

СЗ486

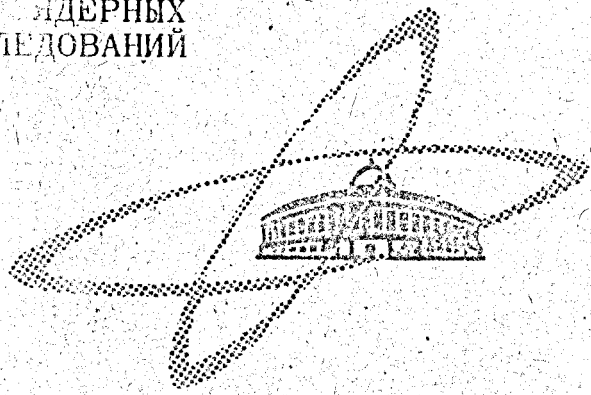
2/1 - 1968 г.

A-64 1

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

13 - 4392



✓

ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ

В. Д. Ананьев, Д. И. Блохинцев, П. В. Букаев,
 Ю. М. Булкин, Ю. П. Вахрушин, В. В. Виноградов,
 Н. А. Доллежалъ, Г. Н. Жемчужников, И. Д. Зубкова,
 В. С. Кузнецов, Б. И. Куприн, Е. Г. Комар,
 В. С. Лобанов, И. М. Матора, А. Навроцки,
 В. М. Назаров, А. К. Попов, В. П. Смирнов,
 В. С. Смирнов, И. М. Франк, А. И. Хоперский,
 Н. А. Хрястов, Е. П. Шабалин, Ф. Л. Шапиро,
 О. Я. Шах, Ю. С. Язвицкий

ИМПУЛЬСНЫЙ РЕАКТОР С ИНЖЕКТОРОМ ИБР-2

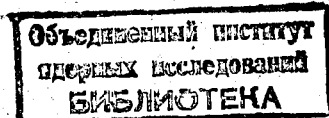
1969

Доклад, представленный на V конференцию
 по физике и технике исследовательских ре-
 акторов. Варшава, декабрь 1968 г.

4802/1 нр.
В.Д.Ананьев, Д.И.Блохинцев, П.В.Букаев,
Ю.М.Булкин, Ю.П.Вахрушин, В.В.Виноградов,
Н.А.Доллежалъ, Г.Н.Жемчужников, И.Д.Зубкова,
В.С.Кузнецов, Б.И.Куприн, Е.Г.Комар,
В.С.Лобанов, И.М.Матора, А.Навроцки,
В.М.Назаров, А.К.Попов, В.П.Смирнов,
В.С.Смирнов, И.М.Франк, А.И.Хоперский,
Н.А.Хрястов, Е.П.Шабалин, Ф.Л.Шапиро,
О.Я.Шах, Ю.С.Язвицкий

ИМПУЛЬСНЫЙ РЕАКТОР С ИНЖЕКТОРОМ ИБР-2

Доклад, представленный на V конференцию
по физике и технике исследовательских ре-
акторов. Варшава, декабрь 1968 г.



1. В в е д е н и е

В последние годы в ряде исследовательских центров были введены в действие мощные источники нейтронов. Среди наиболее совершенных из них следует назвать реакторы с потоком нейтронов до $10^{15} \frac{1}{\text{см}^2 \text{сек}}$ (например, HFBR и HFIR в США, CM-2 в СССР) и линейные ускорители электронов с импульсным током до нескольких ампер (Бельгия (Geel), Франция (Saclay), ряд ядерных центров США). Пуск этих установок значительно укрепил базу для нейтронных работ, открыв, в частности, более широкие возможности развития новых направлений, связанных с применением методов нейтронной физики к другим областям науки и техники. Тем не менее, потребности в сооружении новых генераторов мощных нейтронных потоков не уменьшились, и это связано как с естественным ростом требований к интенсивности, так и с увеличением числа направлений, использующих нейтроны.

Многочисленные обсуждения методов использования и способов создания мощных нейтронных источников, проведенные на специальных национальных и международных конференциях (см., например, /1-4/), подтвердили широкие перспективы применения интенсивных нейтронных потоков и реальные технические возможности их получения. Предложения о новых генераторах обсуждаются во многих ядерных центрах. Некоторые из них доведены до стадии рабочих /5/ и технических проектов /6/.

В технике генерирования интенсивных нейтронных потоков в последние годы совершенно отчетливо проявляются тенденции к развитию импульсных источников на базе размножающих систем с периодическим изменением реактивности. Начало их использования в целях физического

эксперимента было положено в 1960 г. созданием в Объединенном институте ядерных исследований первого в мире ^{х)} импульсного реактора на быстрых нейтронах (ИБР) с периодическими импульсами /7/. Опыт работы на ИБР убедительно продемонстрировал достоинство установок такого типа. Сохраняя в значительной степени универсальность, свойственную стационарным реакторам как источникам нейтронов, импульсный реактор позволяет получить значительную "экономия" в мощности, т.е. при меньшей средней мощности обеспечить равноценные условия для экспериментов. Было показано, например, что для экспериментов, связанных с энергетическим анализом резонансных нейтронов, ИБР при средней мощности 3 квт эквивалентен реактору непрерывного действия мощностью около 20 + 30 Мвт /8/, а импульсный реактор SORA, как ожидается по проекту, при средней мощности 1 Мвт для работ с холодными нейтронами превзойдет современный мощный стационарный реактор HFBR мощностью 40 Мвт /9/.

Выгодность импульсных систем проявляется еще более отчетливо с точки зрения получения нейтронных потоков большой плотности. Как уже отмечалось, наиболее крупные современные реакторы при мощности в несколько десятков мегаватт позволяют получать потоки порядка 10^{15} нейтр/см²сек. По-видимому, эти значения близки к практически достижимому пределу. Во всяком случае, увеличение потока до 10^{16} , 10^{17} нейтр/см²сек потребовало бы создания стационарных реакторов мощностью в сотни и тысячи мегаватт. Большие капитальные затраты на такие реакторы, сложность сооружения и эксплуатации делают строительство их нерентабельным. Импульсные реакторы на быстрых нейтронах позволяют иметь в максимуме импульса потоки 10^{19} нейтр/см²сек при мощностях 10-20 Мвт и умеренных затратах. Вопросы безопасности и обслуживания таких реакторов не вызывают особых осложнений.

В связи с проникновением методики времени пролета в самые различные области исследований, большой интерес представляет использование импульсного реактора на быстрых нейтронах в бустерном режиме, когда реактор находится в подкритическом состоянии и действует как импульсный размножитель нейтронов от внешнего импульсного источника,

^{х)} ИБР до настоящего времени является единственным действующим реактором с периодическими импульсами.

дающего нейтронные вспышки в момент максимальной реактивности импульсного реактора. Усложнение установки, вызванное введением дополнительного сложного элемента - мощного импульсного источника, действующего синхронно с реактором, вполне оправдывается сокращением длительности нейтронного импульса и следующим отсюда возрастанием параметра $\frac{Q}{\Theta^2}$ (Q - выход нейтронов, Θ - длительность импульса), определяющего силу спектрометрической установки. Бустерный режим импульсного реактора впервые осуществлен в 1964 г. в Объединенном институте ядерных исследований /8,10/. При этом без существенных потерь в интенсивности длительность импульса была уменьшена с 60 до 4 мксек, т.е. получен выигрыш в параметре $\frac{Q}{\Theta^2}$ примерно на 2 порядка.

Большой интерес, проявленный странами-участницами Объединенного института ядерных исследований к развитию нейтронных исследований в ОИЯИ, стимулировал разработку вопроса о создании нового источника нейтронов в Дубне. В 1966 г., рассмотрев предложения Лаборатории нейтронной физики, Ученый Совет ОИЯИ и Совет Полномочных представителей стран-участниц ОИЯИ приняли решение о разработке проекта мощного импульсного реактора с инжектором ИБР-2. В свете изложенного ясна научная, экономическая и техническая целесообразность выбранного типа источника. Дополнительными доводами в пользу принятого решения является наличие в ОИЯИ опыта работы с импульсным реактором и возможность перенесения имеющегося в Советском Союзе опыта работы достаточно мощных стационарных реакторов на быстрых нейтронах. Эти два обстоятельства будут способствовать быстрому сооружению и освоению нового импульсного реактора.

В данном сообщении описывается импульсный реактор с инжектором ИБР-2, проект которого разрабатывается совместно Объединенным институтом ядерных исследований и проектными институтами Советского Союза. Реактор ИБР-2 проектируется как многоцелевая установка, на которой могут базироваться ядерные исследования, исследования физики твердого тела, а также прикладные работы, связанные, например, с изучением импульсных радиационных воздействий.

2. Физические исследования на ИБР-2

Перспективы развития экспериментов на мощном импульсном реакторе обсуждались в докладах, сделанных на заседаниях Ученого Совета Объединенного института ядерных исследований проф. И.М. Франком, проф. Д.И. Блохинцевым, проф. Б. Бурасом и проф. Ф.Л. Шапиро. Материал этих докладов явился научным обоснованием решения о проектировании ИБР-2. Цель настоящего раздела — дать качественное представление о направлениях исследований, которые могут быть развиты на базе ИБР-2. Заинтересованность ученых стран-участниц ОИЯИ в развитии тех или иных направлений исследований и последующая работа по оценке деталей экспериментов послужат основой для составления конкретного плана подготовки экспериментов первой очереди.

Опыт эксплуатации ИБР показал, что импульсный реактор удобен для исследований в различных областях физики. Наиболее успешно на нем развивались следующие направления:

- а). Нейтронная спектроскопия неделящихся ядер на пучках неполяризованных и поляризованных резонансных нейтронов при измерении полных и парциальных эффективных сечений взаимодействия ($\sigma_t, \sigma_n, \sigma_\gamma$).
- б). Исследование нейтронных резонансов делящихся ядер при разделении процесса деления, захвата и рассеяния.
- в). Исследование процесса (n, α) в резонансах.
- г). Анализ спектров гамма-лучей, возникающих при радиационном захвате резонансных нейтронов.
- д). Исследование эффекта поляризуемости нейтрона.
- е). Исследование взаимодействия поляризованных нейтронов с ориентированными дейтонами с целью определения набора амплитуд рассеяния.
- ж). Исследование свойств жидкостей и твердых тел методом рассеяния холодных нейтронов.
- з). Исследование структуры твердых тел методом дифракции нейтронов.
- и). Изучение дважды дифференциальных сечений рассеяния медленных нейтронов $\frac{\partial^2 \sigma}{\partial E \partial \Omega}$.

С методической точки зрения перечисленные работы объединяются тем, что все они связаны с энергетическим анализом нейтронных пучков, когда ИБР используется как источник нейтронов для спектрометрии методом времени пролета. На характер развития ядерных исследований на ИБР существенно повлияла довольно большая длительность нейтронного импульса (40 + 60 мксек в реакторном режиме и около 4 мксек в бустерном режиме). Она сильно ограничила энергетическое разрешение установки и вследствие этого - протяженность энергетической области, где проводились исследования. Вместе с тем она позволила смягчить требования к быстродействию детектирующей аппаратуры, благодаря чему удалось создать разнообразный набор детекторов для изучения парциальных эффектов и осуществить комплексный подход к изучению взаимодействия нейтронов с ядрами. Такой подход в смысле ценности полученных результатов скомпенсировал отставание ИБР по разрешению от некоторых других установок. В этой связи отметим, что на установках с короткими импульсами (порядка десятых долей микросекунды) изучение парциальных процессов взаимодействия не может быть представлено с такой полнотой, как на импульсном реакторе. Анализ материала, полученного на ИБР, позволил сделать выводы о законах распределения параметров резонансов, о средних характеристиках ядерных уровней при высоких энергиях возбуждения, о влиянии спинов на характеристики уровней и т.п. Некоторые из полученных данных (например, данные о радиационном захвате делящихся ядер, о процессе (n, α) в резонансах, о взаимодействии поляризованных нейтронов с поляризованными дейтронами) являются уникальными.

Как будет показано в следующих разделах, реактор ИБР-2 дает по сравнению с действующим реактором ИБР выигрыш в интенсивности на 3 порядка при незначительном изменении длительности импульса. Таким образом, сохранив возможности эффективной регистрации вторичного излучения и энергетического разрешения, свойственные ИБР, ИБР-2 позволит перевести ядерные исследования на совершенно новый уровень не только по отношению к ИБР, но также и по отношению к любой действующей установке аналогичного назначения.

Если из-за недостатка интенсивности выведенных пучков резонансных нейтронов до настоящего времени центр тяжести экспериментов лежал на изучении одномерных зависимостей типа энергетического хода эффективных сечений взаимодействия $\sigma = F(E)$, и только в наиболее благоприятных случаях проводились двумерные измерения (преимущественно спектры γ -лучей от захвата нейтронов в резонансах, т.е. измерялись функции типа $F(E_n, E_\gamma)$), то интенсивность пучка ИБР-2 будет достаточна для развития многомерных измерений, в которых наряду со спектрами вторичного излучения в функции энергии первичного нейтрона, смогут изучаться и другие, более тонкие свойства вторичного излучения, в частности, различные корреляции. Примерами измерений такого рода могут быть измерения спектров γ -лучей от радиационного захвата нейтронов при высоком энергетическом разрешении по γ -лучам и на большом количестве изотопов, измерения угловых распределений при резонансном рассеянии нейтронов, а также более сложные измерения спектров радиационного захвата γ -квантов между резонансами, измерение энергетических и угловых корреляций при испускании каскадных γ -квантов от резонансного захвата нейтронов и т.п. Такие измерения позволят детально изучить схемы распада и характеристики ядерных уровней, участвующих в реакции, и сделать определенные выводы относительно механизма ядерных реакций. Недостаток данных такого рода не позволяет в настоящее время провести ни удовлетворительную систематизацию параметров ядерных уровней, ни достаточно корректно сопоставить выводы теории с экспериментом. Сведения о механизме нейтронных реакций интересны в свете новых гипотез о прямых взаимодействиях (прямой захват нейтронов) и промежуточных состояниях (doorway-states) в ядерных реакциях. Измерение корреляций при делении тяжелых ядер, проведенное во многих резонансах, позволит определить влияние спина и четности составного состояния на механизм деления. В плане многомерных измерений интересны допускающие однозначную интерпретацию измерения различных корреляций при захвате поляризованных нейтронов ориентированными ядрами.

В развитие классической нейтронной спектроскопии, связанной с изучением энергии, ширины и спинов возбужденных уровней, на ИБР-2 могут

быть поставлены эксперименты по измерению дипольных магнитных и квадрупольных электрических моментов возбужденных состояний. Метод измерений предложен в работе /11/ и предполагает использование поляризованных нейтронов и ориентированных ядер. Работы этого класса относятся к совершенно новой области исследований. Освоенная методика получения пучков поляризованных резонансных нейтронов создает определенные предпосылки для первоочередной постановки таких работ.

Обычные одномерные измерения при умеренном разрешении на ИБР-2 целесообразно развивать в следующих направлениях:

а). Определение полного набора параметров для слабых резонансов в области до нескольких сотен электрон-вольт.

б). Исследования резонансов ядер, имеющих в ультрамалых количествах (трансураны и редкие изотопы). Кроме обычных способов измерений, ИБР-2, имея внутри замедлителей поток тепловых нейтронов $2 \cdot 10^{14}$ 1/см²сек (см. ниже), допускает развитие нового метода, основанного на пропускании ионов исследуемого вещества через "нейтронный газ" /12/. Этот метод пригоден и для стабильных, и для нестабильных ядер.

в). Исследование редких реакций типа (n, α) , (n, p) и т.п. в области резонансных нейтронов. Оценки показывают, что процесс (n, α) , например, с помощью ИБР-2 можно исследовать более чем на 100 ядрах. При этом одномерные измерения хода сечений могут быть дополнены измерением спектров α -частиц.

г). Изучение подпорогового деления ядер тяжелых элементов (²³⁸U, ²³²Th и др.) во многих резонансах; детальное исследование процессов деления, идущих с малой вероятностью (симметричное деление, тройное деление и т.п.).

Кроме перечисленных выше работ по структуре ядра, на ИБР-2 могут развиваться эксперименты, связанные с проверкой фундаментальных физических гипотез. К разряду таких экспериментов относятся исследования взаимодействия нейтронов с элементарными частицами и определение основных характеристик нейтрона как элементарной частицы ^x). В

^x)К этому классу работ относятся исследования поляризуемости нейтрона и n-d взаимодействия, проводившиеся на ИБР.

силу своей фундаментальности подобные исследования имеют непреходящее значение. Для Объединенного института ядерных исследований это направление представляет большой интерес, т.к. тесно соприкасается с исследованиями элементарных частиц и их взаимодействий, ведущимися на ускорителях. Среди экспериментов по исследованию нейтронов и элементарных нейтронных взаимодействий в первую очередь следует отметить следующие:

а). Непосредственное измерение эффективного сечения взаимодействия при малых энергиях. Эти эксперименты при достаточной точности являются проверкой гипотезы зарядовой независимости ядерных сил. Косвенные определения длин $n-n$ рассеяния из экспериментов с $n+d$, $d+T$ и $\pi+d$ взаимодействиями дали противоречивые результаты.

б). Измерение асимметрии в β -распаде поляризованных нейтронов. Это наиболее чистый опыт по определению амплитуд и фаз слабых взаимодействий и по установлению варианта взаимодействия, т.к. на его результаты не влияет структура ядра. Имеющиеся данные по асимметрии β -распада нейтронов (см., например, /13/) нуждаются в уточнении.

в). Измерение электрического дипольного момента нейтрона с целью проверки временной инвариантности.

г). Измерение электрического заряда нейтрона, гравитационной постоянной времени, времени его жизни и т.п.

Все эти эксперименты для своей постановки и достижения необходимой точности требуют высоких нейтронных потоков. Опыты по непосредственному измерению $n+n$ взаимодействия предполагают использование "нейтронного газа" внутри вакуумированной полости, и никогда не проводились вследствие того, что достигнутые плотности нейтронов были недостаточны. При обеспечении нейтронных плотностей (по-видимому, порядка 10^{16} 1/см²сек) эксперименты могут быть поставлены на стационарных реакторах. Однако использование импульсного источника, подобного ИБР-2, дает существенные преимущества. Нагляднее всего это можно проиллюстрировать на примере экспериментов с $n-n$ взаимодействием. Наиболее простая схема такого эксперимента /14/ основана на регистрации числа нейтронов, вылетающих из внутреннего пространства

полости с высокой плотностью нейтронов с помощью детектора, на который исключено попадание нейтронов, вышедших из стенки полости. Измеряемый эффект здесь определяется числом нейтронов, попавших на детектор благодаря рассеянию на нейтронах же внутри полости. В стационарном случае эффект можно грубо оценить по формуле

$$I_{cm} = \sigma \frac{\Phi^2}{v} V \Omega = \sigma \frac{\alpha^2}{v^2} W^2 V \Omega,$$

где I_{cm} - число нейтронов, попавших на детектор за 1 сек, σ - эффективное сечение n-n-рассеяния, v - скорость нейтронов внутри полости, V - объем полости, просматриваемый детектором, Ω - телесный угол на детектор, α - коэффициент пропорциональности, W - мощность источника, "питающего" полость нейтронами. Для импульсного источника

$$I_p = \sigma \frac{\Phi_p^2}{v} V_p \Omega \Theta_{эфф. n} = \sigma \frac{\alpha_p^2}{v} W_p^2 V_p \Omega_p \Theta_{эфф. n} = \\ = \sigma \frac{\alpha_p^2}{v} \frac{\langle W \rangle^2}{\Theta_{эфф. n}^p},$$

где Φ_p и W_p - соответственно поток и мощность в импульсе, $\langle W \rangle$ - средняя мощность импульсного источника, $\Theta_{эфф. n}$ - эффективная длительность нейтронного импульса источника, p - частота нейтронных импульсов источника.

При тождественности условий формирования нейтронного газа в обоих случаях и при $V_p = V$ и $\Omega_p = \Omega$

$$\frac{I_p}{I} = \frac{\langle W \rangle^2}{W^2} \frac{1}{\Theta_{эфф. n}^p} = \frac{1}{\Theta_{эфф. n}^p},$$

если $\langle W \rangle = W$. Для ИБР-2 $\Theta_{эфф. n} \approx 2 \cdot 10^{-4}$ сек $\cdot 5$ 1/сек $= 10^{-3}$. Таким образом $\frac{I_p}{I} = 10^3$, т.е. имеем тысячекратный выигрыш в сравнении со стационарным реактором той же мощности.

Скорость фоновых отсчетов, связанная с рассеянием на остаточном газе $I_B = \sigma_B d \alpha W V \Omega$ (d - плотность ядер остаточного газа, σ_B - эффективное сечение рассеяния на газе) одинакова при стационарном и импульсном случаях.

Приведенные рассуждения наглядно иллюстрируют выгоду использования импульсных устройств для проведения тех опытов, которые, на первый взгляд, не нуждаются в импульсности. В этой же связи отметим еще одно обстоятельство. Отношение эффекта к фону определяется выражением:

$$\frac{I_p}{I_B} = \frac{\sigma}{\sigma_B} \frac{a_p}{\Theta_{эфф.}} < W >.$$

Так как с ростом средней мощности размеры зоны и геометрия замедлителей изменяются мало, соотношение эффекта к фону растет линейно с мощностью, т.е. для экспериментов такого класса более благоприятны условия при большой мощности реактора.

ИБР-2 открывает широкие возможности для исследований редких короткоживущих активностей и для активационного анализа. Прикладное значение этих работ трудно переоценить. Предложения о постановке в ОИЯИ работ по активационному анализу сделаны Центральным научно-исследовательским институтом физики Венгерской академии наук. По мнению венгерских ученых, с помощью ИБР-2 можно повысить точность определения ряда элементов более чем на 2 порядка, и, благодаря этому, удовлетворить возросшие запросы промышленности. Наиболее перспективная область применения ИБР-2 с импульсным потоком быстрых нейтронов внутри зоны $3 \cdot 10^{18}$ 1/см²сек - активационный анализ на содержание элементов, активирующихся быстрыми нейтронами и дающими при этом короткоживущие активности. Возможным вариантом метода активационного анализа является анализ элементов по изотопам, имеющим короткий период распада. В таблицах 1 и 2, заимствованных нами из предложений ЦИФИ Венгерской АН по экспериментам на ИБР, приведены важнейшие данные об изотопах и элементах, наиболее удобных для активационного анализа на ИБР-2.

Для работ в области конденсированных сред ИБР-2 также открывает новые возможности. Как показывают оценки, в опытах по дифракции и рассеянию медленных нейтронов на ИБР-2 можно получить интенсивности в 8+100 раз (в зависимости от типа экспериментов) большие, чем на новом реакторе HFBR (США), имеющем мощность 40 Мвт и потоки

Таблица 1

Элементы, которые при помощи реактора ИБР-2 можно определить с высокой, по сравнению с другими методами, чувствительностью, и их важнейшие ядерные данные

Элемент	Реакция	Конечный продукт	Продолжительность полураспада, сек	Энергия гамма, Мэв
O	n, p	^{16}N	7,35	6,1
F	n, γ	^{20}F	II	I,63
F	n, p	^{19}O	29	0,20
Na	n, α	^{20}F	II,0	I,63
S	n, p	^{34}P	I2,4	2,1
Sc	n, γ	^{46m}Sc	20	0,14
Se	n, n n, γ $n, 2n$	^{77m}Se	I7	0,160
Y	n, n	^{89m}Y	I6,1	0,915
Tb	$n, 2n$	^{158m}Tb	II	0,111
W	n, n n, γ $n, 2n$	^{183m}W	5,3	0,105
Pt	n, γ	^{199m}Pt	I4	0,39
Au	n, n	^{197m}Au	7,2	0,279

Таблица 2

Элементы, определяемые при помощи реактора ИБР-2, на основе которых возникают изотопы с продолжительностью полураспада менее 1 секунды.

Реакция	Излучение	Продолжительность полураспада, сек	Энергия, МэВ
$^{11}\text{B} (n, \alpha) ^8\text{Li}$	бета	0,9	13
$^{11}\text{B} (n, \gamma) ^{12}\text{B}$	бета	0,027	13,4
$^{12}\text{C} (n, p) ^{12}\text{B}$	бета	0,027	13,4
$^9\text{Be} (n, \alpha) ^6\text{He}$	бета	0,8	3,5
$^7\text{Li} (n, \gamma) ^8\text{Li}$	бета	0,9	13
$^{15}\text{N} (n, \alpha) ^{12}\text{B}$	бета	0,027	13,4
$^{40}\text{Ca} (n, 2n) ^{39}\text{Ca}$	бета	0,9	5,6
$^{206}\text{Pb} (n, \gamma) ^{207m}\text{Pb}$	гамма	0,8	1,4

порядка 10^{15} $1/\text{см}^2$ сек. Высокая интенсивность импульсных пучков ИБР-2 позволит значительно повысить точность измерений в структурных исследованиях методом дифракции и рассеяния как за счет сокращения времени измерений, так и за счет улучшения энергетического и углового разрешений. Все это дает возможность детального изучения сложных структур, которые недоступны в настоящее время (сложные многокомпонентные твердые и жидкие системы, органические молекулы, сверхпроводящее состояние вещества, полупроводники и т.п.). В этой связи отметим высказанное в ранее упоминавшихся предложениях ЦИФИ Венгерской АН пожелание о постановке на ИБР-2 работ по исследованию двухфазных и двухкомпонентных сред с помощью неупругого рассеяния нейтронов, предложения Института ядерных исследований в Сверке и Варшавского университета о постановке нейтронографических исследований кристаллических и магнитных структур методом времени пролета.

Импульсность пучков ИБР-2 может быть использована для изучения нестационарных процессов (фазовых переходов), протекающих при самых различных условиях (например, при действии больших давлений, сильных магнитных полей, при импульсных нагрузках и т.п.). Могут изучаться изменения фононных и магнонных спектров кристаллов под действием сильных внешних полей.

Для исследования магнитных структур и для исключения влияния эффектов когерентного рассеяния на данные о частотных распределениях на ИБР-2 могут быть созданы интенсивные пучки поляризованных медленных нейтронов. Методика поляризации нейтронов в тепловой и резонансной областях методом пропускания через водородосодержащий кристалл, как известно, отработана на ИБР. В области малых энергий применимы и другие методы, в частности, пропускание нейтронов через намагниченные кристаллы. Одна из модификаций этого метода, позволяющая, наряду с поляризацией пучка, сократить длительность нейтронного импульса, предлагается ЦИФИ Венгерской АН для изучения коллективных возбуждений в магнитных кристаллах вблизи точки фазового перехода и в случае присутствия примесных атомов.

Новой для ОИЯИ областью исследований, имеющей большое практическое значение, является исследование радиационных повреждений. До настоящего времени такие работы ставились преимущественно в стационарных полях. Высокая интенсивность индивидуальных импульсов ИБР-2 позволит изучать динамику развития и отжига радиационных повреждений. ИБР-2 дает широкий спектр излучений для генерации радиационных повреждений (от спектра деления внутри активной зоны до спектра холодных и ультрахолодных нейтронов в замедлителях). Это может представлять интерес с точки зрения разделения эффектов, вызванных образованием дефектов в решетке и эффектов, вызванных превращением атомов в узлах решетки за счет поглощения нейтронов.

Приведенное выше описание направлений исследований, возможных на ИБР-2, не претендует на полноту, но в достаточной степени характеризует перспективы использования ИБР-2 в режиме реактора и в режиме бустера. В принципе возможны и другие режимы, в которых линейный ускоритель работает независимо от реактора:

а) работа на неразмножающую мишень при формировании коротких импульсов нейтронов (от 0,01 мксек до 0,1 мксек) с целью получения рекордных энергетических разрешений;

б) работа с выведенным электронным пучком;

в) работа с тормозным излучением при получении монохроматических пучков γ -лучей.

Эти режимы представляют значительный интерес, но, поскольку их осуществление не планируется при первой очереди сооружений, исследования, связанные с ними, не рассматриваются. Список работ, возможных на ИБР-2 в реакторном и импульсном режимах, приведен в Приложении 1.

3. Общее описание установки ИБР-2

ИБР-2 проектируется как интенсивный источник нейтронов для проведения работ в широкой области ядерной физики, физики твердого тела и в некоторых прикладных направлениях. Основное требование к источнику такого класса - обеспечение высоких интенсивностей нейтронов с энер-

гией от долей эв до сотен кэв при длительности импульса от 1 до 100 мксек.

Как уже было отмечено во введении, наиболее рациональным решением этой задачи является создание установки, объединяющей импульсный реактор на быстрых нейтронах и высокопоточный электронный ускоритель - инжектор коротких импульсов нейтронов, размножающихся в реакторе. Анализ технических возможностей и требований к характеристикам нейтронных пучков позволил установить следующие основные параметры узлов установки.

А. Реактор

Тип - импульсный, на быстрых нейтронах, с подвижным отражателем.

Горючее - ^{239}Pu

Средняя тепловая мощность - 10 Мвт.

Частота следования импульсов - переменная от 5 сек^{-1} до 50 сек^{-1} .

Длительность импульса - $70+80$ мксек.

Время жизни ценности нейтронов деления - $3+4 \cdot 10^{-8}$ сек.

Б. Инжектор

Тип - линейный индукционный ускоритель электронов (ЛИУ)

Энергия электронов - 30 Мэв.

Ток в импульсе - 250 а.

Длительность импульса - 0,5 мксек.

Частота импульсов - 50 сек^{-1} .

Сочетание импульсного реактора на быстрых нейтронах и высокопоточного линейного ускорителя позволяет осуществить работу как в бустерном режиме при длительностях импульса от нескольких мксек до десятка микросекунд, так и в реакторном режиме при длительностях импульса до 100 мксек. При работе в бустерном режиме мощность реактора зависит от ширины нейтронного импульса (при фиксированных параметрах

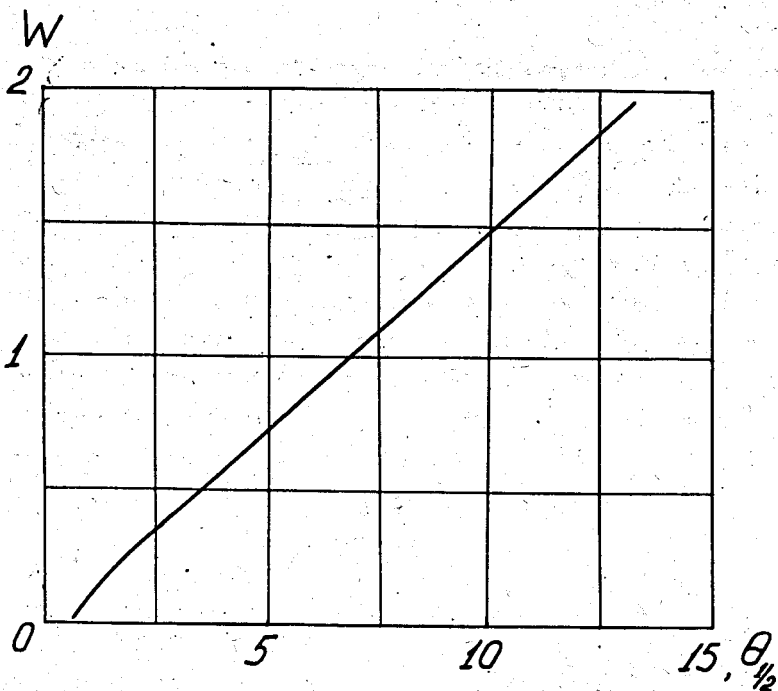


Рис.1. Зависимость средней мощности реактора ИБР-2 от полуширины импульса для бустерного режима; полуширина импульса $\theta_{1/2}$ приведена в мксек, мощность W - в мегаваттах.

инжектора и бустера). Эта зависимость для ИБР-2 изображена на рис.1.

Для первой загрузки активной зоны реактора в качестве ядерного горючего будет использована двуокись плутония PuO_2 , прошедшая длительное испытание в реакторе БР-5 и являющаяся в настоящее время самым надежным топливом для реакторов на быстрых нейтронах. Однако с двуокисью плутония параметры импульсного источника несколько ниже возможных; средняя мощность не превышает 4 Мвт, а длительность импульса достигает 90+100 мксек. В проекте предусмотрена возможность замены топлива на более концентрированное (металлический плутоний, карбид плутония), если таковое будет разработано и испытано в дальнейшем, что позволит достичь значений основных параметров, которые приводятся в таблице.

В первой очереди сооружений ИБР-2 предполагается осуществить бустерный и реакторный режимы. Впоследствии могут быть осуществле-

ны режим работы на неразмножающую мишень, работа с выведенным электронным пучком и работа с пучками тормозного излучения.

Реактор ИБР-2 предполагается разместить в районе существующего экспериментального павильона на 100-метровой пролетной базе реактора ИБР. Размещение сооружений показано на рис. 2. Реактор располагается в центральной части биологической защиты, выполненной в виде двух концентрических колец (рис. 3). Пространство между кольцами защиты предназначено для размещения экспериментального оборудования. Оно служит также местом монтажа и демонтажа стационарных отражателей, водяных замедлителей, пневмопочт и т.п., устанавливаемых на откатных защитных тележках. Во внутренней полости биологической защиты размещается шахта, в центре которой устанавливается корпус реактора с активной зоной (рис. 4). Сверху шахта перекрывается разборными чугунными блоками, заполняемыми бетоном. Через внутреннюю секцию защиты проходят 14 горизонтальных и 3 наклонных канала для вывода нейтронных пучков. Все каналы перекрываются шиберами с механическими приводами. Во внутренней секции защиты имеется три ниши: две для установки откатной защиты со стационарным отражателем и одна - для установки подвижного отражателя. Ниши стационарного отражателя перекрываются шиберами, а ниша подвижного отражателя - откатной защитной дверью. Нижний конец корпуса реактора, представляющий собой ряд концентрических труб с максимальным наружным диаметром 185 мм, выходит в подреакторный бокс, служащий местом монтажа канала мишени. В этом боксе размещаются конечная часть электроновода линейного ускорителя и отклоняющие магниты, разворачивающие пучок электронов на 90° . Замедлители устанавливаются в защитный шибер, который с помощью механизма транспортировки под углом 40° к горизонтали вводится во внутреннюю полость защиты так, что замедлитель располагается в непосредственной близости от отражателей реактора. Схема горизонтальных каналов для вывода нейтронных пучков изображена на рис. 4. На этом же рисунке показано расположение замедлителей вокруг активной зоны реактора. Замедлители 1,2,4 - водяные, каждый - из трех независимых секций, что позволяет изменять их толщину (35,45,55 мм), вы-

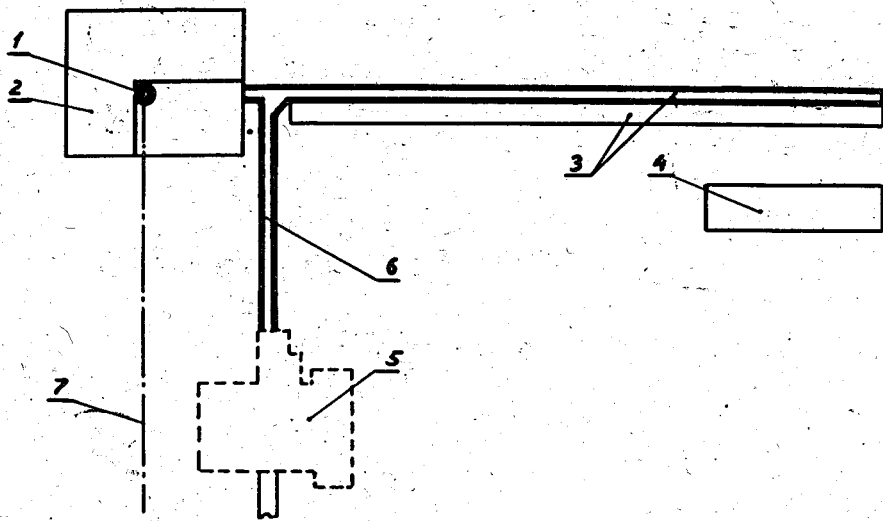


Рис.2. Схема размещения комплекса ИБР-2. 1 - реактор; 2 - здание реактора с экспериментальным залом; 3 - корпус индукционного ускорителя; 4 - здание измерительного центра; 5 - здание действующего реактора ИБР; 6 - галерея 100-метрового нейтроновода ИБР; 7 - 1000-метровый нейтроновод ИБР-2.

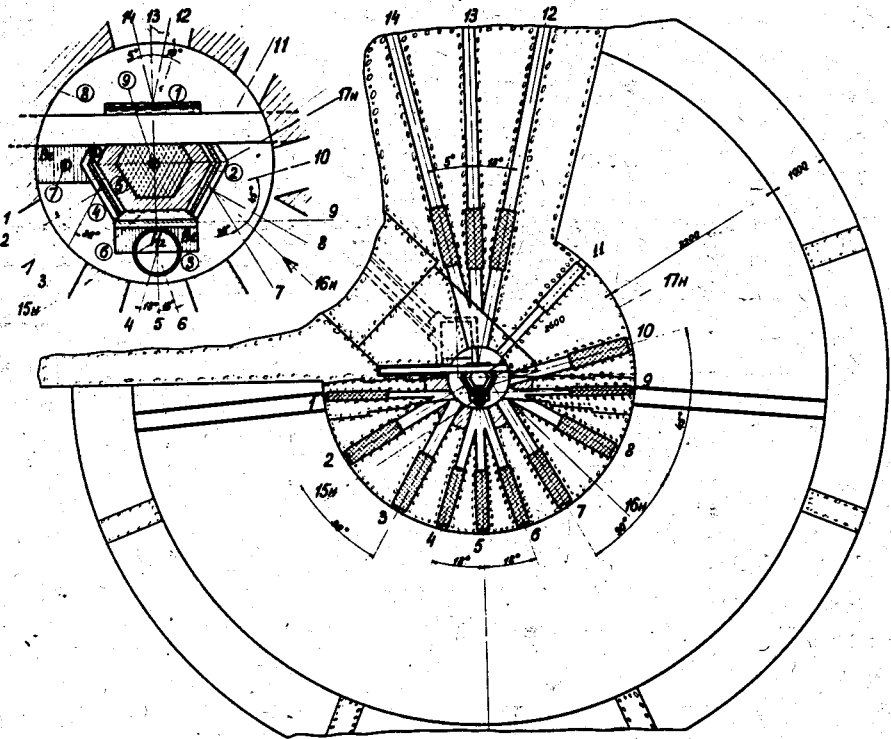


Рис.3. Схема защиты и горизонтальных экспериментальных каналов реактора ИБР-2. 1 - замедлитель резонансных нейтронов; 2 - замедлитель тепловых нейтронов; 3 - источник холодных нейтронов; 4 - замедлитель тепловых нейтронов; 5 - стационарный отражатель; 6 - водяной замедлитель; 7 - пневмопочта на быстрые нейтроны - в отражателе; 8 - пневмопочта на быстрые нейтроны - в центре активной зоны; 9 - пневмопочта на быстрые нейтроны - в центре активной зоны.

бирая ее так, чтобы обеспечить оптимальные условия выхода нейтронов в требуемом энергетическом диапазоне. Замедлитель 1, располагаемый за подвижным отражателем, предполагается использовать в основном как источник резонансных нейтронов. Этот замедлитель просматривается тремя горизонтальными каналами диаметром 200 мм. Каналы 12 и 13 являются началами 1000-метрового и 500-метрового нейтронных каналов. Замедлители 2 и 4, располагаемые за стационарными отражателями, предполагается использовать в качестве источников тепловых и надтепловых нейтронов. Они просматриваются шестью горизонтальными каналами диаметром 200 мм и двумя наклонными, диаметром 150 мм каждый. Каналы 1 и 9 представляют вместе сквозной тангенциальный канал. Он может использоваться, например, для работ на "нейтронном газе". Оба канала монтируются в защитных откатных вставках, что позволяет при необходимости ориентировать их на замедлители 4 и 2. Для генерации нейтронов, обогатенных холодными нейтронами ($\lambda = 4 \text{ \AA}^0$), за замедлителем 3 размещается жидководородный замедлитель. Объем жидкого водорода в камере замедлителя - 1000 см^3 . Для охлаждения жидководородного замедлителя используется газообразный гелий с входной температурой $11,5^\circ\text{K}$.

Гелиевая установка производительностью 450 ккал/час обеспечивает отвод тепла с камеры замедлителя с суммарным тепловыделением около 400 ккал/час. При этом максимальная температура водорода в камере составляет $23-24^\circ\text{K}$. Кипение водорода устраняется за счет поддержания в камере замедлителя давления около 4 атм. Ожидается, что средняя температура нейтронов, покидающих замедлитель, будет составлять 50°K . Холодный замедлитель просматривается горизонтальными каналами (4,5,6) диаметром 150 мм каждый. Для увеличения выхода надтепловых нейтронов рассматривается возможность установки на реакторе горячего замедлителя. В качестве материала для горячего замедлителя предполагается использовать BeO_2 при температуре $1800-2000^\circ\text{C}$. Разогрев замедлителя будет осуществляться за счет тепловыделений от поглощения ядерных излучений реактора. Предусматривается установка трех пневмопочт: поз. 7 - для облучения тепловыми нейтронами, поз. 8 - для облу-

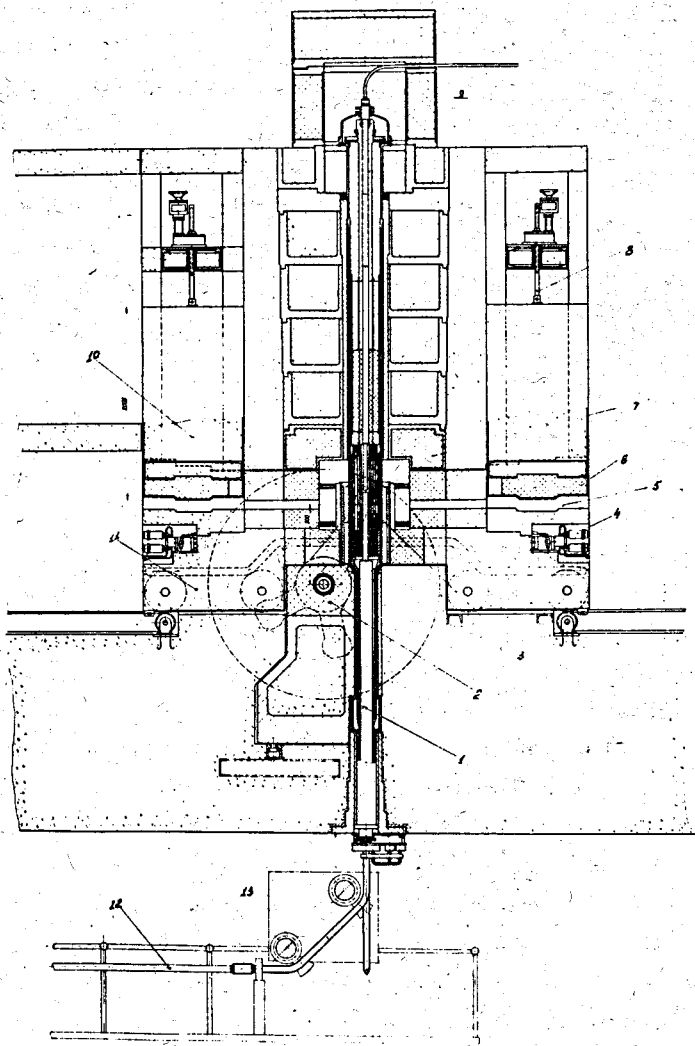


Рис.4. Вертикальный разрез ИБР-2. 1 - канал мишени ускорителя; 2 - ротор подвижного отражателя; 3 - активная зона; 4 - гидропривод стержней быстрой аварийной защиты; 5 - экспериментальный канал для нейтронного пучка; 6 - шибер экспериментального канала; 7 - тепловая и радиационная защита; 8 - привод шибера; 9 - канал центральной пневмопочты; 10 - внутренняя бетонная биологическая защита; 11 - откатная защита с отражателями и замедлителями; 12 - электроновод; 13 - магниты поворота электронного пучка.

чения быстрыми нейтронами, поз. 9 - для облучения быстрыми нейтронами в центральном канале реактора.

Охлаждение образцов в пневмопочтах будет осуществляться газообразным гелием. Предусматривается возможность в пневмопочтах 7 и 8 проводить облучение образцов при низких температурах (50-100°K), используя в качестве хладагента холодный гелий с входной температурой около 12°K. Изучается возможность установки в сквозном тангенциальном канале (каналы 1 и 9) быстрой пневмопочты, которая позволила бы проводить облучения за время одного импульса мощности реактора. В таблице 3 и на рис. 5 приведены некоторые расчетные данные об ожидаемых нейтронных потоках на ИБР-2.

4. Реактор

ИБР-2 - реактор на быстрых нейтронах с компактной активной зоной из ^{239}Pu (в форме двуокиси плутония) типа испытанной в эксплуатации зоны стационарного реактора БР-5 /15/. Импульсное действие реактора обеспечивается так же, как и в действующем импульсном реакторе ИБР за счет периодического изменения реактивности системы, но в отличие от ИБР, где реактивность изменяется за счет перемещения части активной зоны, в ИБР-2 пульсации реактивности создаются перемещением части отражателя по отношению к активной зоне. Такое отличие обусловлено тем, что на реакторе большой мощности, каким является ИБР-2, нельзя было бы обеспечить удовлетворительные условия охлаждения подвижной части активной зоны.

Активная зона реактора в плане представляет собой неправильный шестигранник (рис. 6); набранный из кассет типа кассет реактора БР-5 с шагом 27 мм. Кассеты вставлены с натягом в нижнюю опорную стальную плиту. В каждой кассете по 7 твэлов диаметром 8,65 мм с покрытием 0,4 мм; твэлы закреплены на двух концах и дистанционированы проволокой диаметром 0,5 мм. Высота активной части твэла составляет 40 см. В активной зоне располагается 71 рабочая кассета. Перегрузка кассет осуществляется без нарушения герметичности корпуса реактора;

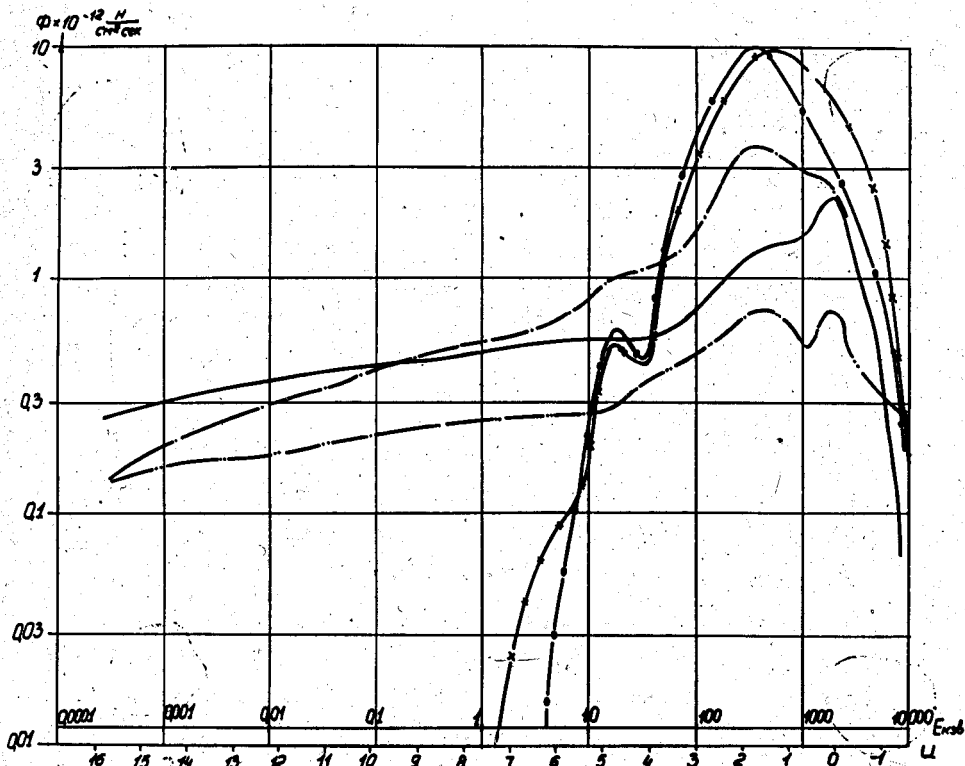


Рис.5. Энергетическая зависимость интенсивности утечки нейтронов.
 Φ - утечка нейтронов с 1 см^2 в 1 сек в единичном интервале логарифма; E - энергия нейтрона в экэв; излучающая поверхность:
 — x — x — активная зона;
 — o — o — стационарный отражатель;
 — • — • — 2 см воды за подвижным отражателем;
 — — — основной замедлитель;
 — •• — •• — замедлитель за стационарным отражателем.

Таблица 3

Характеристики замедлителей и каналов пневмопочт

ИБР-2

Толщина отражателя, мм	Материал замедлителя	Температура замедлителя, °К	Толщина замедлителя, мм	Средний поток нейтрон		Полуширина импульса		Пиковый поток нейтрон		$\Delta\Phi_{пик}/\Delta\lambda$ для нейтрон	$\Delta\Phi_{пик}/\Delta E$ E = 0,7 эВ нейтрон	Примечание
				см ² сек, $\times 10^{-12}$	В интервале	мксек	т.н. 0,46+1эВ	$\Phi_{пик}(M=5 \text{ I/сек}),$ см ² сек $\times 10^{-15}$	т.н. 0,46+1эВ			
100	H ₂ O	300	20	2,2	0,2	9I	90	4,90	0,44	I,6	8,0	
80	H ₂ O	300	50	3,5	0,23	I04	90	6,00	0,5I	2,0	9,5	
40	H ₂ O	300	50	5,8	0,4	I04	90	9,7	0,89	3,2	I6,5	
40	H ₂	24	I00	5,6	-	I50	-	5,6	-	4,2*	-	Холодный замедлитель
80	H ₂ O+Be	300	пневмопочта	80	-	200	-	64	-	-	-	
40	"-	300	"-	IIO	-	200	-	86	-	-	-	
80	без замедлит.	-	"-	быстрые нейтр.	50		90		III	-	-	I0мэв+0,4кэв
В зоне	"-	-	"-	550		90		I220		-	-	I0мэв+0,4кэв

Мощность реактора - 4 Мвт

Частота следования импульсов - 5 I/сек

Длительность импульса - 90 мксек

* - для $\lambda = 5 \text{ \AA}$

отработавшие кассеты перед выгрузкой расхлаживаются в среде натрия в пространстве над активной зоной. Система перегрузки конструктивно мало отличается от системы перегрузки БР-5 /16/. 7 центральных ячеек зоны занимает канал, нижняя часть которого используется для размещения мишени линейного ускорителя, верхняя - для облучения образцов. Мишень располагается на половине высоты активной зоны. В качестве материала мишени на первом этапе выбран вольфрам, охлаждаемый независимым натриевым контуром.

Активная зона размещается в двухстенном стальном корпусе; пространство между стенами является контрольным на протекание натрия и служит для подачи горячего воздуха при разогреве аппарата. Боковые стороны шестигранника защищены вольфрамовыми блоками толщиной 80 мм, выполняющими роль органов регулирования. Вольфрамовые блоки охлаждаются воздухом. К наибольшей стороне шестигранника примыкает основной подвижный отражатель и дополнительный подвижный отражатель, расположенные соосно. Роторы подвижных отражателей имеют три трапециевидных выступа, один из которых - собственно отражатель, а два других служат для баланса. Радиус подвижного отражателя - 120 см, толщина основного отражателя - 6,5 см, дополнительного - 3,5 см. Средняя ширина отражателя - 24 см. Ротор подвижного отражателя приводится во вращение со скоростью 3000 об/мин. электродвигателем переменного тока. Вращение дополнительного отражателя происходит от того же двигателя через редуктор с переменным передаточным отношением 1:2, 1:5 и 1:10. Таким образом, вместе с тем случаем, когда дополнительный отражатель не вращается, получается 4 возможных частоты следования импульсов реактора - 50,25,10,5 импульсов/сек. Роторы подвижных отражателей вместе с двигателем и редуктором заключены в тонкостенный герметичный кожух, заполненный гелием. Гелиевая среда позволяет уменьшить мощность привода на вращение отражателей. Кроме того, гелий отводит тепло от подвижных отражателей, которые нагреваются в результате трения и радиационного облучения из активной зоны.

В принятой схеме расположения регуляторов компенсирующие регуляторы КС-1 и КС-2 предназначены для компенсации 5% выгорания ²³⁹Pu и температурного эффекта реактивности. Промежуточный регулятор (эф-

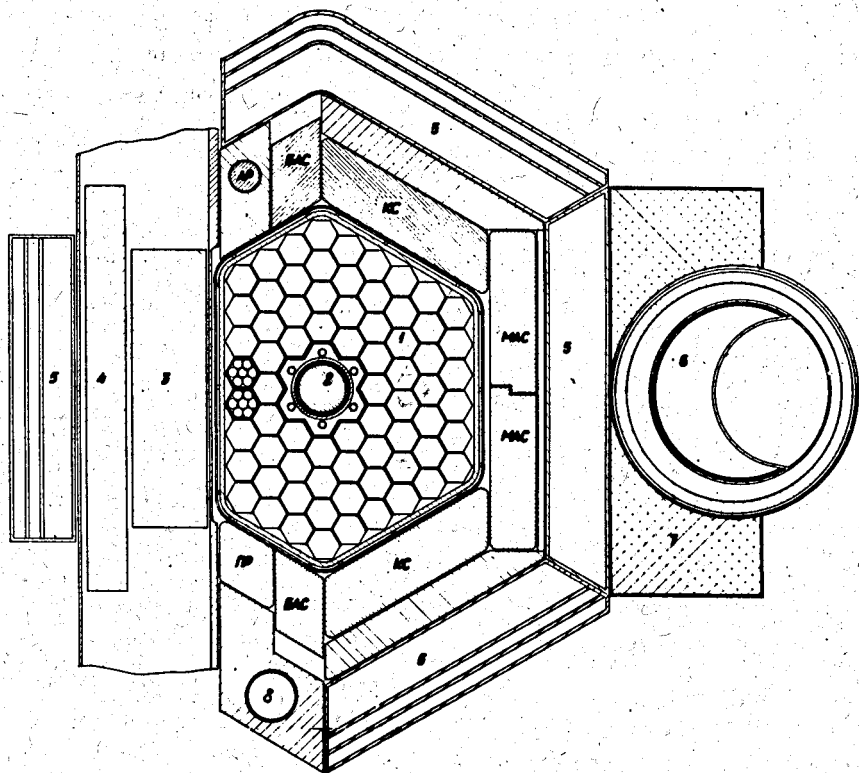


Рис.6. Схема активной зоны реактора, 1 - пакет тепловыделяющих элементов; 2 - мишень ускорителя; 3 - основной подвижный отражатель; 4 - дополнительный подвижный отражатель; 5 - секционированные водяные замедлители; 6 - "холодный" замедлитель; 7 - отражатель "холодного" замедлителя; 8 - канал пневмопочты в отражателе; БАС - стержни быстрогодействующей аварийной защиты; МАС - стержни медленной аварийной защиты; КС - компенсирующие стержни; ПР - промежуточный регулятор; АР - автоматический регулятор.

фективность $0,8 \cdot 10^{-2}$) предназначена для плавного изменения реактивности при пуске реактора. Автоматический регулятор перемещается приводом от шагового двигателя, обладающего малой инерционностью. Безопасность реактора обеспечивается четырьмя блоками аварийной защиты, общей эффективностью 3,2%, из которых два (БАЗ) приводятся в действие гидравлической машиной поступательного действия. Срабатывание быстродействующей аварийной защиты (эффективность БАЗ 0,4%) происходит между импульсами мощности за время 0,02 сек. Вывод медленнодействующей аварийной защиты (МАЗ) осуществляется под действием собственной тяжести при отключении электромагнитов.

Система охлаждения активной зоны ИБР-2 в принципе сходна с системой стационарного реактора БР-5, которая доказала свою надежность в течение длительной эксплуатации. ^{от ИБР-2} Схема охлаждения - трехконтурная двухпетлевая. В первом и втором контурах теплоносителем является жидкий натрий, в третьем - воздух. Двухпетлевая схема принята из соображений безопасности. Производительность одной петли достаточна для обеспечения работоспособности реактора при пониженной мощности. Циркуляция натрия в первом и втором контурах поддерживается электромагнитными насосами. Температура натрия на входе в зону 300°C , на выходе - 400°C . Расход теплоносителя при средней мощности 4 Мвт. 120т/час. Максимальный тепловой поток на поверхности тепловыделяющих элементов 10^6 ккал/м²час, температура твэла при этих условиях = 1860°C .

В проекте системы охлаждения предусмотрены условия, обеспечивающие естественную циркуляцию натрия в случае выхода рециркуляционных насосов из строя.

Характеристики реактора приведены в таблице 4.

5. Инжектор для ИБР-2

Многолетний опыт работы системы "ИБР-микротрон" показал ее высокую эффективность как импульсного источника нейтронов. Значения наиболее употребительных теперь для этой системы коэффициентов умножения нейтронов лежат в пределах от 100 до 200, что соответствует оп-

Таблица 4
Характеристики реактора ИБР-2

Средняя тепловая мощность	4 Мвт
Мощность в импульсе	
а) при частоте 5 сек^{-1}	7700 Мвт
б) при частоте 50 сек^{-1}	700 Мвт
Мощность, выделяемая между импульсами	0,22 Мвт
Мощность, выделяемая в побочных импульсах при частоте 5 сек^{-1}	0,026 Мвт
Энергия импульса при частоте 5 сек^{-1}	$2,5 \cdot 10^{16}$ делений
Утечка нейтронов из реактора в телесный угол 4π	$1,75 \cdot 10^{17}$ н/сек
Полуширина импульса мощности	
при частоте 5 сек^{-1}	90 мксек
при частоте 50 сек^{-1}	99 мксек
Эффективное время жизни нейтронов	$4,2 \cdot 10^{-8}$ сек
Средняя мощность реактора в бустерном режиме при полуширине импульса 10 мксек	1,5 Мвт
Объем активной зоны	17,9 л
Загрузка	88 кг
Кампания реактора при номинальной мощности до выгорания 5%	1000 суток

тимальной длительности электронного импульса - 1-2 мксек и длительности нейтронной вспышки - 2-4 мксек. Мощность электронного пучка от инжектора ИБР-2 будет на несколько порядков выше, чем от микротрона. Поэтому с целью увеличить разрешение в экспериментах длительность импульса электронов, инжектируемых в ИБР-2, сокращена и будет составлять 0,5 мксек при достаточной интенсивности нейтронных вспышек.

В качестве инжектора выбран электронный ускоритель, так как по сравнению с ускорителями тяжелых частиц он может быть сделан существенно проще и надежнее в работе.

Принцип действия ЛИУ /17,18,19/ и его конструктивная схема максимально просты. ЛИУ представляет собой ряд импульсных трансформаторов (тороидальных индукторов), для которых электронный пучок, ускоряемый вдоль оси индукторов, является вторичной обмоткой. Показано /18/, что стоимость ЛИУ существенно снижается, а КПД - увеличивается при снижении диаметра индукторов. Поэтому наружный диаметр индукторов ЛИУ-30 по пермаллою выбран 260 мм. Ожидается, что средняя мощность пучка ЛИУ-30 составит при этом 15% общей мощности электропитания ускорителя. Параметры ЛИУ приведены в таблице 5.

Узлы, из которых состоит ЛИУ-30, имеют следующие характеристики:

Электронная пушка рассчитана на импульсное напряжение 300-500кв и ток эмиссии с катода 300 а.

Индукторы, в каждом из которых прирост энергии электронов составляет 23-25 кэв, будут изготовлены из 50% железо-никелевого пермаллоя с толщиной ленты 20 мк. Наружный и внутренний радиусы сердечников будут равны соответственно 130 и 50 мм. Ширина пермаллоевой ленты - 90 мм.

Для перемангничивания каждого индуктора потребуется максимальный ток в импульсе 400 а. Индукторы охлаждаются дистиллированной водой. Перемангничивающие импульсы получают от импульсных модуляторов с ионными коммутаторами. В качестве накопителей энергии используются искусственные неоднородные длинные линии с емкостной реакцией и с изменяющимся от ячейки к ячейке по определенному закону вол-

Таблица 5
 Параметры ЛИУ-30

Энергия электронов	30 Мэв
Ток в импульсе	250 а
Длительность импульса	0,5 мксек
Частота повторений	50 I/сек
Диаметр катода	80 мм
Диаметр поперечного сечения пучка	20 мм
Наружный диаметр индуктора	260 мм
Длина ускорителя	160 м
Вес пермаллоя индукторов	40 т
Мощность электропитания установки (средняя)	1,35 Мвт
Мощность электронного пучка (средняя)	0,2 Мвт
Число нейтронов в импульсе на толстой неразмножающей урановой мишени	$1,2 \cdot 10^{13}$ I/импульс

новым сопротивлением. Ионными коммутаторами служат мощные тиратроны. Один модулятор питает одновременно несколько индукторов. Заряд накопительной линии осуществляется от источника постоянного тока через зарядный дроссель, который обеспечивает так называемый резонансный режим заряда. В этом случае напряжение на линии превышает напряжение источника питания.

Ввиду большой длины ускорителя вводится временная программа подачи ускоряющих импульсов на индукторы, согласованная с прохождением электронов через них.

Фокусировка и коррекция отклонений оси пучка от оси индукторов выполняется короткими соленоидами, устанавливаемыми в разрывах между индукторными секциями и системой токовых витков. Отдельные фокусирующие и корректирующие элементы питаются независимо.

Ввиду большой длины ускорителя магнитное поле земли в разрывах между индукторными секциями будет отклонять траектории электронов от оси ускорителя. Это влияние компенсируется упомянутой выше системой токовых витков.

Контроль за пучком ускоренных электронов будет осуществляться датчиками, измеряющими полный ток электронов, его пространственное распределение и положение пучка относительно оси ускорителя.

Над созданием проекта ИБР-2 трудился большой коллектив научных и технических работников. Кроме авторов настоящей статьи, в разработке отдельных узлов реактора и ускорителя, экспериментальных работах и организации проектных работ были заняты т.т. А.В. Андросов, П.С. Анцупов, А.П. Бовин, В.П. Белов, В.В. Бондаренко, Б.Н. Бунин, БИ. Воронов, А.И. Воропаев, Е.Н. Волков, А.П. Веселкин, М.А. Гашев, И.Я. Емельянов, М.И. Егоров, Е.Ф. Ефимов, А.Д. Жирнов, В.П. Зиновьев, О.Л. Комаров, В.И. Константинов, Н.Ф. Косенков, В.А. Макасов, И.Ф. Малышев, С.М. Маркович, Л.А. Меркулов, Ю.И. Митяев, С.П. Перевезенцев, В.И. Соколов, А.Г. Сорокин, П.Л. Тютюников, Ф.И. Украинцев, А.Г. Филиппов, Т.М. Фомичева, Р.П. Фидельская, Р.В. Харьюзов и др.

Авторы проекта выражают свою признательность т.т. И.Н. Аристархову, Г.Е. Блохину, И.С. Головнину, В.Г. Золотухину, Т.С. Меньшиковой за ценные консультации, т.т. В.И. Кочкину, В.В. Крайнему, А.И. Невиннице, А.В. Ракистскому за помощь в выполнении расчетных работ.

Коллектив авторов глубоко благодарен всем, кто в той или иной степени способствовал успешному ходу проектных работ.

Приложение 1

Перечень экспериментальных направлений на ИБР-2

I. Ядерная физика

1. Нейтронная спектроскопия неделящихся ядер при энергетическом разрешении до 1 нсек/м при использовании неполяризованных и поляризованных нейтронных пучков.

2. Исследования угловых распределений рассеянных нейтронов в резонансной и более высокой области энергий нейтронов.

3. Исследование деления, вызванного нейтронами, включая изменение энергетического хода эффективных сечений, подпороговое деление, измерение спектров и корреляций излучений, возникающих при делении в широкой области энергий нейтронов, изучение трансуранов.

4. Исследование γ -лучей радиационного захвата нейтронов. Измерение спектров и корреляций в каскадных переходах. Исследование захвата между резонансами. Измерение электронов внутренней конверсии.

5. Исследование резонансного рассеяния γ -лучей при использовании γ -лучей от радиационного захвата нейтронов.

6. Развитие методов нейтронной спектроскопии с ультрамалыми количествами вещества, включая метод пропускания пучка ионов через "нейтронный газ".

7. Изучение магнитных дипольных и электрических квадрупольных моментов возбужденных ядерных уровней методами нейтронной спектроскопии нейтронов.

8. Изучение короткоживущих радиоактивных ядер; и изомерных состояний.

9. Разработка методов активационного анализа ядер, точность определения которых на стационарных потоках недостаточна.

II. Фундаментальные исследования свойств нейтрона и его взаимодействий с элементарными частицами

1. Прямое изучение n - n взаимодействия при малых энергиях.

2. Исследование n - e взаимодействия.

3. Измерение дипольного электрического момента нейтрона.

4. Исследование β -распада поляризованных нейтронов.

5. Измерение гравитационного ускорения нейтрона.

6. Измерение поляризуемости нейтрона в электромагнитном поле ядра.

7. Измерение заряда нейтрона.

8. Измерения p -нечетных и T -нечетных корреляций при захвате нейтронов ядрами.

III. Физика конденсированных сред

1. Исследование структуры и динамики конденсированных одно- и многокомпонентных, а также многофазных систем методами дифракции и неупругого рассеяния нейтронов.

2. Исследования магнитных веществ теми же методами, включая рассеяние поляризованных нейтронов.

3. Исследование фазовых переходов и нестационарных процессов.

4. Исследование действия статических и переменных нагрузок на структуру, фоновые и магнитные спектры кристаллов. Влияние импульсных магнитных полей и ударных волн.

5. Исследование сверхпроводников и квантовых жидкостей гелий-3 и гелий-4.

6. Исследование структуры полупроводников.

7. Изучение радиационных повреждений различных веществ при действии импульсной радиации.

8. Исследование динамики накопления и отжига радиационных повреждений.

9. Изучение двойных дифференциальных эффективных сечений и спектров нейтронов, прошедших через толстые слои вещества.

Л и т е р а т у р а

1. "Pulsed High Intensity Fission Sources." Proceedings of Symposium on Uses of High Intensity Pulses of Neutrons and Methods for Producing them, Conf. 650217, Washington, 1965.
2. Pulsed Neutron Research, Proceedings of Symposium held at Karlsruhe 10 - 14 May 1965, Vienna, 1965.
3. "Research Applications of Nuclear Pulsed Systems." Proceedings of a panel, Dubna 18 - 22 July 1966, Vienna, 1967.
4. "Intense Neutron Sources." Conf. 660925, Seminar in Santa Fe, 19 - 23 September 1966.
5. I.A. Larrimore, R. Haas, K. Geigerlich, V. Raievski, W. Kley. Conf. 660925, p. 373 (1966).
6. Отчет АЕCL-2600 (1966).
7. Г.Е. Блохин, Д.И. Блохинцев, Ю.А. Блюмкина и др. "Атомная энергия", 10, №5, 437 (1961).
8. Б.Н. Бунин, И.М. Матора, С.К. Николаев и др. "Материалы III Международной конференции по использованию атомной энергии в мирных целях". Доклад 28/p/324 (1964).
9. W. Kley. "Research Applications of Nuclear Pulsed Systems." p. 201, Vienna, 1967.
10. В.Д. Анасьев и др. Препринт ОИЯИ, P-2313 (1965).
11. F.L. Shapiro. "Research Applications of Nuclear Pulsed Systems." p. 176, Vienna, 1967.
12. Ф.Л. Шапиро. "Материалы I Международной конференции по использованию атомной энергии в мирных целях", т.4, с.144 (1956).

13. M.T.Burgy, V.E.Krohn, T.B.Novey, G.R.Ringo, V.L.Telegdi. Phys. Rev., 120, 1829 (1960).
14. C.O.Muehlhaus. Proceedings of the International Conference on Nuclear Physics with Reactor Neutrons, October 15 - 17, 1963. (ANL Report ANL - 6797).
15. О.Д. Казачковский и др. "Атомная энергия". 24, 136 (1968).
16. А.И. Лейпунский и др. "Атомная энергия", 5, 345 (1964).
17. N.S.Christofilos, R.E.Haster, W.A.S.Lamb, D.D.Reagun, W.A.Sherwood, R.E.Wright.
Труды Международной конференции по ускорителям, Дубна, 1963.
Атомиздат, 1964, с. 1073.
18. И.М. Матора. "К теории линейного индукционного ускорителя".
Препринт ОИЯИ, Р8-3184, Дубна, 1967.
19. А.И. Анацкий и др. "Атомная энергия", 21, 439 (1966).

Рукопись поступила в издательский отдел
2 апреля 1969 года.