

8348
Ш-122

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ

11-5663

Е.П.Шабалин

**МЕТОДЫ РАСЧЕТА И ОПТИМИЗАЦИЯ
ИМПУЛЬСНОГО РЕАКТОРА
ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ
КАК ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ
ДЛЯ ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

**Специальность 260 - приборы
экспериментальной физики**

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Дубна, 1971

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики
Объединенного института ядерных исследований.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук

Ю.Я. Стависский

кандидат физико-математических наук

А.Д. Франк-Каменецкий

Ведущее научно-исследовательское учреждение: Институт
атомной энергии им. И.В. Курчатова.

Автореферат разослан " " 1971 года.

Защита диссертации состоится " " 1971 года
на заседании Объединенного Ученого совета Лаборатории нейт-
ронной физики и Лаборатории ядерных реакций Объединенного
института ядерных исследований (г. Дубна).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Отзывы и замечания просим направлять по адресу:
г. Москва, Главпочтамт, п/я 79, Ученому секретарю Объединен-
ного Ученого совета ЛЯР и ЛНФ.

Ученый секретарь Совета

Э.Н. Каржавица

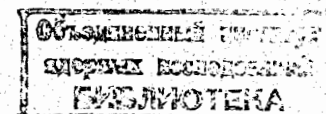
Е.П. Шабалин

МЕТОДЫ РАСЧЕТА И ОПТИМИЗАЦИЯ
ИМПУЛЬСНОГО РЕАКТОРА
ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ
КАК ИСТОЧНИКА НЕЙТРОНОВ.
ДЛЯ ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Специальность 260 - приборы
экспериментальной физики

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

46266 пр.



Введение

Нейтронная спектроскопия по времени пролета еще с середины 40-х годов стала надежным инструментом исследования свойств ядер, а позднее - атомной и магнитной структуры и динамики конденсированных сред. В самом принципе метода времени пролета заложена возможность неограниченного улучшения разрешающей способности спектрометра при соответствующем росте интенсивности источника нейтронов. Однако современные стационарные исследовательские реакторы, на которых проводится большинство физических исследований с помощью нейтронов, уже приблизились к практическому потолку нейтронного потока ($2 \cdot 10^{15}$ н/см² сек при тепловой мощности 50 + 100 Мвт), обусловленному быстрым выгоранием топлива и технологическими трудностями охлаждения. При этом на стационарных реакторах в исследованиях по методу времени пролета полезно используется лишь небольшая часть номинальной мощности вследствие применения вращающегося прерывателя нейтронного потока.

Новый путь в решении проблемы роста интенсивности источников нейтронов для нейтронной спектроскопии открыли импульсные

реакторы на быстрых нейтронах, которые способны испускать нейтроны не постоянно, а в отдельных вспышках, импульсах /11,17/.

Применяя такой реактор в качестве импульсного источника для спектроскопии по времени пролета, можно достичь почти 100-процентного использования нейтронного потока. Короткая вспышка нейтронов (порядка 30 ± 100 мсек), присущая импульсным реакторам на быстрых нейтронах, близка к оптимальной для большинства работ по физике твердого тела, а потому применение механического прерывателя не обязательно. Для проведения ядерно-физических исследований импульсный реактор может использоваться в "бустерном" режиме (при совместной работе с ускорителем электронов), когда длительность вспышки сокращается до нескольких микросекунд без существенной потери в интенсивности /3,16/.

Технически наиболее приемлемыми способами создания импульсов в реакторе на быстрых нейтронах периодического действия является модуляция реактивности посредством движения части делящегося вещества или отражателя. Первый способ реализован на действующем в Дубне импульсном реакторе периодического действия ИБР /3,7,11,12/, второй принят в проектах новых импульсных реакторов, созданных в исследовательском центре Испра (реактор SORA /14/), в Брукхэйвенской национальной лаборатории /15/ и в Советском Союзе при участии Объединенного института ядерных исследований (реактор ИБР-2 /7,13/).

Диссертация написана на основе работ /1-10/, посвященных задачам исследования и расчета импульсных реакторов, а также выбора оптимальных решений при проектировании импульсного реактора для целей нейтронной спектроскопии. Диссертация

состоит из трех частей; в каждом из разделов автореферата излагается содержание одной части.

Кинетика импульсного реактора периодического действия

В первой работе по теории импульсного быстрого реактора периодического действия И.И. Бондаренко и Ю.Я. Ставиский /18/ получили приближенное аналитическое решение одноточечного уравнения кинетики $\frac{dW}{dt} = \frac{\epsilon W}{\tau} + \frac{s}{\nu\tau} x$ в случае периодической модуляции реактивности с максимальным значением коэффициента размножения $k > 1 + \beta$. Они показали, что реактор на быстрых нейтронах с подвижной частью активной зоны способен генерировать короткие периодические импульсы мощности. Импульсы будут стабильны по амплитуде и форме, если значение максимальной реактивности на мгновенных нейтронах точно равно некой определенной величине ϵ_m , которую они назвали "равновесной надкритичностью". Позднее наиболее полная теория периодического режима импульсного реактора на быстрых нейтронах, основанная на аналитическом решении одноточечного уравнения кинетики, была изложена Ларримором /19/.

В диссертации сделана попытка исследования применимости одноточечной модели кинетики к расчету формы и энергии импульса мощности.

Более общую и точную модель кинетики, учитывающую пространственную протяженность и неоднородность свойств реального реактора, описывает интегральное уравнение:

*) Обозначения в конце текста.

$$W(t) = \int_0^{\infty} k_g(t-l)W(t-l)P_g(t,l)dl + \frac{s}{\nu}, \quad (1)$$

где $k_g(t)$ - динамический коэффициент размножения нейтронов; $P_g(t,l)$ - динамическая плотность распределения нейтронов деления по времени жизни их предшественников; $\int_0^{\infty} P_g dl = \tau$. Если заменить динамические величины $k_g(t)$ и $P_g(t,l)$ их статическими значениями $k(t)$ и $P(l)$, т.е. значениями, определенными в каждый момент времени для "равновесного" распределения плотности по реактору, то функции $k(t)$ и $P(l)$ могут быть довольно просто рассчитаны для любого реактора методом Монте-Карло [5,8].

Оказалось, что для реакторов, имеющих композицию подобно ИБР или ИБР-2, $P(l)$ (без учета запаздывающих нейтронов) хорошо аппроксимируется суммой экспонент; уравнение (1) в этом случае сводится к системе линейных дифференциальных уравнений первого порядка. Точные численные расчеты по одноточечной модели и по "эффективной одноточечной" модели (т.е. по уравнению (1) с $k(t)$ и $P(l)$ - статического) показали, что для реакторов типа ИБР одноточечная модель может быть применима для вычисления длительности импульса. Значение энергии импульса рассчитывается неточно (рис. 1), однако поправка ко времени жизни поколения нейтронов улучшает согласие.

Мощная вычислительная техника позволяет в настоящее время точно решить уравнение кинетики для импульсного реактора на быстрых нейтронах даже в сложных моделях. Однако аналитические формулы на основе приближенных моделей нужны и сейчас. Они используются обслуживающим персоналом реактора и

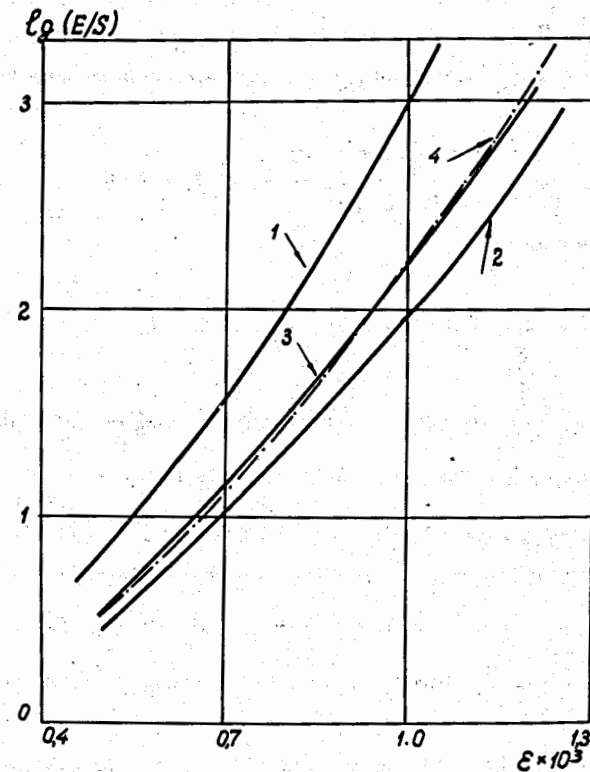


Рис. 1. Энергия импульса мощности (E) реактора ИБР как функция максимальной реактивности (ϵ); сплошные кривые - расчет по одноточечной модели кинетики - формула (2) с разными τ : 1,2,3 - $\tau = 1,14 \cdot 10^{-8}$, $1,6 \cdot 10^{-8}$ и $1,46 \cdot 10^{-8}$ сек; кривая 4 - численный расчет по эффективной одноточечной модели (уравнение (1)) с $\tau = 1,6 \cdot 10^{-8}$ сек.

инженерами расчетчиками при рассмотрении множества проектных вариантов. В связи с этим автором было проведено точное аналитическое решение одноточечного уравнения кинетики и получен ряд соотношений для кинетических параметров импульсного реактора. Без приближений, использованных в работах /18/ и /19/, получены выражения для максимальной мощности в импульсе:

$$W_m = \frac{s}{\nu} \sqrt{\frac{2\pi}{\alpha^{1/2} \nu r \epsilon_m^{1/2}}} \exp \frac{4}{3} B \cdot Z(B),$$

энергии импульса:

$$E = \frac{s}{\nu} \frac{\pi}{\alpha^{1/2} \nu \epsilon_m^{1/2}} \exp \frac{4}{3} B \cdot Z^2(B) \quad (2)$$

и эффективной длительности импульса $\theta = \frac{E}{W_m}$, справедливые при значениях безразмерного параметра $B = \frac{\epsilon_m^{3/2}}{\alpha^{1/2} \nu r} > 1$.

Решение было получено для реактивности на мгновенных нейтронах, изменяющейся во времени по параболическому закону:

$\epsilon = \epsilon_m - \alpha \nu^2 t^2$. Функция $Z(B) = \sqrt{\frac{B}{\pi}} \left\{ \int_0^\infty \exp[-B\ell^2(1 + \frac{\ell}{3})] d\ell + \int_0^2 \exp[-B\ell^2(1 - \frac{\ell}{3})] d\ell \right\}$ рассчитана автором численно и представлена в диссертации графически.

Получены также формулы для параметров импульса с отрицательными значениями ϵ_m , которые имеют место в побочных импульсах мощности при работе реактора с двумя подвижными элементами /12,13/.

В режиме редких импульсов или при значительной средней мощности реактора, когда подогрев тепловыделяющих элементов за один импульс достигает десятков градусов, становятся

существенными эффекты обратной связи "энергия-реактивность" /7/.

В этом случае кинетика реактора описывается нелинейными уравнениями; в диссертации излагается простой приближенный метод их решения, дающий вполне удовлетворительные для практических целей результаты. Для энергии импульса при заданном коэффициенте отрицательной мгновенной обратной связи (ϵ) получено трансцендентное уравнение:

$$cE^2 = \frac{3,88 s}{\nu} \frac{\sqrt{B} r}{\epsilon_m} \exp [B \ell_0^2 (1 - \frac{\ell_0}{3})], \quad (3)$$

где

$$(\ell_0 - 1)^2 = 1 - \frac{cE}{2\epsilon_m}.$$

Ввиду малого значения времени жизни мгновенных нейтронов в быстром реакторе, импульсный реактор весьма чувствителен к возмущениям реактивности. Флуктуации энергии и формы импульса значительны на любых уровнях средней мощности. Для малой мощности (несколько сот ватт и менее) они определяются в основном стохастическим характером процесса размножения нейтронов /1,12/, на среднем и большом уровне мощности — механическими колебаниями деталей реактора. Связь малых изменений реактивности с изменениями энергии и длительности импульса нейтронов дается выражениями:

$$\frac{\Delta E}{E} = (2B - 0,5) \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon}; \quad \frac{\Delta \theta}{\theta} = (0,3 \sqrt{B} + 0,25) \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon}.$$

Автором получены также соотношения для флуктуаций при наличии мгновенной отрицательной обратной связи.

Трансцендентное уравнение для равновесной надкритичности ϵ_m , выведенное ранее для часто повторяющихся стабильных импульсов (см. /12,19/), обобщено в диссертации на случай любой частоты следования импульсов и наличия флуктуаций реактивности.

Метод Монте-Карло для расчета параметров импульсного реактора

Метод Монте-Карло оказался наиболее удобным для расчета статических характеристик (k , τ , a , $P(\ell)$ и др.) сложной по геометрии и составу импульсного реактора с подвижным отражателем. Автором совместно с В.И. Кочкиным и А.Д. Роговым было составлено несколько вариантов программы, названной МНВ, для расчета реактора методом статистических испытаний в геометрии XYZ (см. рис. 2). Программа была написана в кодах машины БЭСМ-4, а также на языке ФОРТРАН-ЦЕРН применительно к ЭВМ БЭСМ-6. Программа МНВ позволяет рассчитать коэффициент размножения нейтронов k , величины τ , a , функцию распределения $P(\ell)$ (или моменты этой функции), полную эффективность подвижного отражателя (ПО) Δk , баланс нейтронов, спектр нейтронов утечки, плотность утечки тепловых нейтронов с поверхности замедлителя практически для любой композиции реактора ^{x/}.

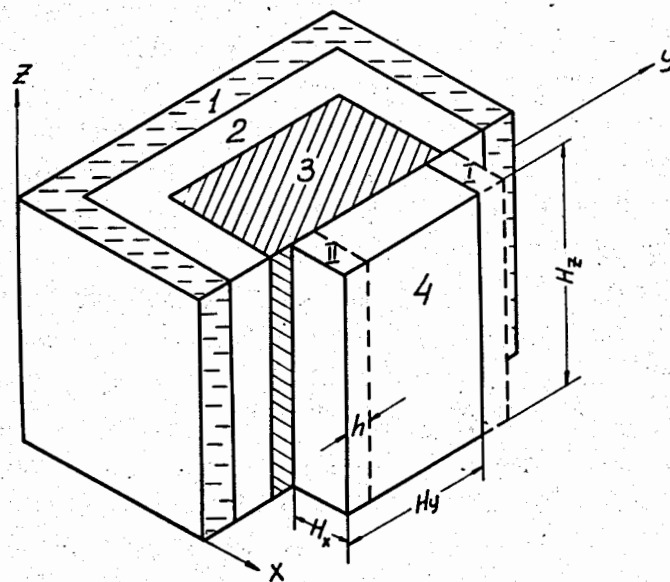


Рис. 2. Геометрическая схема реактора при обсчете по программе МНВ. 1 - замедлитель нейтронов; 2 - стационарный отражатель; 3 - активная зона; 4 - подвижный отражатель.

^{x/} В Италии и США примерно одновременно с Дубной также были созданы программы расчета импульсных реакторов методом Монте-Карло /23,24/; последние отличаются от программы МНВ алгоритмами расчета отдельных функционалов и геометрическими блоками.

При моделировании нейтронных траекторий применяется групповое приближение (26 групп, ^{/20/}). Для описания упругого рассеяния используется транспортное приближение везде, кроме области подвижного отражателя, где рассеяние считается анизотропным. Рассеяние на водороде моделируется точно. Цепь размножения нейтронов строится методом поколений с сохранением постоянного числа точек деления ^{/5/}. Показано, что количество нейтронов в одном поколении при использовании "веса" нейтрона по отношению к делению и выбора точек деления "по интенсивности" должно быть не менее 20+40 для получения несмещенной оценки k .

τ оценивалось как среднее время, необходимое для генерации вторичного нейтрона - среднее время "жизни" поколения нейтронов; оценка τ , как и других функционалов, производилась при установившемся распределении плотности делений.

Для оценки потока тепловых нейтронов в замедлителе и поверхностного тока применялся метод аналитического продолжения: источники тепловых нейтронов определялись методом Монте-Карло, а перенос последних описывался диффузионным уравнением.

Специфической для импульсных реакторов периодического действия величиной является α -параметр параболы, описывающей изменение коэффициента размножения при смещении (h) подвижного элемента (модулятора реактивности) от положения, соответствующего максимуму реактивности:

$$k(h) = k_m - \alpha h^2 \quad (4)$$

Точность этого соотношения подтверждается ^{/12,15/} измерениями на критических сборках.

В соответствии с формулой (4), для параметра α можно получить три соотношения:

$$\alpha^{(1)} = - \frac{k(h_1) - k(0)}{h_1^2} = - \frac{\delta k(h_1)}{h_1^2}, \quad h_1 \neq 0;$$

$$\alpha^{(2)} = - \frac{1}{2h_1} \left. \frac{dk}{dh} \right|_{h=h_1}, \quad h_1 \neq 0;$$

$$\alpha^{(3)} = - \frac{1}{2} \frac{d^2k}{dh^2}, \quad h = 0.$$

На основе теории возмущений первого порядка и теории оценок производных коэффициента размножения по произвольному параметру ^{/21/} были получены выражения для оценок $\alpha^{(1)}$, $\alpha^{(2)}$, $\alpha^{(3)}$ по методу статистических испытаний. Созданы и опробованы алгоритмы расчета $\alpha^{(1)}$ и $\alpha^{(2)}$ ^{/5,9/} с использованием методов уменьшения дисперсии. В качестве функции ценности нейтронов деления, входящей в формулы для δk , использовался диффузионный односкоростной поток. Вероятная ошибка оценки α обычно не превосходит 15% при счете 40.000 историй. Учитывая, что длительность импульса мощности реактора приблизительно пропорциональна $\alpha^{-1/3}$, вышеуказанную точность статистической оценки α можно признать удовлетворительной.

В заключении второй главы диссертации описываются результаты расчетов характеристик критическихборок быстрых реакторов, в том числе с подвижным отражателем, по программе МНВ и обсуждается сравнение их с экспериментом. Систематическая ошибка расчета коэффициента размножения обычно составляет 1+2%, достигая 4% в сильно гетерогенных сборках.

Среднее время жизни поколения τ оказывается заниженным в сравнении с экспериментальной величиной $\ell_p = \frac{\beta}{a}$ (здесь a — константа Росси), что совпадает с выводами других работ /22/. Для величин a и Δk отличие расчета и эксперимента почти во всех случаях лежит в пределах суммарной статистической ошибки расчета и измерений.

Оптимизация импульсного реактора с подвижным отражателем

В третьей части диссертации излагаются результаты исследований по выбору оптимальных технических решений при проектировании импульсного реактора на быстрых нейтронах с подвижным отражателем. "Оптимизация" здесь понимается в смысле достижения наилучшей эффективности импульсного реактора как источника нейтронов для нейтронной спектроскопии. Расчетные исследования проведены автором в 1966–1968 годах, и их результаты положены в основу проекта реактора ИБР-2. Ряд результатов был получен затем экспериментально на критической сборке модели ИБР-2. Для классической схемы экспериментов по методу времени пролета выведены соотношения для относительной (с точностью до множителей, не зависящих от параметров реактора) интенсивности полезного потока нейтронов на мишень. Эта величина, названная "качеством импульсного реактора", является некоторым комплексом параметров реактора, вид которого определяется задачами и условиями эксперимента. Наряду с общеизвестным выражением для "качества импульсного источника" при заданном энергетическом разрешении $Q = \Phi(F_0)/(\Delta t)^2$,

где $\Phi(F_0)$ — средний по времени суммарный угловой поток нейтронов с поверхности замедлителя F_0 в направлении на мишень, Δt — неопределенность времени пролета, связанная с длительностью импульса реактора, автором выделено еще 6 комплексов Q . Все они определяются композицией и размерами активной зоны, отражателя и замедлителя.

С помощью программы метода Монте-Карло было обчислено несколько вариантов импульсного реактора с подвижным отражателем, отличающихся только объемом и составом активной зоны. Характер зависимости "качества" от объема активной зоны оказался примерно одинаковым для всех рассмотренных комплексов Q (рис. 3): большинство функций $Q(V)$ имеют пологий максимум в области объемов 20+30 литров или же выходят в этой области на насыщение. Такой вид $Q(V)$ объясняется конкуренцией положительного фактора — увеличения тепловой мощности реактора с объемом — и отрицательных факторов — увеличения длительности импульса нейтронов и снижения удельной поверхностной плотности утечки нейтронов на единицу тепловой мощности. Таким образом, для импульсного исследовательского реактора на быстрых нейтронах с подвижным отражателем оптимальное значение объема активной зоны находится в области 15+20 литров /4/.

Длительность импульса мощности реактора приблизительно выражается соотношением:

$$\theta = 1,5 \left(\frac{\tau}{a v^2} \right)^{1/3}.$$

Значения a , v и отчасти τ , определяющие длительность импульса, зависят от формы, материала, размеров и конструкции подвижного отражателя. Если, кроме того, вспом-

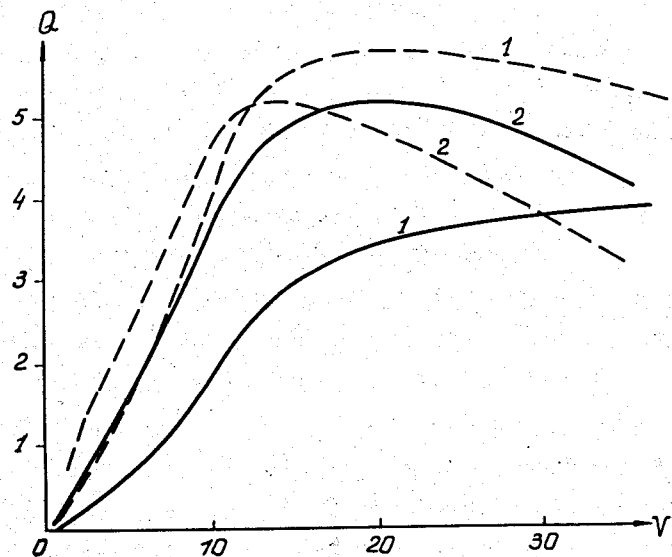


Рис. 3. "Качество" импульсного реактора (Q) как источника нейтронов для нейтронной спектроскопии в зависимости от объема активной зоны (V в литрах). Кривые 1 - качество при заданном энергетическом разрешении эксперимента; кривые 2 - качество при заданном энергетическом разрешении и хорошем угловом разрешении; сплошные кривые - "качество" для экспериментов с тепловыми нейтронами; пунктирные кривые - для экспериментов с надтепловыми нейтронами.

нить, что фоновая мощность импульсного реактора периодического действия обратно пропорциональна эффективности ПО Δk

$$V - \bar{W}_\phi = \frac{\bar{W} \beta}{\Delta k},$$

то ясно, какое внимание должно быть уделено вопросам оптимального проектирования подвижного отражателя.

Расчетные исследования, проведенные автором совместно с Б.И. Куприным, показали, что для импульсного реактора с объемом активной зоны 12 литров наиболее подходящим материалом для ПО является бериллий; однако сталь или никель в качестве отражателя мало ему проигрывают.

Влияние размеров ПО на характеристики α и Δk было тщательно изучено для ПО в форме прямоугольного параллелепипеда (см. рис. 2) и для активной зоны с оптимальными объемом и формой. Основной результат - функция $\alpha(H_y)$ имеет пологий максимум при ширине ПО H_y (размер в направлении движения), несколько большей ширины "окна" активной зоны, т.е. грани активной зоны, прилежащей к ПО. Из других форм ПО в диссертации рассматривается, как перспективная, призма с трапецией в основании (за основание принята плоскость вращения ротора ПО - плоскость YZ на рис. 2), малая сторона которой находится на максимальном радиусе вращения.

Весьма существенно влияют на α и Δk величина и состав зазора между активной зоной и ПО; возможным следствием этого могут быть значительные флуктуации импульсов мощности при смещениях или вибрациях подвижного отражателя. На основании экспериментальных и расчетных исследований оценены коэффициенты связи величины флуктуаций импульсов с величиной смещения ПО; допустимое смещение оказалось равным примерно 0,1 мм.

Значение τ определяется главным образом композицией и размерами стационарного отражателя. При сравнительной оценке различных материалов для стационарного отражателя учитывалось назначение его как исполнительного органа системы регулирования реактора, а также наличие внешнего замедлителя нейтронов. Наилучшие физические и технические характеристики оказываются у реактора с вольфрамовым отражателем; это является следствием отсутствия заметного упругого замедления нейтронов в вольфраме и значительного поглощения в вольфраме медленных нейтронов из внешнего замедлителя.

В диссертации обсуждаются также исследования по влиянию формы активной зоны на характеристики импульсного реактора.

Заключение

Основные результаты диссертационной работы формулируются так:

1. Показана применимость одноточечной модели кинетики к импульсным реакторам на быстрых нейтронах типа ИБР;
2. На основе одноточечной модели получены обоснованные аналитические формулы для расчета формы и энергии импульса мощности и их флуктуаций для ряда режимов и условий работы реактора;
3. Создана программа расчета статических характеристик импульсного реактора сложной геометрии и состава на основе метода статистических испытаний;
4. Проведены исследования влияния состава и размеров отдельных составляющих импульсного реактора с подвижным отражателем на его характеристики, как источника нейтронов для нейтронной спектроскопии.

Л и т е р а т у р а

1. Люй Минь, Е.П. Шабалин, Ю.С. Язвицкий. "Экспериментальное исследование флуктуаций импульсного реактора". АЭ, т.16, вып. 1, 1964, стр. 12. Препринт ОИЯИ 1226, 1963.
2. В.Д. Денисов, Ж.А. Козлов, Люй Минь, В.М. Назаров, Г.Н. Погодаев, Е.П. Шабалин, Ю.С. Язвицкий. Некоторые результаты исследования характеристик ИБР. Препринт ОИЯИ, Р-1257, 1963. Доклад на III Совещании по физике и технике исследовательских реакторов, Прага, 1963.
3. 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. Препринт ОИЯИ 2372, 1965. "Kernenergie", 9 Jahrgang, N.12/1966.S. 365-373.
4. Е.П. Шабалин, Г.Н. Погодаев. К вопросу оптимизации импульсного реактора на быстрых нейтронах. Препринт ОИЯИ 2708, 1966 и в сб. "Физика ядерных реакторов", т.III, 1966.
5. В.И. Кочкин, Е.П. Шабалин. Применение метода Монте-Карло к расчету импульсного реактора с подвижным отражателем. Препринт ОИЯИ 11-4098, 1968.
6. В.Д. Ананьев, Е.П. Шабалин и др. Изобретение "Импульсный ядерный реактор", авторское свидетельство № 270911, с приоритетом от 13. XI . 1968 г.
7. В.Д. Ананьев, Д.И. Блохинцев, Б.Н. Бунин, Л.К. Кулькин, И.М. Матора, В.М. Назаров, В.Т. Руденко, И.М. Франк, Е.П. Шабалин, Ф.Л. Шапиро, Ю.С. Язвицкий. Опыт эксплуатации и развитие импульсных периодических реакторов в Дубне. Препринт ОИЯИ, 13-4395, 1969, а также в сборнике

"FAST BURST REACTORS". Proceedings of the Symposium on Fast Burst Reactors, Albuquerque, USAEC, 1969, и в "Nuclear News", апрель, 1969.

8. В.И. Кочкин, Е.П. Шабалин. Эффективная одноточечная модель кинетики размножающей среды с реальными геометрическими и физическими свойствами. Препринт ОИЯИ, 11-5407, 1970.
9. А.Д. Рогов, Е.П. Шабалин. Расчет характеристик импульсного реактора методом Монте-Карло, сравнение с экспериментом. Сообщение ОИЯИ, 11-5619, 1971.
10. В.П. Пластинин, В.Т. Руденко, Е.П. Шабалин. Изобретение "Способ создания импульсов мощности в реакторе на быстрых нейтронах". Авторское свидетельство №205976 с приоритетом 11.4.66.
11. И.М. Франк. Импульсный реактор ЛНФ ОИЯИ. Доклад на IX сессии Ученого совета ОИЯИ, ноябрь 1960 г., Р-674 (1961).
12. Г.Е. Блохин, Д.И. Блохинцев и др. Импульсный реактор на быстрых нейтронах, АЭ, т. 10, вып. 5, 437 (1961).
13. В.Д. Ананьев, Е.П. Шабалин и др. Препринт ОИЯИ 13-4392, 1969.
14. V. Raievski et al. В сборнике "Pulsed Neutron Research", Symposium Proceedings, Karlsruhe, 1965, V.2, p.553, IAEA, Vienna, 1965.
15. J.M. Hendrie et al. В сборнике ^{/7/}, p.105: "Brookhaven Pulsed Fast Reactor".
16. Б.Н. Бунин, И.М. Матора, С.К. Николаев, Л.Б. Пикельнер, И.М. Франк, Е.П. Шабалин, Ф.Л. Шапиро, Ю.С. Язвический. Доклад на III Международной конференции по использованию атомной энергии в мирных целях, Женева, 1964, Р-324.

17. Е.П. Шабалин. Импульсный реактор на быстрых нейтронах. "Наука и жизнь", №10, 1970.
18. И.И. Бондаренко, Ю.Я. Стависский. АЭ, т.7, вып. 5, 417(1959).
19. J.A. Larrimore. Nucl.Sci. and Eng., 29,87-110 (1967).
20. Л.П. Абагян и др. Групповые константы для расчета ядерных реакторов. Атомиздат, 1964.
21. Г.А. Михайлов. В сб. "Метод Монте-Карло в проблеме переноса излучений". Атомиздат, 1967, стр. 197.
22. М.Н. Зизин, Л.Н. Ярославцева. В сб. "Труды трехстороннего советско-бельгийско-голландского симпозиума по некоторым проблемам физики быстрых реакторов" (Мелекес, февраль 1970). Том 1, Д-16, Москва, 1970.
23. H. Rief, H. Kschwendt. Nucl.Sci. and Eng., 30,395(1967).
24. H. Takahashi. Trans. ANS, V.11, N2, p. 533, 1968.

х/ Обозначения

- k - коэффициент размножения нейтронов.
 β - эффективная доля запаздывающих нейтронов.
 $\epsilon = k(1 - \beta) - 1$ - реактивность на мгновенных нейтронах.
 $W(t)$ - интенсивность делений в реакторе, мгновенная мощность реактора.
 W_m - мощность в пике импульса, \bar{W} - средняя мощность.
 τ - среднее время жизни поколения мгновенных нейтронов в реакторе.
 s - эффективная интенсивность источника нейтронов.
 ν - среднее число мгновенных нейтронов на деление.
 α - "параболический коэффициент реактивности".
 v - скорость подвижного элемента модулятора реактивности относительно активной зоны.

E - энергия импульса, количество делений в одном импульсе мощности.

$\theta = \frac{E}{W_m}$ - эффективная длительность импульса мощности.

Δk - амплитуда модуляции коэффициента размножения ("полная эффективность" подвижного элемента реактора).

Рукопись поступила в издательский отдел
3 марта 1971 года.