

## Новая установка для измерения времени жизни нейтрона с большой гравитационной ловушкой ультрахолодных нейтронов

© А.П. Серебров, А.К. Фомин, А.Г. Харитонов, В.Е. Варламов, А.В. Чечкин

Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова,  
188300 Гатчина, Ленинградская область, Россия  
e-mail: serebrov@pnpi.spb.ru

(Поступило в Редакцию 14 февраля 2013 г.)

На данный момент наилучшая точность измерений времени жизни нейтрона достигнута в эксперименте ФГБУ „ПИЯФ“ с гравитационной ловушкой ультрахолодных нейтронов. Новая установка с большой гравитационной ловушкой является дальнейшим развитием методов и подходов, применявшихся в предыдущем эксперименте. Планируется достичь точности измерений 0.2 s, что в 4 раза лучше существующего уровня точности. Для моделирования методом Монте-Карло составлена модель эксперимента. Модель позволяет заложить конкретное значение времени жизни нейтрона, затем повторить экспериментальную процедуру и увидеть, есть ли разница между заложенным и измеренным значениями. В результате моделирования определена систематическая неопределенность, связанная с методом вычисления эффективной частоты соударений ультрахолодных нейтронов в ловушке. Она составила 0.1 s. Также проведено моделирование различных конструктивных элементов установки.

### 1. Введение

Задача улучшения точности измерений по времени жизни нейтрона имеет большое значение для физики элементарных частиц и космологии.

Распад свободного нейтрона на протон, электрон и антинейтрино определяется процессом слабого взаимодействия, переходом  $d$ -кварка в  $u$ -кварк. В стандартной модели элементарных частиц смешивание кварков описывается с помощью матрицы Cabibbo–Kobayashi–Maskawa (СКМ), которая должна быть унитарной. Матричный элемент матрицы  $V_{ud}$  может быть определен из ядерного  $\beta$ -распада и  $\beta$ -распада нейтрона. Вычисление  $V_{ud}$  из данных по нейтронному  $\beta$ -распаду является крайне привлекательным из-за простоты теоретического описания. Но этот путь требует прецизионного измерения как времени жизни нейтрона, так и асимметрии  $A$  нейтронного  $\beta$ -распада. Нарушение унитарности матрицы СКМ означало бы выход за пределы стандартной модели с тремя поколениями кварков и лептонов.

Прецизионные измерения времени жизни нейтрона оказываются также исключительно важными для проверки модели формирования Вселенной. Наблюдаемыми величинами в модели Большого взрыва являются первоначальные распространенности дейтерия и гелия-4. Они зависят от отношения числа барионов к числу фотонов на стадии первичного нуклеосинтеза и времени жизни нейтрона. Таким образом, прецизионное измерение времени жизни нейтрона оказывает влияние на проверку модели нуклеосинтеза на ранней стадии формирования Вселенной.

Также время жизни нейтрона исключительно важно для нейтринных экспериментов, так как в эффективность нейтринных детекторов входит сечение реакции обратного  $\beta$ -распада нейтрона.

В последние годы вопрос об измерениях времени жизни нейтрона активно обсуждался и сделаны выводы

о необходимости новых, более точных измерений [1]. На данный момент самая высокая точность по измерению времени жизни нейтрона достигнута в эксперименте ФГБУ „ПИЯФ“ с гравитационной ловушкой ультрахолодных нейтронов (УХН) [2,3]. Результат этого эксперимента  $878.5 \pm 0.8$  s. На рис. 1 представлен проект новой экспериментальной установки по измерению времени жизни нейтрона с большой гравитационной ловушкой, которая является дальнейшим развитием методов и подходов, применявшихся в эксперименте [2,3]. Задача нового эксперимента состоит в достижении точности 0.2 s.

### 2. Метод экстраполяции ко времени жизни нейтрона

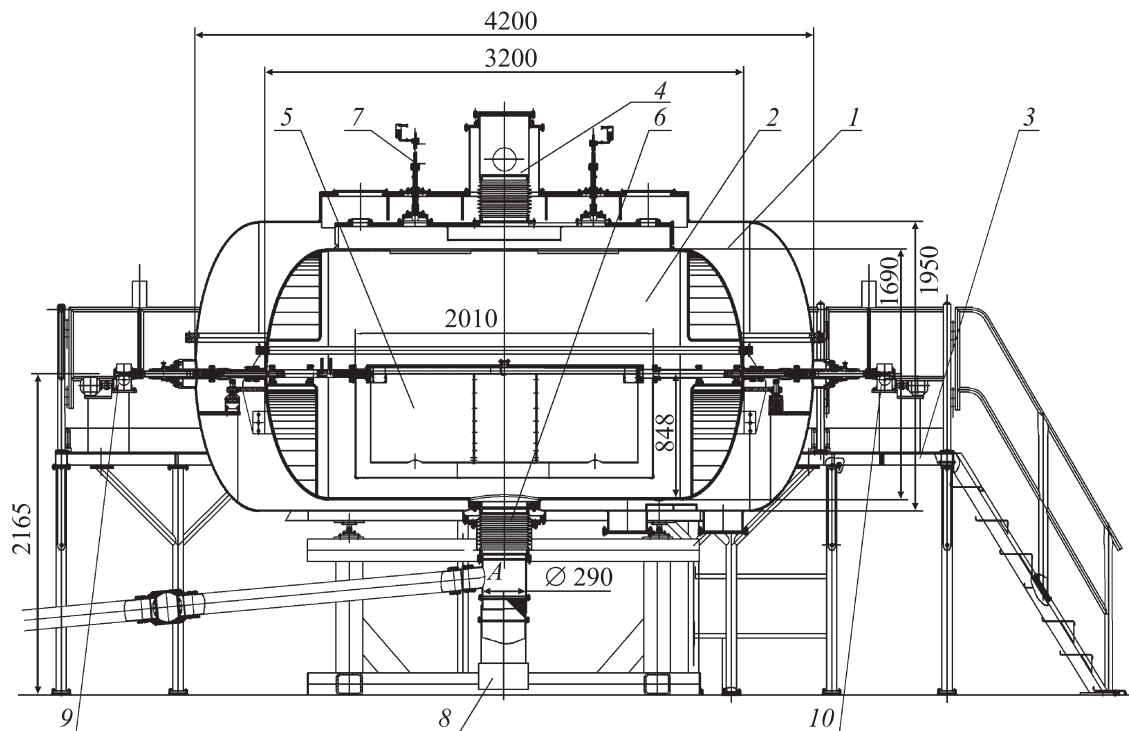
Время хранения  $\tau_{st}$  УХН вычисляется из измеренного числа нейтронов ( $N$ ), остающихся в ловушке после различных времен удержания ( $t$ ):

$$\tau_{st} = (t_2 - t_1) / \ln(N_1/N_2).$$

Полная вероятность потерь  $\tau_{st}^{-1}$  УХН содержит две части: вероятность нейтронного  $\beta$ -распада  $\tau_n^{-1}$  и вероятность потерь в стенках ловушки  $\tau_{loss}^{-1}$  УХН:

$$\tau_{st}^{-1} = \tau_n^{-1} + \tau_{loss}^{-1}. \quad \tau_{loss}^{-1} = \eta(T)\gamma(E),$$

где  $\eta(T)$  — независимый от энергии УХН фактор потерь,  $\gamma(E)$  — получаемая расчетом эффективная частота столкновений, которая зависит от энергии УХН и размеров ловушки. Значение времени жизни нейтрона может быть получено линейной экстраполяцией  $\tau_{st}^{-1}$  к нулевому значению  $\gamma(E)$ . Различные значения эффективной частоты столкновений УХН  $\gamma(E)$  можно получить с использованием ловушек разного размера (размерная экстраполяция) или (и) различных энергий УХН (энергетическая экстраполяция).



**Рис. 1.** Экспериментальная установка: 1 — наружный вакуумный сосуд, 2 — внутренний вакуумный сосуд, 3 — платформа для обслуживания, 4 — ввод для откачки внутреннего сосуда, 5 — ловушка со вставкой в нижнем положении, 6 — нейтронная система, 7 — система напыления ловушки и вставки, 8 — детектор, 9 — механизм поворота ловушки, 10 — механизм поворота вставки.

### 3. Экспериментальная установка

Время жизни нейтрона будет измеряться методом удержания УХН в криогенной ловушке с гравитационным затвором. Ловушка УХН представляет собой фигуру вращения с горизонтальной осью. Для покрытия внутренних стенок ловушки будет использовано безводородное фторполимерное масло (перфторполиэфир), которое характеризуется рекордно низкими потерями УХН и высокой покрывной способностью. Потери УХН, вызванные неупругим рассеянием на масле, будут значительно подавлены при низкой температуре ловушки (80–100 К). Например, полученное в предыдущем эксперименте время хранения УХН в ловушке лишь на 5 с отличалось от времени жизни нейтрона. В новом эксперименте планируется использовать более низкие температуры, где следует ожидать дополнительное подавление потерь УХН на стенках. Учет потерь УХН на стенках ловушки осуществляется методом размерной экстраполяции. Ранее для этого использовались две сменные ловушки УХН с разными размерами. В новом спектрометре планируется использовать одну большую ловушку. Изменение частоты соударений УХН в ловушке (принцип размерной экстраполяции) будет достигнуто путем опускания в ловушку дополнительной поверхности. Эта операция будет осуществляться без разборки спектрометра и нарушения вакуума. Такой подход обеспечит значительное улучшение статистической

точности измерений в ловушке с большой частотой соударений, поскольку объем ловушки не уменьшается. Статистическая точность измерений по сравнению со старой версией спектрометра будет улучшена за счет увеличения объема ловушки в 5.3 раза по отношению к объему большой ловушки в старом эксперименте и в 18 раз по отношению к объему малой ловушки. Кроме того, планируется снижение потерь УХН в нейтронных водах и стенках криостата. Влияние систематических эффектов на результат измерения времени жизни нейтрона планируется подавить до уровня 0.1–0.15 с. Единственной поправкой предыдущего эксперимента был учет потерь УХН на остаточном вакууме. В новом спектрометре планируется значительно улучшить вакуум (лучше  $10^{-7}$  mbar) за счет размещения прямо над ловушкой УХН криогенного насоса большой площади, работающего при температуре жидкого гелия. Криогенный насос должен обеспечивать продолжительное время работы от одной заправки.

### 4. Моделирование эксперимента

Методом Монте-Карло (МК) произведено моделирование эксперимента. При моделировании использовалась программа [4], разработанная для нейтронных расчетов с учетом гравитации. В расчете смоделирован весь экспериментальный процесс и проведена обработка данных — так же, как это планируется сделать в эксперименте.

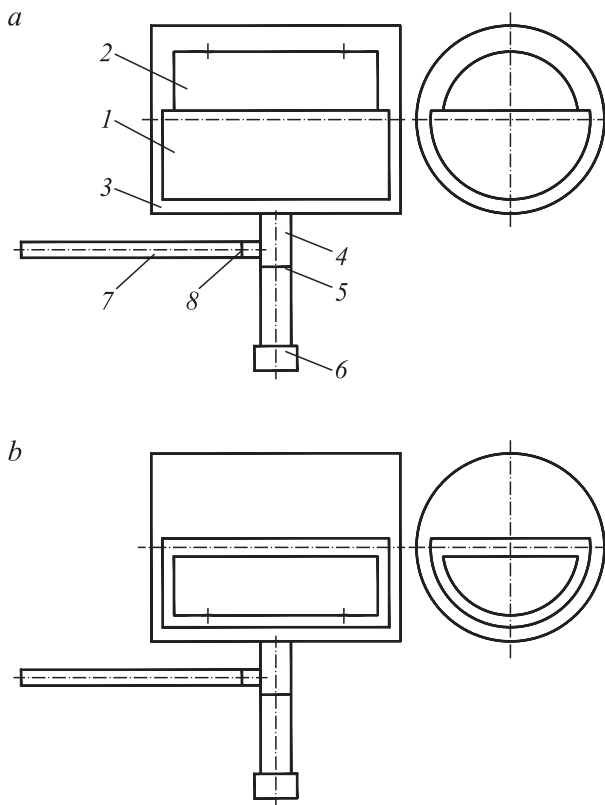


Рис. 2. Расчетная схема экспериментальной установки.

Расчетная схема экспериментальной установки представлена на рис. 2. УХН хранятся в гравитационной ловушке цилиндрической формы 1. Ловушка 1 имеет диаметр 1.4 м и длину 2 м. В нее может опускаться вставка 2, выполненная в виде цилиндрической обечайки диаметром 1.2 м и длиной 1.8 м. Ловушка и вставка находятся в вакуумном объеме 3 цилиндрической формы диаметром 1.66 м и длиной 2.2 м. Они имеют общую ось вращения типа труба в трубе. Поворот ловушки и вставки может осуществляться независимо, приводы расположены с противоположных сторон. К вакуумному объему снизу подходит нейтронный канал 4 диаметром 0.54 м и длиной 1.17 м, внизу которого располагается детектор УХН 6. Выпуск нейтронов на детектор регулируется затвором 5. Установка заполняется нейтронами из источника через нейтронный канал 7 диаметром 0.14 м и длиной 2.1 м. Наполнение установки контролируется затвором 8. Измерения будут проводиться без вставки (рис. 2, а) и со вставкой (рис. 2, б). Использование вставки позволяет изменять частоту соударений УХН в ловушке без нарушения вакуума.

Нейтронные каналы 4 и 7 выполнены из нержавеющей стали с граничной скоростью 6.2 м/с и коэффициентом потерь  $3 \cdot 10^{-4}$ . Поверхности ловушки 1, вставки 2 и вакуумного объема 3 покрыты низкотемпературным маслом фомблин с граничной скоростью 4.85 м/с и коэффициентом потерь  $2 \cdot 10^{-6}$ . Отражения нейтронов от стенок нейтронных каналов являются в основном зеркальными, вероятность диффузного отражения составляет 0.7%.

При отражении УХН от стенок ловушки, вставки и вакуумного объема вероятность диффузного отражения составляет 10%. При диффузном отражении использовался закон Ламберта, т.е. вероятность отражения под углом  $\alpha$  к нормали к поверхности пропорциональна  $\cos \alpha$ . Поглощение при соударениях со стенками имеет закон:  $\mu = \frac{2\eta X}{\sqrt{1-X^2}}$ , где  $\mu$  — вероятность потери на соударение,  $\eta$  — коэффициент потерь,  $X = \frac{v_n}{v_b}$ ,  $v_n$  — проекция вектора скорости на нормаль к поверхности,  $v_b$  — граничная скорость материала стенки.

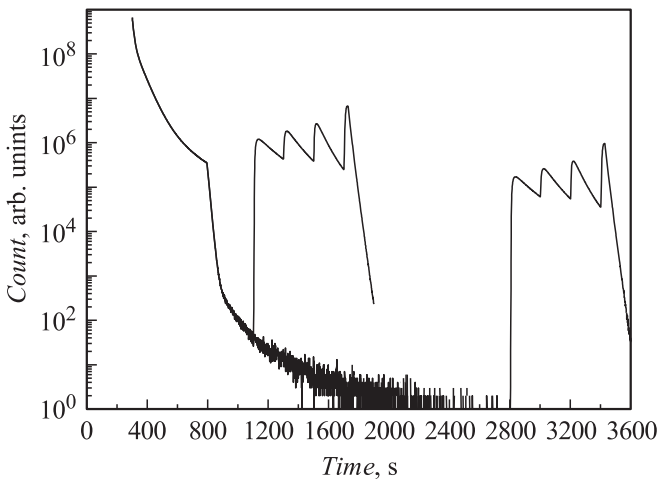
В модели закладывается конкретное значение времени жизни нейтрона  $\tau_{n0}$ , затем моделируется процесс измерений и проводится обработка данных так же, как в эксперименте. В результате экстраполяции получается измеренное значение времени жизни нейтрона, которое затем сравнивается с  $\tau_{n0}$ , и делается вывод о систематической ошибке.

Процесс измерений (его параметры представлены в таблице) состоит в следующем. Сначала объем 3 в течение 300 с наполняется нейтронами из источника (максвелловский спектр) через нейтронный канал 7 при открытом затворе 8. При этом затвор 5 закрыт. При наполнении объема 3 ловушка УХН находится в верхнем положении (угол поворота  $\theta = 180^\circ$ ). В конце процесса наполнения ловушка поворачивается вниз, и происходит захват УХН. Ловушка останавливается в положении  $\theta = 15^\circ$ , закрывается затвор 8 нейтронного канала наполнения, открывается затвор 5 нейтронного канала выпуска, и начинается процесс мониторинга, который занимает 500 с. Во время мониторинга ловушка очищается от нейтронов, энергия которых превышает гравитационный барьер при удержании. Затем она поворачивается в положение удержания  $\theta = 0^\circ$ . Удержание проводилось с временами  $t_1 = 300$  с или  $t_2 = 2000$  с. После удержания происходит 4 последовательных поворота ловушки ( $\theta_1 = 19^\circ$ ,  $\theta_2 = 24^\circ$ ,  $\theta_3 = 33^\circ$ ,  $\theta_4 = 180^\circ$ , время нахождения в каждом положении — 200 с) для слива УХН на детектор 6. Вставка 2 все время повернута вверх во время измерений без вставки. Во время измерений со вставкой она поворачивается вместе с ловушкой. На дне вставки сделаны два отверстия диаметром 0.1 м, которые необходимы для проведения напыления фомблина на ловушку, когда вставка находится в верхнем положении.

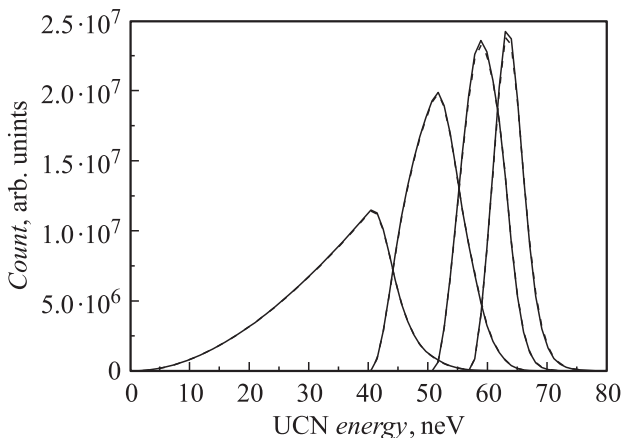
Параметры измерительного процесса

Цикл	$t$ , s	$\theta$ , deg	$E_{\text{trap}}^1$ , neV
Наполнение	300	180	0
Мониторинг	500	15	61.6
Удержание	300; 2000	0	80.4
Слив 1	200	19	56.5
Слив 2	200	24	50.5
Слив 3	200	33	40.1
Слив 4	200	180	0

Примечание.  $E_{\text{trap}}^1$  — гравитационный барьер для УХН в ловушке при ее заданном повороте.



**Рис. 3.** Временная диаграмма счета детектора для двух времен удержания 300 и 2000 с. Измерения без вставки и со вставкой графически неразличимы в логарифмическом масштабе. Уровень фона подтекающих нейтронов во время первого измерения (300 с) составляет  $\sim 10^{-5}$  по отношению к эффекту.



**Рис. 4.** Спектры УХН при сливах после короткого времени удержания. Сплошная линия — измерения без вставки, штриховая линия — измерения со вставкой.

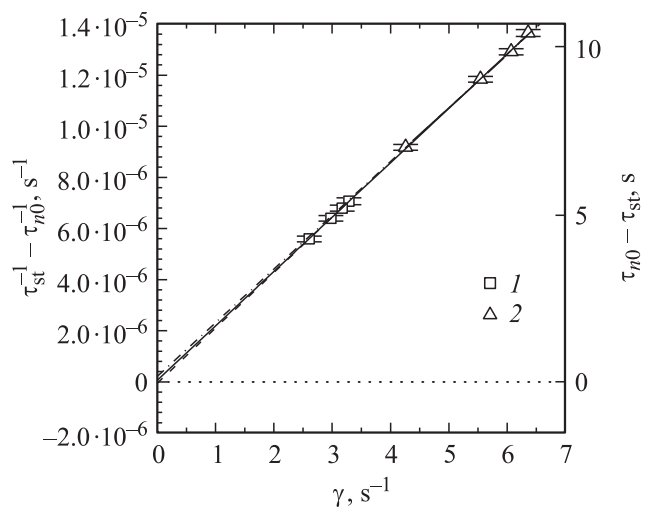
Также благодаря этим отверстиям улучшен обмен УХН между внутренним объемом вставки и зазором между вставкой и ловушкой.

В результате моделирования получены временные диаграммы счета детектора (рис. 3). Обработка данных проводится в соответствии с методом, описанным в разд. 2, т.е. определяется число нейтронов  $N_1$ , зарегистрированных детектором после времени удержания  $t_1 = 300$  с и  $N_2$  для времени удержания  $t_2 = 2000$  с. Далее вычисляется эффективная частота соударений ( $\gamma$ ) УХН со стенками ловушки (ловушки и вставки) для различных участков спектра. Указанные выше углы поворота ловушки соответствуют положению края ловушки относительно ее дна ( $h_1 = 55.2$  см,  $h_2 = 49.3$  см,  $h_3 = 39.1$  см,  $h_4 = 0$  см) или минимальной энергии нейтрона, необходимой для вылета из

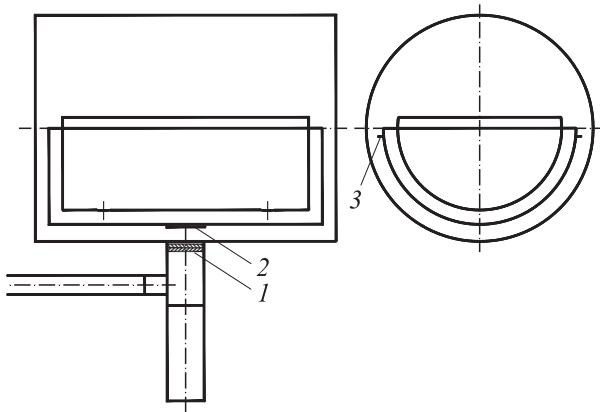
ловушки ( $E_1 = 56.5$  neV,  $E_2 = 50.5$  neV,  $E_3 = 40.1$  neV,  $E_4 = 0$  neV). Реальный энергетический интервал зарегистрированных УХН при каждом сливе может быть выявлен из МК-расчетов. При вычислении эффективной частоты соударений использовались спектры УХН при сливах, полученные в данном МК-моделировании (рис. 4). В расчетах учитывалось то обстоятельство, что при соударениях на разной высоте от дна ловушки нейтроны имели разную энергию.

Экстраполяция полученных времен хранения ( $\tau_{st}$ ) ко времени жизни нейтрона показана на рис. 5. В результате экстраполяции получены следующие отклонения от значения времени жизни нейтрона, заложенного в модели:  $0.05 \pm 0.54$  с при измерениях без вставки,  $-0.16 \pm 0.32$  с при измерениях со вставкой,  $-0.05 \pm 0.10$  с при совместной экстраполяции. Точность измерений при совместной экстраполяции выше пропорционально увеличению базы экстраполяции. Таким образом, принятое в модели время жизни нейтрона воспроизведено с точностью 0.1 с. Эта ошибка может быть принята как систематическая неопределенность метода размерной экстраполяции из-за использования расчетного значения  $\gamma$ . Достигнутую точность вычислений удалось получить благодаря использованию компьютерных кластеров. Набор статистики для построения экстраполяции с полученной точностью занял 1.5 г. Во время этого расчета было смоделировано поведение  $6.4 \cdot 10^{11}$  нейтронов.

Абсолютная точность измерения времени жизни нейтрона 0.1 с соответствует относительной точности измерений  $10^{-4}$ . Эта точность представляется исключительно высокой и требуются пояснения за счет чего она достигнута. Дело в том, что вероятность потерь УХН в ловушке по отношению к вероятности распада составляет всего лишь 0.5%, поэтому измерения являются практически прямыми, а поправка 0.5% измеряется



**Рис. 5.** Экстраполяция ко времени жизни нейтрона. Экспериментальные данные: 1 — измерения без вставки, 2 — измерения со вставкой. Экстраполяция: штриховая линия — измерения без вставки, штрихпунктирная линия — измерения со вставкой, сплошная линия — совместная экстраполяция.



**Рис. 6.** Расчетная схема экспериментальной установки с дополнительными элементами: 1 — тепловой экран „шеvron“, 2 — тепловой экран „грибок“, 3 — уголок жесткости.

с вполне умеренной точностью  $\sim 2\%$ . Таким образом, достигается относительная точность измерения времени жизни нейтрона  $10^{-4}$ .

## 5. Моделирование с учетом конструктивных особенностей экспериментальной установки

При изготовлении установки появилась необходимость внести в ее конструкцию элементы, которые не были учтены в МК-модели (рис. 2): тепловой экран, более высокую вставку, уголок на боковой поверхности ловушки. Для изучения их влияния модель была доработана (рис. 6) и проведены соответствующие расчеты.

### 5.1. Тепловой экран

Температура ловушки УХН составляет  $-(170-190)^\circ\text{C}$ . Тепловой экран необходим для защиты ловушки от теплового излучения из нейтронновода выпуска УХН. Смоделировано два вида тепловых экранов: „шеvron“ и „грибок“ (рис. 6).

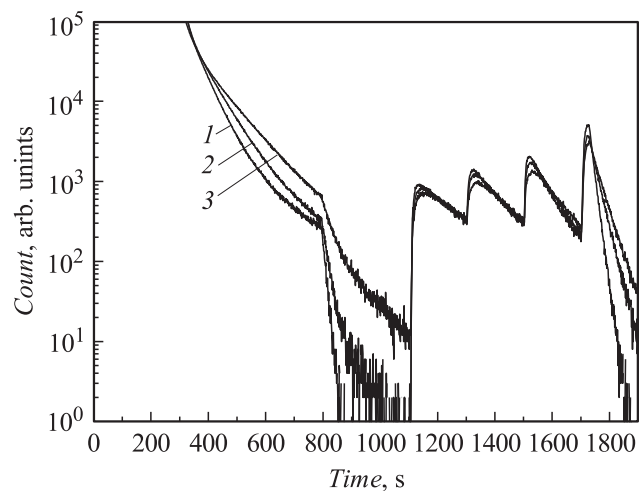
Результаты показали, что экран типа „шеvron“ сильно затрудняет выпуск УХН, что приведет к систематической ошибке (рис. 7). Эта ошибка связана с тем, что после короткого времени удержания остаются недослитые нейтроны, которые добавятся к счету детектора после первого слива. Это увеличит  $\tau_{st}^{-1}$  для первого слива на 0.64% и сделает экстраполяцию невозможной.

Экран типа „грибок“ можно расположить в непосредственной близости ко дну ловушки, и он, таким образом, не будет влиять на выпуск УХН. Однако при наличии уголка 3 на боковой поверхности ловушки экран должен быть отодвинут, чтобы уголок не задевал его при вращении ловушки. В этом случае выпуск УХН замедляется из-за уменьшения зазора между экраном и нейтронноводом выпуска, что приведет к систематической ошибке, аналогичной варианту с экраном „шеvron“,

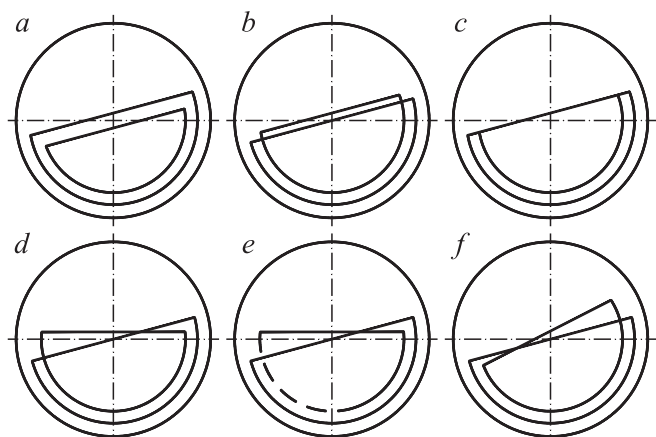
с увеличением  $\tau_{st}^{-1}$  для первого слива на 2.5 стандартные ошибки. Чтобы решить эту проблему, можно уменьшить размер уголка или сделать в нем вырез таким образом, чтобы он не задевал экран.

### 5.2. Вставки разной высоты

Вставка изготовлена таким образом, что при повороте ловушки со вставкой боковая кромка вставки всегда располагается ниже боковой кромки ловушки. При конструировании их поворотного узла возникла необходимость сделать вставку выше (рис. 6). В этом случае при повороте боковая кромка вставки будет



**Рис. 7.** Временная диаграмма счета детектора с разными тепловыми экранами: 1 — тепловой экран „грибок“ на высоте 10 см от дна вакуумного объема (кривая фактически совпадает с кривой вытекания без теплового экрана), 2 — тепловой экран „грибок“ на высоте 6 см, 3 — тепловой экран „шеvron“. Измерения без вставки.



**Рис. 8.** Схемы с разными вариантами вставки: *a* — вставка ниже ловушки, *b* — вставка выше ловушки, *c* — вставка и ловушка одинаковой высоты, *d* — вставка остается неподвижной при сливах, *e* — вставка остается неподвижной при сливах (во вставке сделаны дополнительные отверстия), *f* — вставка поворачивается на больший угол, чем ловушка.



всегда выше боковой кромки ловушки. При измерениях со вставкой это замедляет вытекание УХН из ловушки. Для исследования этого вопроса были проведены расчеты нескольких конфигураций (рис. 8): вставка ниже ловушки, вставка выше ловушки, вставка и ловушка одинаковой высоты, вставка остается неподвижной при сливах, вставка остается неподвижной при сливах (во вставке сделаны дополнительные отверстия), вставка поворачивается на больший угол, чем ловушка.

Проведенные расчеты показали, что для схем, представленных на рис. 8, *b–e*, мы имеем замедление вытекания УХН при измерениях со вставкой. Этот эффект малозаметен на кривых вытекания, но виден на графиках спектров сливов. Если такое отличие спектров не учитывается при вычислении  $\gamma$ , то это приводит к систематической ошибке  $\sim 0.05$  s при экстраполяции измерений со вставкой. Спектры для схем, показанных на рис. 8, *b–e*, выглядят аналогичным образом. Спектры при измерениях по схеме рис. 8, *f* аналогичны спектрам при измерениях по схеме рис. 8, *a*, которые показаны на рис. 4. Таким образом, можно сделать вывод о том, что, поворачивая вставку на больший угол, чем ловушку, получаем ситуацию, при которой боковая кромка вставки становится всегда ниже боковой кромки ловушки (рис. 8, *f*). При этом будем иметь параметры вытекания УХН из ловушки, аналогичные варианту, когда вставка ниже ловушки (рис. 8, *a*).

Указанные особенности вытекания не приведут к систематической ошибке, так как для вычисления  $\gamma$  будут использоваться МК-спектры, посчитанные для конкретной схемы.

### 5.3. Уголок на боковой поверхности ловушки

Так как вставка и ловушка представляют собой тонкостенные обечайки, то, чтобы избежать деформаций в их конструкции, необходимо иметь ребра жесткости. Для этого снаружи боковой поверхности прикрепляется профиль в форме уголка 3 (рис. 6). Уголок, прикрепленный к ловушке УХН, уменьшает зазор между ловушкой и вакуумным объемом. Это замедляет вытекание УХН из ловушки. Были проведены расчеты с размером уголка 2–8 см. Они показали, что эффект малозаметен на кривых вытекания, но виден на графиках спектров сливов. Если такое отличие спектров не учитывается при вычислении  $\gamma$ , то это приводит к систематической ошибке  $\sim 0.01$  s при экстраполяции измерений без вставки.

Для того чтобы указанный эффект не привел к систематической ошибке, для вычисления  $\gamma$  будут использоваться МК-спектры, посчитанные для конкретной конфигурации установки.

## Заключение

Составлена МК-модель эксперимента. В результате моделирования определена систематическая неопределенность, связанная с методом вычисления эффективной



Рис. 9. Внешний вид экспериментальной установки с платформами для обслуживания.

частоты соударений УХН в ловушке, которая составила 0.1 s. Моделирование установки с учетом конструктивных элементов продемонстрировало ее работоспособность.

На данный момент экспериментальная установка в основном изготовлена (рис. 9), планируются криогенные испытания.

При расчетах использовались компьютерные кластеры Отдела информационных технологий и автоматизации и Отделения физики высоких энергий ФГБУ „ПИЯФ“.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 10-02-00217-а, 11-02-91000-АНФ\_а, 13-02-00570-а).

## Список литературы

- [1] *Beringer J., Arguin J.-F., Barnett R.M.* et al. (Particle Data Group) // *Phys. Rev. D.* 2012. Vol. 86. P. 010 001-1–010 001-1526.
- [2] *Serebrov A., Varlamov V., Kharitonov A.* et al. // *Phys. Lett. B.* 2005. Vol. 605. P. 72–78.
- [3] *Serebrov A.P., Varlamov V.E., Kharitonov A.G.* et al. // *Phys. Rev. C.* 2008. Vol. 78. P. 035 505-1–035 505-15.
- [4] *Фомин А.К.* Моделирование экспериментов с ультрахолодными нейтронами. Канд. дис. Гатчина. 2006. 106 с.