

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3-96-282

На правах рукописи
УДК 539.1.078

Ш-352

ШВЕЦОВ
Валерий Николаевич

РАЗРАБОТКА ИМПУЛЬСНОГО ИСТОЧНИКА
УЛЬТРАХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ
ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ
И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
В ФИЗИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ

Специальность: 01.04.16 — физика атомного ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1996

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка
Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна.

Научный руководитель -
кандидат физико - математических наук
старший научный сотрудник

А.В. Стрелков

Официальные оппоненты:

доктор физико - математических наук
ведущий научный сотрудник, профессор

В.И. Морозов

доктор физико - математических наук
ведущий научный сотрудник, профессор

П.А. Крупчицкий

Ведущее предприятие: Санкт-Петербургский институт ядерной
физики.

Защита диссертации состоится "___" _____ 1996г. в "___" час
на заседании специализированного совета Д 047.01.05 при Лаборатории
нейтронной физики и Лаборатории ядерных реакций Объединенного
института ядерных исследований, Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ

Автореферат разослан "___" _____ 1996г.

Ученый секретарь
специализированного совета

А.Г. Попеко

Общая характеристика работы

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

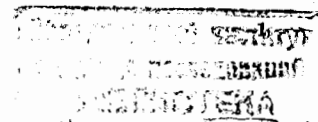
Основной целью работы является разработка метода динамических конверторов ультрахолодных нейтронов (УХН), создание на его основе импульсного источника УХН высокой плотности на базе аperiодического импульсного реактора БИГР (РФЯЦ - ВНИИЭФ, г. Саров) и предложение схемы эксперимента по измерению времени жизни нейтрона с использованием этого источника.

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ:

УХН (ультрахолодные нейтроны) - нейтроны с чрезвычайно малой кинетической энергией $\sim 10^{-7}$ эВ ($v \sim 5$ м/с)^[1]. Они обладают уникальным свойством полного отражения от поверхности вещества и, таким образом, могут долго находиться в вакуумированных сосудах. При этом их поведение напоминает поведение ультраразреженного газа (длина свободного пробега намного больше размеров сосуда). Этот "нейтронный газ" удобно использовать в экспериментах по исследованию фундаментальных свойств нейтрона.

УХН получают главным образом из тепловых нейтронов за один удар, последние теряют при этом энергию на 5-6 порядков. Вероятность таких процессов для максвелловского спектра тепловых нейтронов чрезвычайно мала ($\sim 10^{-11}$). Существуют принципиальные запреты на действие механизмов, позволяющих регулярно замедлять нейтроны от тепловых энергий до УХН^[2], поэтому для получения УХН приходится довольствоваться только начальным участком максвелловского распределения тепловых нейтронов:

$$F_{UCN} = \frac{1}{8} F_{th} \left(\frac{v_{lim}}{v_{th}} \right)^4 \frac{\sigma_{ie}^0}{\sigma_{ie}^0 + \sigma_a},$$



относительная доля которого в общем спектре нейтронов от реактора составляет всего $\sim 10^{-12}$. Здесь F_{th} - поток тепловых нейтронов, v_{lim} - граничная скорость для стенок сосуда $\sim (3-6 \text{ м/с})$, $v_{th} = 2200 \text{ м/с}$ - скорость тепловых нейтронов, σ_{ie}^0 и σ_{ie}^{∞} - соответственно неупругие сечения охлаждения и нагрева нейтрона, σ_a - сечение захвата нейтрона.

Плотность УХН в настоящее время доведена до значения $\sim 10^2 \text{ см}^{-3}$ [3]. Такая плотность получена на высокопоточном стационарном реакторе института ILL (Institut Laue - Langevin, Гренобль, Франция) ($W=57 \text{ Мвт}$, $F_{th} \sim 10^{15} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$, жидкодейтериевый замедлитель при $T \sim 20 \text{ К}$). Дальнейшее увеличение плотности УХН может быть осуществлено при использовании импульсных реакторов, импульсные потоки от которых во много раз превышают потоки нейтронов от стационарных реакторов.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА И ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ РАБОТЫ:

Разработанный метод динамических конверторов позволяет создавать источники УХН с плотностью до 10^6 н/см^3 в объеме несколько литров.

Впервые создан источник для получения импульсной плотности УХН, на несколько порядков превышающей плотность, достигнутую на стационарных реакторах.

Предложена оригинальная постановка эксперимента по измерению времени жизни нейтрона с использованием этого источника, которая свободна от систематических эффектов, присущих предшествующим экспериментам. Планируемая точность составит $\sim 0.5 \%$, что соответствует лучшим мировым результатам.

НА ЗАЩИТУ ВЫНОСЯТСЯ СЛЕДУЮЩИЕ ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ:

1. Разработка метода динамических конверторов для твердотельных и газовых конверторов УХН для импульсных источников нейтронов, позволяющего увеличить на несколько порядков, по сравнению с

существующими конверторами на стационарных реакторах, плотность УХН в экспериментальных установках;

2. Создание источника УХН, в котором реализована идея твердотельного движущегося конвертора;

3. Оригинальная методика измерения времени жизни нейтрона с использованием созданного источника УХН

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ. Материалы, положенные в основу диссертации докладывались на международном совещании по современным импульсным источникам (Дубна, Россия, 1991), 6 международном совещании по ядрам, далеком от полосы стабильности + 9 международном совещании по атомным массам и фундаментальным константам (Бернкастель-Куз, Германия, 1992).

ОБЪЕМ РАБОТЫ: 53 страницы

ПУБЛИКАЦИИ. По материалам диссертации опубликовано 7 работ.

Содержание работы

Во введении дан краткий обзор свойств УХН, механизма генерации и источников УХН. Кратко изложены основные положения диссертации и приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены основы теории конверторов УХН, методы получения УХН без использования конверторов.

Во второй главе описано использование УХН в физических экспериментах, методы спектрометрии УХН. Рассмотрены эксперименты по измерению времени жизни нейтрона, приведены результаты наиболее точных экспериментов, проведенных на настоящий момент.

Подробно рассмотрена методика измерения времени жизни нейтрона с использованием гравитационной ловушки ультрахолодных нейтронов, приведены источники систематических погрешностей в этом эксперименте и способы уменьшения систематических ошибок.

В третьей главе описано создание импульсного источника УХН на основе импульсного реактора аperiodического действия БИГР (ВНИИЭФ, Саров). Дано обоснование метода динамических конверторов ультрахолодных нейтронов - расширяющегося параводородного конвертора и движущегося твердотельного конвертора. Идея метода заключается в том что после генерации УХН в момент максимальной импульсной плотности потока тепловых нейтронов потери УХН на ядрах конвертора уменьшаются. Уменьшение потерь происходит за счет быстрой откачки в случае газового конвертора и за счет движения в случае твердотельного конвертора^[4]. При этом потери УХН сокращаются за счет уменьшения плотности конвертора - в первом случае и за счет уменьшения сечения потерь в соответствии с законом $1/v$ - во втором случае. После генерации ультрахолодные нейтроны заключаются в контейнер и транспортируются от активной зоны импульсного реактора.

Численно решено уравнение для плотности УХН:

$$\frac{dn(t)}{dt} = F_{th}(t) \bar{\sigma}_{ic}^0 - \frac{n(t)}{\tau(t)} \quad (1)$$

для реальной формы импульса реактора для случаев расширяющегося газового и движущегося твердотельного конверторов. Здесь $n(t)$ - плотность УХН (число УХН в 1 см^3); F_{th} - плотность потока тепловых нейтронов в конверторе; $N(t)$ - число атомов конвертора в 1 см^3 ; $\tau(t)$ - время жизни УХН в конверторе - $\tau^{-1}(t) = N(t)(\sigma_{ic}^0 + \sigma_a)v$; v - скорость УХН, $(\sigma_{ic}^0 + \sigma_a)v = \text{const}$,

поскольку σ_{ic}^0 и σ_a - сечения нагрева и захвата УХН соответственно - следуют закону $1/v$. $\bar{\sigma}_{ic}^0$ - сечение генерации УХН в диапазон скоростей $[0, v_{lim}]$, усредненное по спектру тепловых нейтронов:

$$\bar{\sigma}_{ic}^0 = \iint_{|v| \leq v_{lim}} \frac{d\sigma(v-v)}{dv} \cdot \frac{v'^3}{4\pi v_{th}^4} \cdot \exp\left(-\frac{v'^2}{v_{th}^2}\right) dv' dv,$$

где v' - скорость тепловых нейтронов; v - скорость УХН; v_{th} - наиболее вероятная скорость теплового спектра нейтронов, $v_{th} = (2 \cdot k \cdot T_n / m)^{1/2}$; T_n - температура спектра нейтронов. Решение уравнения (1)^[5]:

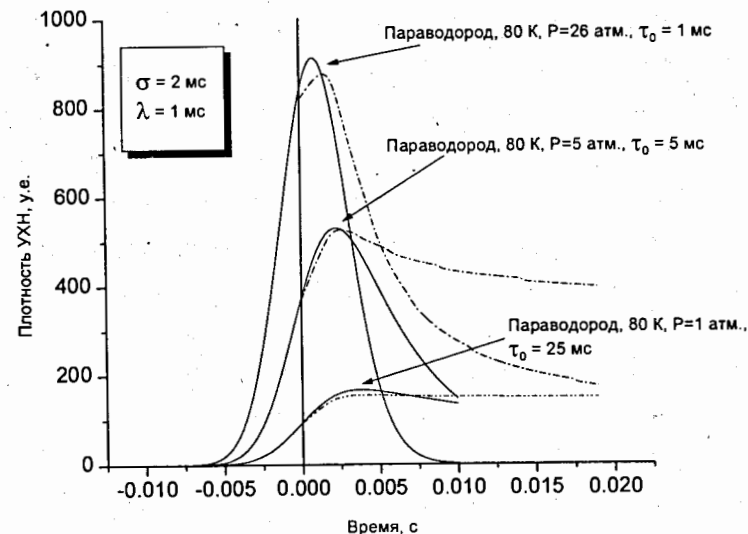


Рисунок 1 Зависимость плотности УХН (условные единицы) в параводородном конверторе от времени. λ - постоянная, характеризующая скорость откачки.

$$n(t) = \int_{-\infty}^t N(t') \bar{\sigma}_{ic}^0 \cdot F_{th}(t') \cdot \exp\left[-\int_{t'}^t \frac{dt''}{\tau(t'')} \right] dt' \quad (2)$$

Здесь t' - момент генерации УХН; $N(t') \cdot \bar{\sigma}_{ie}^{\theta} = \Sigma_g$ - макроскопическое сечение генерации УХН; $\exp\left[-\int_{t'}^t \frac{dt''}{\tau(t'')} \right]$ - коэффициент потерь УХН с момента генерации t' до момента наблюдения t . На рисунке 1 показана расчетная временная зависимость плотности УХН внутри параводородного конвертора, выраженная в условных единицах, при температуре 80 К для различных давлений параводорода. Расчет проведен для реальной формы импульса тепловых нейтронов, описываемой зависимостью $F_{th}(t) = F_0 \exp(-\frac{t^2}{2\sigma^2})$, $\sigma = 2$ мс. Сплошные кривые соответствуют случаю постоянной плотности конвертора, штрих-пунктирные - случаю, когда в момент времени $t=0$ начинается откачка параводорода (постоянная времени откачки $\lambda = 1$ мс). С учетом параметров импульса реактора БИГР (флюенс тепловых нейтронов 10^{15} н/см², длительность импульса на полувысоте 4 мс) в объеме транспортируемого контейнера, стенки которого покрыты бериллием (граничная скорость $v_{lim} = 689$ м/с) максимальная плотность ультрахолодных нейтронов при реализации схемы параводородного конвертора -

$$n_{max} = \frac{4}{3\sqrt{\pi}} \cdot F_{th} \cdot \frac{v_{lim}^3}{v_h^4} \cdot G^{[6]} - \text{составит } 6.6 \cdot 10^5 \text{ н/см}^3.$$

При движении твердотельного конвертора в поле тепловых нейтронов, образованных во время импульса реактора, за конвертором образуется шлейф УХН, плотность которых подчиняется зависимости, подобной представленной на рис. 1, в которой временная шкала преобразуется в пространственную с $t = x / v_0$, где x - расстояние от места нахождения задней кромки конвертора в момент максимума вспышки, v_0 - скорость движения конвертора.

Длина (вдоль v_0) области сосредоточения максимальной плотности УХН пропорциональна v_0 . Для того чтобы эффективно извлекать УХН из движущегося конвертора, надо сделать так чтобы длина этой области была соизмерима с протяженностью зоны, откуда выводятся УХН. Для длины

зоны извлечения $d \sim 10$ см необходимые скорости движения конвертора находятся в диапазоне 20+100 м/с при ширине вспышки $\Delta t_{1/2} = 1.7$ мс.

Для вычисления средней плотности УХН на длине зоны извлечения d используется уравнение:

$$n(v_0, d_0) = \frac{1}{d} \int_0^{d_0} N \bar{\sigma}_{ie}^{\theta}(v_0) \exp\{-N[\sigma_{ie}^{\theta}(v_0) + \sigma_a(v_0)]x\} \left[\int_{t-\frac{x}{v_0}}^{t-\frac{x}{v_0} + \frac{d-x}{v_0}} F_{th}(t') dt' \right] dx, \quad (3)$$

где d_0 - толщина конвертора, а $\bar{\sigma}_{ie}^{\theta}(v_0)$ - усредненное по спектру сечение охлаждения тепловых нейтронов в диапазон скоростей $|v - v_0| \leq v_{lim}$:

$$\bar{\sigma}_{ie}^{\theta}(v_0) = \iint_{|v-v_0| \leq v_{lim}} \frac{d\sigma(v'-v_0)}{dv} \cdot \frac{v'^3}{4\pi v_{th}^4} \cdot \exp(-\frac{v_0^2}{v_{th}^2}) dv' dv.$$

На рис. 2 представлены результаты численного расчёта зависимости $n(v_0) / n_{max}$ для конверторов разной толщины из полиэтилена и бериллия при

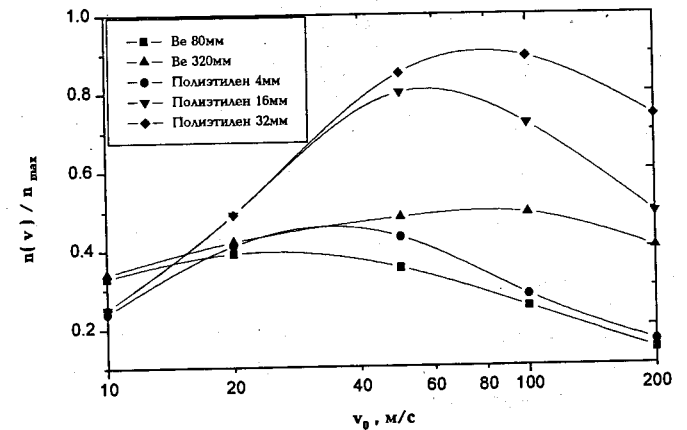


Рисунок 2 Плотность УХН в единицах n_{max} в шлейфе за пролетающим конвертором в зависимости от скорости движения конвертора.

$T=80$ К, длина зоны извлечения, то есть пролетное расстояние конвертора была выбрана равной 10 см.

Для контейнера с Be покрытием в случае использования полиэтиленового конвертора толщиной 30 мм, охлажденного до 80 К, n_{max} с учетом эффективности извлечения (рис. 2) составит $1.1 \cdot 10^5$ н/см³, для такого же конвертора при комнатной температуре максимальная плотность составит величину $2.6 \cdot 10^4$ н/см³.

Далее описана конструкция установки с твердотельным движущимся конвертором УХН (рис. 3).

Установка смонтирована на импульсном реакторе БИГР, длительность импульса которого является оптимальной для реализации идеи движущегося твердотельного конвертора.

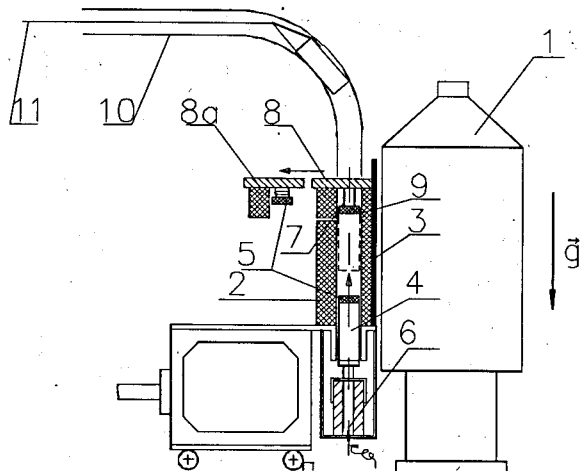


Рисунок 3 Подвижная часть установки

1 - Активная зона реактора, 2 - замедлитель, 3 - экран из BC_4 и Cd, 4 - контейнер УХН, 5 - конвертор, 6 - разгонное устройство, 7 - крешер, 8-8а - ударная плита, 10 - транспортный канал, 11 - трос

Система разгона и торможения (6 и 7) контейнера УХН (4) расположена на подвижной платформе внутри блока полиэтиленового замедлителя (2). В рабочем положении замедлитель располагается на

расстоянии 2 см от поверхности активной зоны реактора (1) и отделён от реактора экранами из BC_4 (3) и Cd для того чтобы исключить влияние нейтронов, рассеянных и замедленных в полиэтилене, на развитие импульса реактора. Контейнер располагается в канале диаметром 100 мм внутри замедлителя на расстоянии порядка 200 мм от тормозного устройства и представляет из себя вакуумированный сосуд из нержавеющей стали диаметром 100 мм и длиной 300 мм, покрытый изнутри слоем Be толщиной порядка 3000 \AA , входное окно - 100 мкм фольга из нержавеющей стали.

Охлаждаемый жидким азотом конвертор (9), представляющий из себя полиэтиленовый цилиндр диаметром 90 мм и толщиной 50 мм в оболочке из алюминия, размещается перед входным окном контейнера.

Генерация УХН, заполнение контейнера и извлечение контейнера в экспериментальный зал происходит следующим образом. В момент времени, когда мощность импульса составляет 40% от максимальной, происходит подрыв заряда в разгонном устройстве. Разгон контейнера до скорости ~ 75 м/с происходит на длине около 2 см за 2 миллисекунды. Во время разгона УХН, рожденные в конверторе, проникают в контейнер через переднее окно. Торможение контейнера осуществляется в процессе сжатия цилиндра из мягкого алюминиевого сплава - крешера (7), закреплённого на массивной подвижной плите (8) на длине около 5 см. После остановки контейнер оказывается в транспортном захвате и вместе с захваченными ультрахолодными нейтронами может быть транспортирован в экспериментальный зал за время 12.5 с. Путь, который проходит контейнер от начала разгона до остановки составляет 20 см.

На корпусе контейнера находится 8 кольцевых полосок шириной 4 мм из пермаллоя, необходимых для определения скорости движения контейнера на этапе разгона и торможения.

После торможения плита (8) отодвигается в положение (8а) и контейнер со скоростью ~ 1 м/с транспортируется в экспериментальный зал.

Транспортировка контейнера с УХН осуществляется электрической лебёдкой со скоростью около 1 м/с. Для защиты экспериментального зала от нейтронного и гамма - излучения в момент импульса реактора и фона запаздывающих нейтронов и наведённой гамма-активности после импульса применяется подвижный шибер, который начинает движение одновременно с началом извлечения контейнера с УХН после импульса реактора. К моменту прихода контейнера к стене экспериментального зала шибер открывается, пропускает контейнер в детектирующую систему, а затем вновь закрывается.

Приведены результаты испытаний ключевого элемента установки - разгонно-тормозной системы. Максимальная скорость движения контейнера на этапе разгона составляет 75 ± 3 м/с. На рисунке 4 приведен график скорости контейнера при работе реактора на мощности порядка 36% от

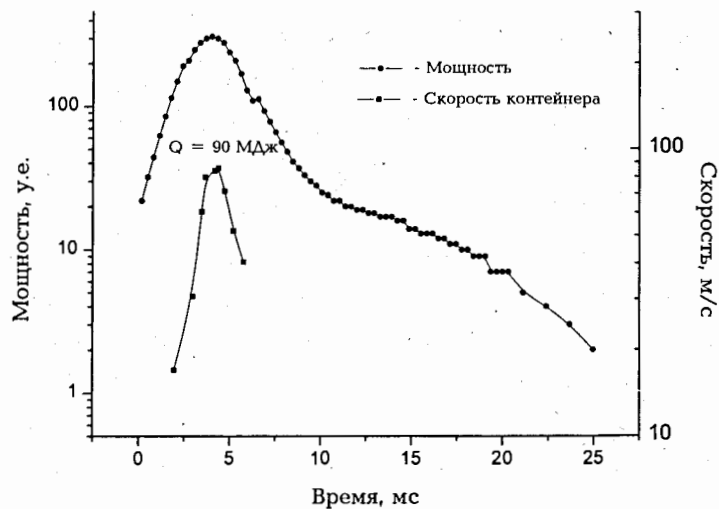


Рисунок 4 Импульс реактора БИГР и скорость контейнера в зависимости от времени. Момент времени $t=0$ соответствует заданному уровню мощности, подрыв заряда в разгонном устройстве задержан на 2 мс относительно $t=0$.

максимальной (энерговыведение в импульсе 90 МДж, максимальное энерговыведение - 250 МДж), на этом же рисунке показана форма импульса реактора БИГР.

Описана работа установки в режиме длинных (~1 сек.) импульсов реактора малой мощности, рассмотрено влияние срабатывания разгонно-тормозного устройства и вызванных этим колебаний блока замедлителя (рис. 5) на развитие импульса реактора. Колебания блока замедлителя регистрировались двумя индукционными датчиками, закрепленными на расстоянии 5 мм от переднего экрана с BC_4 (поз. 3 на рис. 3). Не было обнаружено зависимости периода и амплитуды колебаний от размещения дополнительной массы (≈ 500 кг) на транспортной платформе в качестве противовеса, наличия упоров под разгонным устройством. Измерения колебаний блока замедлителя при механическом возбуждении показали равенство периодов для случая подрыва заряда в разгонном устройстве и механического ненаправленного удара. Из этого был сделан вывод о том, что блок замедлителя колеблется с собственной частотой, которая не может

быть существенно уменьшена без серьезных изменений в конструкции транспортной платформы.

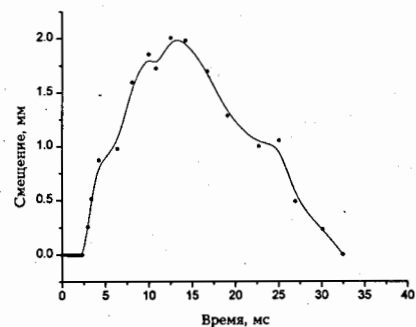


Рисунок 5 Смещение блока замедлителя после подрыва заряда, положительное значение смещения соответствует приближению к активной зоне реактора

Для того, чтобы оценить влияние колебаний блока замедлителя на развитие импульса реактора и выбрать безопасный режим работы, были проведены испытания разгонно-тормозного устройства вблизи активной зоны реактора при работе реактора в режиме длинных импульсов (с периодом порядка 100 мс) малой мощности. На рис. 6 показана форма импульса реактора во время одного из этих испытаний. Отчетливо наблюдается

модуляция мощности реактора, вызванная колебаниями блока замедлителя, период развития импульса на участках нарастания мощности составляет величину порядка 15 мс при среднем периоде 70 мс. Первый максимум мощности наблюдается примерно через 10 мс после

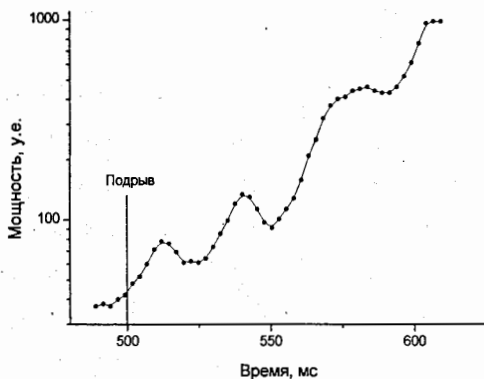


Рисунок 6 Форма импульса реактора малой мощности после срабатывания разгонно-тормозного устройства.

подрыва, что совпадает с максимумом первого колебания блока замедлителя (рис. 5 и 6). В рабочем режиме длительность импульса составляет $\Delta t_{1/2} = 2-4$ мс, причем гашение импульса осуществляется за счет ввода отрицательной реактивности из-за теплового расширения активной зоны. Таким образом к моменту времени когда амплитуда первого колебания блока замедлителя будет максимальной, импульс реактора будет завершен, однако положительная реактивность, внесенная блоком замедлителя, может скомпенсировать потерю реактивности за счет теплового расширения зоны и привести к затяжке рабочего импульса и даже генерации нового неконтролируемого импульса. Для исключения подобной ситуации при

работе реактора в режиме коротких импульсов был выбран режим при котором за 120 мс до импульса подается команда на сброс подвижной части зоны реактора, что приводит к безусловному гашению импульса в период 10 ± 5 мс после максимума.

Описана система управления установкой и детектирования ультрахолодных нейтронов. Управление транспортировкой и детектированием нейтронов осуществляется автоматической электромеханической системой, состоящей из следующих механизмов и устройств: электрическая лебедка перемещения шибера, электрическая лебедка перемещения контейнера, пневматическое устройство перемещения ударной плиты (поз. 8 рис. 3), детектор тепловых нейтронов, состоящий из 24 BF_3 счетчиков NWI-52, измерительный модуль в стандарте КАМАК. Детектирование УХН осуществляется путем регистрации нагретых нейтронов. Расчетная эффективность регистрации нейтронов, нагретых на бериллии - 11%. Команда на начало перемещения контейнера с УХН подается с пульта реактора после завершения сброса подвижной части зоны. По этой команде происходит срабатывание пневмоцилиндра, который перемещает ударную плиту в открытое положение. Сигнал открытого положения ударной плиты запускает лебедки шибера и транспортного контейнера - шибер освобождает канал для транспортировки контейнера в экспериментальный зал. Через 12,5 с после начала движения контейнер останавливается внутри детектора и подается команда на закрытие шибера. Время закрытия шибера - 9,5 с. Таким образом регистрация нагретых УХН может быть начата через 22 секунды после импульса реактора. Блок-схема измерительного модуля показана на рисунке 7.

Время закрытия шибера - 9.5 с. Таким образом регистрация нагретых УХН может быть начата через 22 секунды после импульса реактора. Блок-схема измерительного модуля показана на рисунке 7.

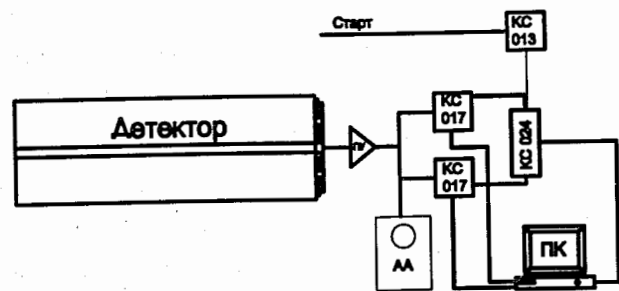


Рисунок 7 Блок-схема регистрирующей электроники. ПУ - предусилитель, КС017, КС013 - пересчетные схемы, КС024 - таймер (минимальный интервал - 1 мс), ПК - персональный компьютер, АА - амплитудный анализатор.

Регистрация нагретых нейтронов ведется двумя пересчетными схемами КС017, управляемыми таймером КС024. Запуск измерений осуществляется стартовым импульсом, регистрируемым пересчетной схемой КС013. Разбивка интервала регистрации на группы временных интервалов осуществляется на этапе подготовки к измерению - допускается иметь до 8 тысяч временных каналов, шириной от 1 мс до 10 с, разбитых на группы. Использование двух пересчетных схем позволяет обойтись без буферной памяти в крейте КАМАК - пока идет регистрация одной из схем КС017, показания другой записываются непосредственно в память компьютера. Стартовым импульсом является импульс с пульта управления реактором, соответствующий 40% уровню мощности, который одновременно запускает развертку осциллографов, регистрирующих сигналы с электромагнитных датчиков перемещения контейнера. В дальнейшей обработке используются данные с детектора нейтронов начиная с 22-й секунды после импульса.

Приведены результаты первого эксперимента по извлечению УХН на созданном источнике. Первый эксперимент по извлечению УХН был осуществлен с неохлаждаемым полиэтиленовым конвертором, энерговыделение в импульсе составило 90 МДж (рис. 4). Плотность потока тепловых нейтронов в канале разгонно-тормозного устройства была измерена в отдельном эксперименте с помощью метода активационных индикаторов ($^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$, $^{63}\text{Cu}(n,\gamma)^{64}\text{Cu}$, $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$) и составила для первого эксперимента $5.3 \cdot 10^{15}$ н/см²·с на полувысоте нейтронного импульса. Расчетная плотность УХН в контейнере, соответствующая этой плотности потока тепловых нейтронов и длине извлечения порядка 10 см (расстояние - которое контейнер проходит с максимальной скоростью), что при длине контейнера 28 см приводит к разбавлению максимальной плотности в 3 раза - ≈ 170 н/см³. Для оценки плотности УХН в контейнере обрабатывались

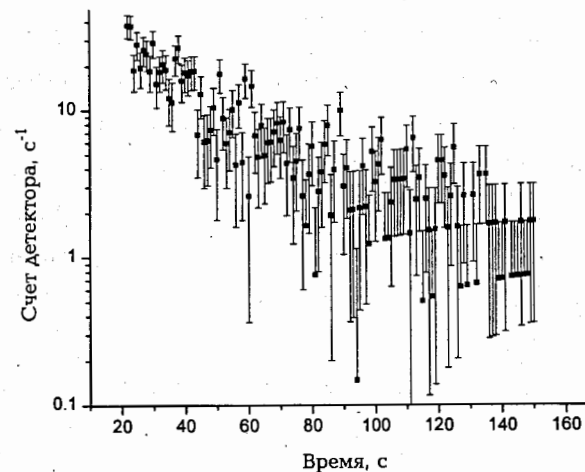


Рисунок 8 Счет детектора за вычетом фона запаздывающих нейтронов.

данные начиная с 22-й секунды после импульса. Возможное влияние наведенной γ -активности контейнера на нейтронные детекторы контролировалось независимым каналом регистрации - амплитудным

анализатором (рис. 7). Начиная с 22-й секунды после импульса реактора были сняты 8 амплитудно-дифференциальных спектров с детектора нейтронов, время набора каждого спектра составило порядка 13 с. Не было зарегистрировано импульсов от γ -квантов, превышающих порог регистрации пересчетных схем. Фон запаздывающих нейтронов учитывался по отдельно проведенным измерениям с импульсами малой мощности (0.6 - 1.2 МВт) и составил в рабочем импульсе величину 2.5 ± 0.1 имп/с на 60-й секунде после импульса. На рисунке 8 показана временная зависимость отсчетов детектора после вычета фона запаздывающих нейтронов. Время хранения УХН в контейнере, полученное из временной зависимости (рис. 8) составило 30 ± 2 с, что в совокупности с интенсивностью счета нагретых нейтронов дает для плотности нейтронов в контейнере значение $\approx 20 \pm 4$ н/см³ на 22-й секунде после импульса реактора при условии, что все потери в контейнере связаны с неупругим рассеянием - это справедливо для случая сохранения целостности Ве покрытия и требует дополнительной проверки. Экстраполированное к моменту времени $t=0$ значение плотности $\approx 40 \pm 8$ н/см³. Это значение получено исходя из расчетной эффективности детектора и нуждается в уточнении после проведения калибровочных измерений, в которых детектирующая система и контейнер помещаются на пучок УХН с известной плотностью и регистрируются нейтроны, нагретые на стенках контейнера. Такие измерения будут проведены на пучке УХН в ПИЯФ (г. Гатчина) после ввода в строй канала УХН в конце 1996 г.

В четвертой главе предложена методика измерения времени жизни нейтрона с использованием импульсного источника УХН, приведены результаты моделирования эксперимента, оценена точность измерения времени жизни нейтрона, достижимая при реализации расчетных параметров импульсного источника УХН. Реализация источника, который позволяет получить в сравнительно небольшом объеме 10^8 - 10^9 УХН, открывает возможности для постановки принципиально нового

эксперимента по определению времени жизни нейтрона. Систематические погрешности экспериментов с ультрахолодными нейтронами по измерению времени жизни нейтрона определяются, как правило, расчётным характером поправок на потери УХН в результате неупругого рассеяния на стенках ловушек. Учёт этих потерь экспериментально затруднён из-за больших (несколько десятков и даже сотен литров) объёмов, в которых хранятся нейтроны, относительно невысокой плотности источников УХН и, как следствие, невозможности осуществить высокоэффективный, статистически обеспеченный анализ процессов захвата и нагрева УХН в стенках объёма хранения. Систематические погрешности этих экспериментов составляют величину порядка 1 секунды и возможности повышения точности в применяемых методиках практически исчерпаны, если не считать возможностей метода калибровки потерь в ловушке путём проведения дополнительных измерений с изменённым коэффициентом потерь на стенках^[7].

Небольшой объём (2-3 литра) контейнера с УХН и высокая плотность нейтронов в случае импульсного источника дают возможность непосредственно измерить вероятность потерь на стенках ловушки и измерить время жизни нейтрона с точностью, определяемой лишь статистикой эксперимента.

Идея эксперимента заключается в том, что объём хранения УХН окружается счётчиками нагретых нейтронов, которые регистрируют зависимость $J_{\alpha}(t)$ и детекторами, регистрирующими электроны β -распада (в качестве варианта возможен детектор протонов β -распада, расположенный внутри объёма хранения) $J_{\beta}(t)$. Эффективности детектирующих систем равны ε_{α} и ε_{β} соответственно.

В общем случае зависимость числа УХН в объёме хранения можно представить в виде

$$N(t) = N_0 \cdot \exp \left[-\frac{t}{\tau_{\beta}} - (\eta_{\alpha} + \eta_{\beta}) \cdot \int_0^t \gamma(t') dt' \right] \quad (4),$$

где N_0 - число нейтронов в начальный момент времени, τ_β - время жизни нейтрона, η_{ϵ} и η_a - приведённые вероятности потерь в результате нагрева на стенках ловушки и захвата соответственно, γ - эффективная частота соударений. Для интенсивностей регистрации $J_{\epsilon}(t)$ и $J_\beta(t)$ справедливы выражения:

$$J_{\epsilon}(t) = N(t) \cdot \epsilon_{\epsilon} \cdot \eta_{\epsilon} \cdot \gamma(t), \quad J_\beta(t) = N(t) \cdot \epsilon_\beta \cdot \frac{1}{\tau_\beta} \quad (5).$$

Дифференцируя величину $\ln(N(t))$ и используя выражение для $\frac{J_{\epsilon}}{J_\beta}$, получаем соотношение

$$-\frac{d}{dt} [\ln(J_\beta)] = \frac{1}{\tau_\beta} \left[1 + \frac{\eta_{\epsilon} + \eta_a}{\eta_{\epsilon}} \cdot \frac{\epsilon_\beta}{\epsilon_{\epsilon}} \cdot \frac{J_{\epsilon}}{J_\beta} \right] \quad (6),$$

которое позволяет определить τ_β путем экстраполяции экспериментально измеренной зависимости (6) к значению $\frac{J_{\epsilon}}{J_\beta} = 0$.

Были проведены расчёты по методу Монте Карло для объёма хранения 2 литра со стенками, покрытыми Ве. Начальное количество нейтронов составляло 10^8 - это соответствует планируемой в первых экспериментах плотности УХН. Эффективности были выбраны $\epsilon_{\epsilon} = 70\%$ и $\epsilon_\beta = 10\%$. Расчетная точность определения времени жизни составила 5 секунд. То есть точность определения времени жизни нейтрона ~3 секунд, достигнутая на сегодня в трёх наиболее прецизионных экспериментах по измерению времени жизни нейтрона, может быть получена за несколько импульсов реактора БИГР с импульсным источником УХН.

Работы, положенные в основу диссертации:

1. Kharitonov A.G., Alfimenkov V.P., Lushchikov V.I., Shvetsov V.N., Strelkov A.V., et al. Preliminary Results of Neutron Lifetime Measurements with Gravitational UCN Trap. #Fundamental Physics with Slow Neutrons: Proc.

of the Intern. Workshop on Fundamental Physics with Slow Neutrons ILL, Grenoble, France, March, 1989., Amsterdam: North-Holland, 1989, p.98- 100

2. Алфименков В.П., Несвижевский В.В., Серебров А.П., Стрелков А.В., Тальдаев Р.Р., Харитонов А.Г., Швецов В.Н. Результат измерения времени жизни нейтрона в эксперименте с гравитационной ловушкой и анализ погрешностей эксперимента. #1992.- т.102, вып.3, ЖЭТФ.,
3. Воинов А.М., Колесов В.Ф., Кувшинов М.И., Смирнов И.Г., Стойка А.Д., Стрелков А.В., Шабалин Е.П., Швецов В.Н. Получение газа УХН с высокой плотностью на импульсном реакторе. #Intern. Workshop on Pulsed Advanced Neutron Sources (PANS), Russia, Dubna, Jun., 1991, (Collected Papers). -(JINR Д3-92-76), Дубна, с.25-34
4. Stoica A.D., Strelkov A.V., Shvetsov V.N. Proposal of Experiments with Ultracold Neutrons (UCN) at BИGR Reactor (Arzamas-16). #6th Intern. Conf. on Nuclei far from Stability. 9th Intern. Conf. on Atomic Masses and Fundamental Constants, Bernkastel-Kues, Germany, Jul., 1992. Programme and Abstracts., Bernkastel-Kues, 1992, p. PH18
5. Alfimenkov V.P., Kharitonov A.G., Nesvizhevsky V.V., Serebrov A.P., Shvetsov V.N., Strelkov A.V., Taldav R.R. Method for Calibration of Losses in Neutron Lifetime Experiments with UCN. #1993.- v.324, N.3., Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.A., p.496-500.
6. Стойка А.Д., Стрелков А.В., Швецов В.Н. Динамические конверторы ультрахолодных нейтронов. #ОИЯИ, Дубна, 1992, P3-92-116
7. Багрянов Б.В., Карташов Д.Г., Кувшинов М.И., Нехаев Г.В., Смирнов И.Г., Стойка А.Д., Стрелков А.В., Швецов В.Н. Динамический конвертор ультрахолодных нейтронов (УХН) на импульсном реакторе. Ядерная Физика (1996), 11.

Литература:

- ¹ Шапиро Ф. Л. Нейтронные исследования. М.: Наука, 1976, с. 195.
- ² Шапиро Ф. Л. // ЭЧАЯ. 1972. Т. 2. С. 973.
- ³ Steyerl A. et al. // Phys. Lett. 1986. V. A116. P. 347.
- ⁴ Покотилловский Ю. Н. // Письма в ЖТФ. 1980. Т. 6. вып. 21. С. 1300.
- ⁵ Stoica A.D., Strelkov A.V., Shvetsov V.N. - Proposal of Experiments with Ultracold Neutrons (UCN) at B1GR Reactor (Arzamas-16). #6th Intern.Conf.on Nuclei far from Stability. 9th Intern.Conf.on Atomic Masses and Fundamental Constants, Bernkastel-Kues, Germany, Jul, 1992. Bernkastel-Kues, 1992, p.PH18.
- ⁶ Стойка А.Д., Стрелков А.В., Швецов В.Н. Динамические конверторы ультрахолодных нейтронов.#ОИЯИ, Дубна, 1992, P3-92-116
- ⁷ Alfimenkov V.P., Kharitonov A.G., Nesvizhevsky V.V., Serebrov A.P., Shvetsov V.N., Strelkov A.V., Taldaev R.R. Method for Calibration of Losses in Neutron Lifetime Experiments with UCN.#1993.-v.324, N.3., Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.A., p.496-500

Рукопись поступила в издательский отдел
30 июля 1996 года.