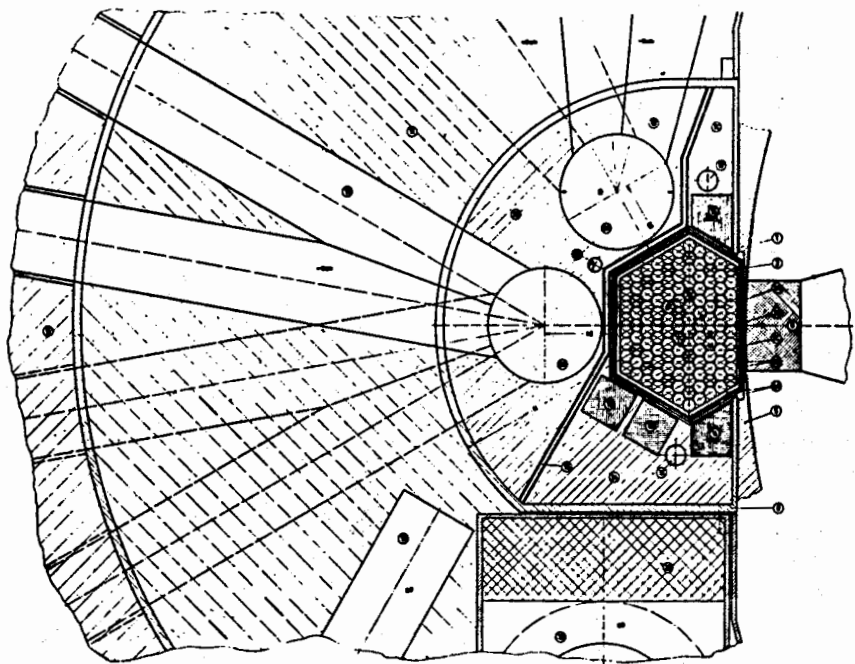


Рис. 9. Горизонтальный разрез реактора SORA .

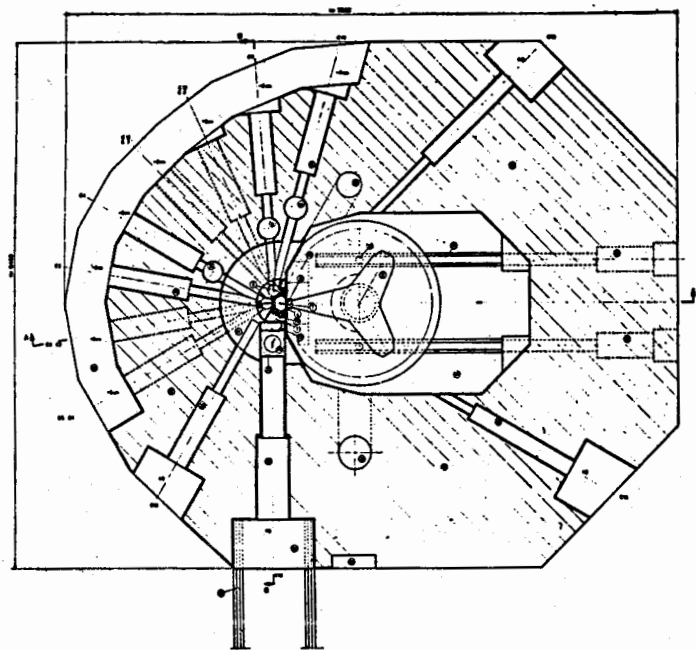


Рис. 10. План экспериментальных каналов на реакторе SORA.