

## Моделирование эксперимента по измерению времени жизни нейтрона с большой гравитационной ловушкой ультрахолодных нейтронов с поглотителем

© А.К. Фомин, А.П. Серебров

Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константина  
Национального исследовательского центра „Курчатовский институт“,  
188300 Гатчина, Ленинградская обл., Россия  
e-mail: fomin\_ak@npi.nrcki.ru

(Поступило в Редакцию 5 мая 2017 г.)

В настоящее время в ФГБУ „ПИЯФ“ проводится эксперимент по измерению времени жизни нейтрона с большой гравитационной ловушкой. Планируется достичь точности измерений 0.2 s, что в 4 раза лучше существующего уровня точности. Проведено моделирование модифицированной установки методом Монте-Карло. Показано, что использование в конструкции установки поглотителя позволит увеличить количество хранящихся ультрахолодных нейтронов в ловушке в  $\sim 3$  раза, а также дает возможность для сокращения времени цикла измерений.

DOI: 10.21883/JTF.2017.12.45219.2324

### Введение

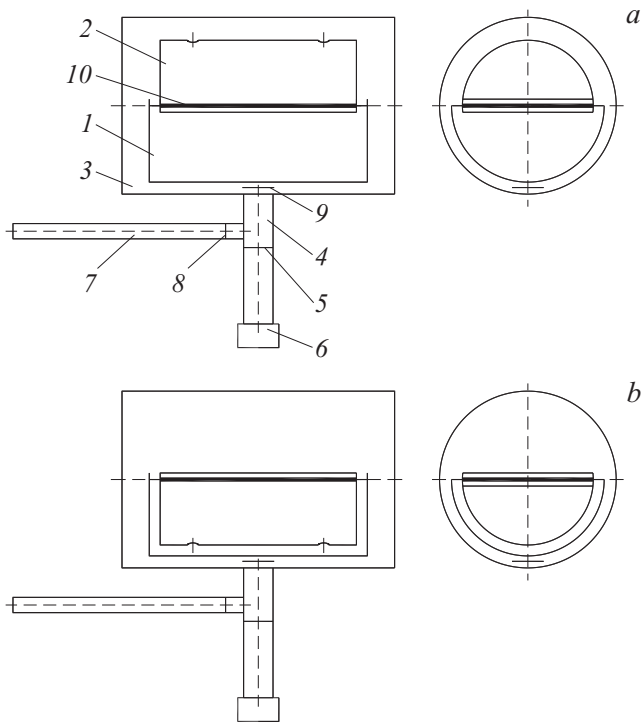
Одним из краеугольных экспериментов физики ультрахолодных нейтронов (УХН) является эксперимент по измерению времени жизни нейтрона. Этот эксперимент направлен на проверку предсказаний Стандартной Модели элементарных частиц в области электрослабых взаимодействий и моделей нуклеосинтеза в ранней Вселенной [1]. История измерений времени жизни нейтрона подробно представлена в Particle Data Group [2]. Интересно отметить, что к настоящему моменту не решен вопрос о расхождении результатов, полученных пучковым методом и методом хранения [3]. Наилучшая точность измерения времени жизни нейтрона достигнута в эксперименте ФГБУ „ПИЯФ“ с гравитационной ловушкой УХН [4]. Развитием этого метода в настоящее время является реализация в ФГБУ „ПИЯФ“ эксперимента с большой гравитационной ловушкой [5,6]. В работе [5] было проведено подробное Монте-Карло-моделирование эксперимента. В настоящей работе рассмотрен способ модификации установки путем добавления в ее конструкцию поглотителя. Показана возможность увеличения точности измерений с модифицированной установкой приблизительно в 2 раза, что является принципиально важным в данной задаче.

### 1. Экспериментальная установка с большой гравитационной ловушкой

Метод измерения состоит в удержании УХН в криогенной ловушке с гравитационным затвором. При помощи различных времен удержания ( $t$ ) мы получаем время хранения  $\tau_{st}$  УХН из измеренного числа нейтронов ( $N$ ), остающихся в ловушке:  $\tau_{st} = (t_2 - t_1) / \ln(N_1/N_2)$ . Полная

вероятность потерь  $\tau_{st}^{-1}$  УХН содержит две части: вероятность  $\beta$ -распада  $\tau_n^{-1}$  и вероятность потерь в стенках ловушки  $\tau_{loss}^{-1}$ :  $\tau_{st}^{-1} = \tau_n^{-1} + \tau_{loss}^{-1}$ ,  $\tau_{loss}^{-1} = \eta(T)\gamma(E)$ , где  $\eta(T)$  — независимый от энергии УХН фактор потерь и  $\gamma(E)$  — получаемая расчетом эффективная частота соударений, 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 соударений УХН  $\gamma(E)$  можно получить при помощи помещения в ловушку дополнительной поверхности (размерная экстраполяция) или (и) различных энергий УХН (энергетическая экстраполяция).

Расчетная схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Ловушка УХН представляет собой горизонтальный цилиндр диаметром 1.4 m и длиной 2 m. Высота ловушки 0.7 m. В нее может опускаться вставка 2, которая представляет собой соосную с ловушкой цилиндрическую поверхность диаметром 1.2 m и длиной 1.8 m. Высота вставки 0.66 m. На дне вставки сделаны два отверстия для улучшения обмена УХН между внутренним объемом вставки и зазором между вставкой и ловушкой. Ловушка и вставка находятся в вакуумном объеме 3 цилиндрической формы диаметром 1.62 m и длиной 2.5 m. Они имеют общую ось вращения типа труба в трубе. Поворот ловушки и вставки может осуществляться независимо, приводы расположены с противоположных сторон. На торцевых поверхностях ловушки и вставки расположен горизонтальный металлический профиль для крепления к оси и придания жесткости конструкции. К вакуумному объему снизу подходит нейтроновод 4 диаметром 0.27 m и длиной 1.19 m, внизу которого располагается детектор 6 для регистрации высокоинтенсивных потоков УХН [7]. Выпуск нейтронов на детектор регулируется затвором 5. Установка заполняется нейтронами из источника через



**Рис. 1.** Расчетная схема экспериментальной установки: 1 — ловушка УХН; 2 — вставка; 3 — вакуумный объем; 4 — нейтронный выпуск УХН из ловушки; 5 — затвор нейтронного выпуска УХН; 6 — детектор УХН; 7 — нейтронный ввод наполнения ловушки УХН; 8 — затвор нейтронного ввода наполнения УХН; 9 — тепловой экран; 10 — поглотитель. *a* — измерения без вставки, *b* — измерения со вставкой.

нейтронный ввод 7 диаметром 0.14 м и длиной 2.1 м. Наполнение установки контролируется затвором 8. Над нейтронным вводом 4 располагается тепловой экран 9 для защиты ловушки от теплового излучения из нейтронного выпуска УХН, так как температура ловушки составляет 80–100 К. Измерения будут проводиться без вставки (рис. 1, *a*) и со вставкой (рис. 1, *b*). Вставка находится все время в положении вверх при измерениях без вставки и в положении вниз при измерениях со вставкой.

Нейтронные вводы 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 полимером фомблин гриз UT-18 с граничной скоростью 4.85 м/с и коэффициентом потерь  $8 \cdot 10^{-6}$ . Отражения нейтронов от стенок нейтронных вводов 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%.

## 2. Использование поглотителя в эксперименте

Процесс измерений (его параметры представлены в табл. 1) состоит в следующем. Сначала объем 3 в

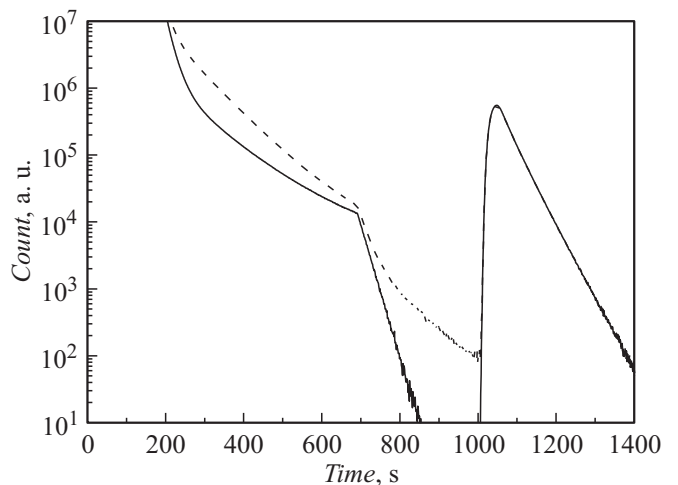
**Таблица 1.** Параметры измерительного процесса для измерений с 1 сливом без поглотителя

Цикл	$t, s$	$\theta_{\text{trap}}, \text{deg}$	$E_{\text{trap}}, ^1 \text{neV}$
Наполнение	200	90	0
Мониторирование	500	15	53.2
Удержание	300; 1600	0	71.7
Слив 1	400	90	0

<sup>1</sup>  $E_{\text{trap}}$  — гравитационный барьер для УХН в ловушке при ее заданном повороте.

течении 200 с наполняется нейтронами из источника (максвелловский спектр) через нейтронный ввод 7 при открытом затворе 8. При этом затвор 5 закрыт. При наполнении объема 3 ловушка УХН находится в повернутом положении (угол поворота  $\theta_{\text{trap}} = 90^\circ$ ). В конце процесса наполнения ловушка поворачивается вниз, и происходит захват УХН. Ловушка останавливается в положении  $\theta_{\text{trap}} = 15^\circ$ , закрывается затвор 8 нейтронного ввода наполнения, открывается затвор 5 нейтронного 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  $\theta_{\text{trap}} = 0^\circ$ . Удержание проводилось с временами  $t_1 = 300$  с или  $t_2 = 1600$  с. После удержания происходит поворот ловушки для слива УХН на детектор 6. Временная диаграмма счета детектора УХН показана на рис. 2. Описан вариант измерений с одним сливом. В результате можно построить размерную экстраполяцию по двум точкам. Также возможно проведение измерений с несколькими последовательными сливами, что позволит построить энергетические экстраполяции для измерений без вставки и со вставкой.

Проблема измерений с мониторингом состоит в том, что при очистке спектра от нейтронов, энергия



**Рис. 2.** Временная диаграмма для измерений без вставки с мониторингом: штриховая линия — без поглотителя, сплошная линия — с неподвижным поглотителем.

**Таблица 2.** Параметры измерительного процесса для измерений с 4 сливами с неподвижным поглотителем

Цикл	$t$ , s	$\theta_{\text{trap}}$ , deg	$E_{\text{trap}}$ , neV
Наполнение	200	90	0
Очистка	300	0	71.7
Удержание	0; 1700	0	71.7
Слив 1	200	12	56.7
Слив 2	200	17	50.7
Слив 3	200	26	40.3
Слив 4	300	90	0

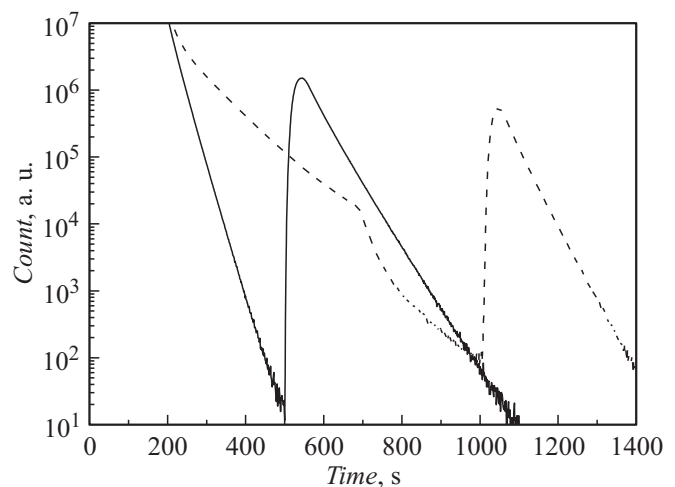
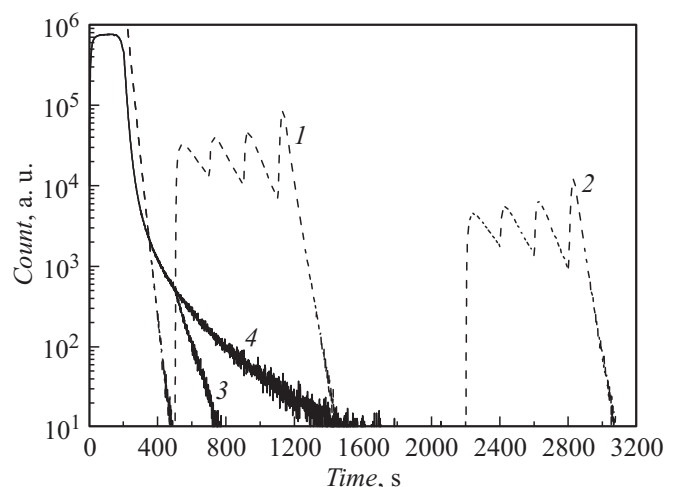
которых превышает гравитационный барьер при удержании  $E_{\text{trap}} = 71.7$  neV, происходит также и вытекание из ловушки нейтронов с меньшей энергией в диапазоне  $E_{\text{trap}} = 53.2 - 71.7$  neV. Также за время мониторинга 500 s происходит существенное уменьшение количества УХН в ловушке из-за бета-распада и потерь при соударениях со стенками.

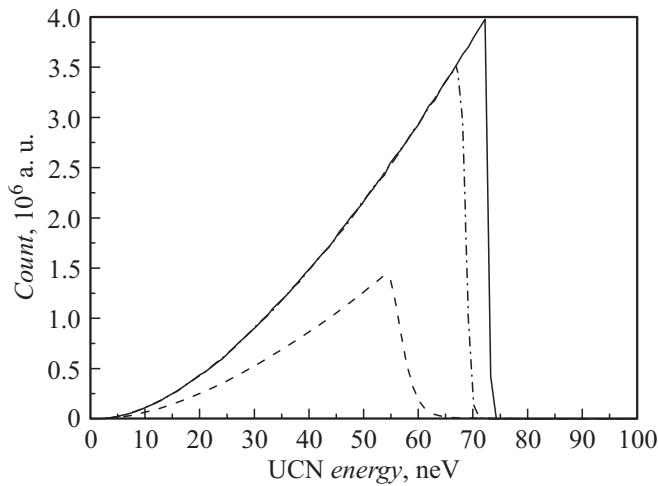
В экспериментах с УХН широко применяются поглотители нейтронов из разных материалов [8]. В эксперименте с гравитационной ловушкой вставка поворачивается в положение вверх или вниз, но остается неподвижной при заданном типе измерений (со вставкой или без вставки). Благодаря этому поглотитель в виде плоского листа может быть размещен по оси установки и жестко прикреплен к вставке — позиция 10 на рис. 1. В дальнейших расчетах габариты поглотителя были выбраны по размеру вставки, т.е.  $1.8 \times 1.2$  m. Следующий расчет был проведен с параметрами измерений из табл. 1 и неподвижным поглотителем, расположенным горизонтально. В этом варианте поглощаются нейтроны с энергией  $E_{\text{trap}} > 71.7$  neV. Временная диаграмма показана на рис. 2. Из полученных результатов видно, что с поглотителем очистка спектра происходит более эффективно. При измерениях без поглотителя виден эффект недомониторирования, который состоит в том, что за время короткого удержания продолжается вытекание из ловушки нейтронов с энергией выше гравитационного барьера при удержании. Это создает дополнительную разность в счетах детектора после короткого и длинного времен удержания, что может привести к систематической ошибке. При измерениях с поглотителем счет детектора за время короткого удержания обусловлен только вытеканием нейтронов, оставшихся после мониторинга во внешнем объеме 3.

При условии использования поглотителя возможна процедура измерений без процесса мониторинга. Вариант такого расчета показан на рис. 3. При этом после наполнения идет короткое удержание для очистки от УХН внешнего объема. За счет исключения мониторинга увеличено количество нейтронов при сливе.

Более детальное изучение процесса поглощения показало, что нейтроны с небольшим превышением энергии,

необходимой для достижения поверхности поглотителя, могут оставаться в ловушке довольно долго. Было проведено моделирование с четырьмя сливами без мониторинга с фиксацией количества поглощенных нейтронов. Параметры измерительного процесса показаны в табл. 2. Временная диаграмма измерений показана на рис. 4. Штриховыми линиями показаны счета детектора УХН, сплошными линиями — количество поглощенных нейтронов после короткого и длинного удержаний. Видно, что процесс поглощения не заканчивается к моменту начала сливов при коротком удержании. Это приведет к систематической ошибке, аналогичной недомониторированию.

**Рис. 3.** Временная диаграмма для измерений без вставки: штриховая линия — с мониторингом без поглотителя, сплошная линия — без мониторинга с неподвижным поглотителем.**Рис. 4.** Временная диаграмма для измерений с 4 сливами без вставки. Штриховые линии — счета детектора УХН после короткого (1) и длинного (2) удержаний. Сплошные линии — количество нейтронов, поглощенных поглотителем после короткого (3) и длинного удержания (4).



**Рис. 5.** Спектры УХН при сливах после короткого времени удержания для измерений с 1 сливом без вставки. Штриховая линия — без поглотителя с мониторингом. Измерения без мониторинга: сплошная линия — с неподвижным поглотителем, штрих-пунктирная линия — с поворотным поглотителем.

Решением проблемы, связанной с длительным поглощением, является подъем поглотителя перед процессом удержания УХН в ловушке. Более низкое положение поглотителя уменьшит количество УХН во время удержания, но избавит от систематического эффекта, связанного с поглощением УХН во время удержания.

Менять положение поглотителя по высоте можно за счет поворота вставки на некоторый угол. Такое решение эффективно с конструкторской точки зрения, но при повороте поглотителя будет работать не вся его плоскость, а только нижний край. Для проверки такого решения проведены дальнейшие расчеты.

Поглотитель находился в повернутом положении во время процессов наполнения и очистки. Перед удержанием он возвращался в горизонтальное положение. Поворот осуществлялся таким образом, что нижний край поглотителя опускался на 5 см ниже оси ловушки (угол поворота поглотителя  $\theta_{abs} = 4.78^\circ$ ). Полученный спектр УХН при измерениях с 1 сливом показан на рис. 5. Видно, что при измерениях с поворотным поглотителем мы получаем очистку спектра от нейтронов с  $E_{trap} > 71.7$  neV. Также на рис. 5 показан спектр УХН при измерениях с мониторингом без поглотителя. Видно, что использование в конструкции установки поглотителя позволит увеличить количество хранящихся в ловушке УХН в  $\sim 3$  раза.

### 3. Моделирование эксперимента с поворотным поглотителем

Далее для установки с поворотным поглотителем был смоделирован весь экспериментальный процесс и

**Таблица 3.** Параметры измерительного процесса для измерений с 4 сливами с поворотным поглотителем

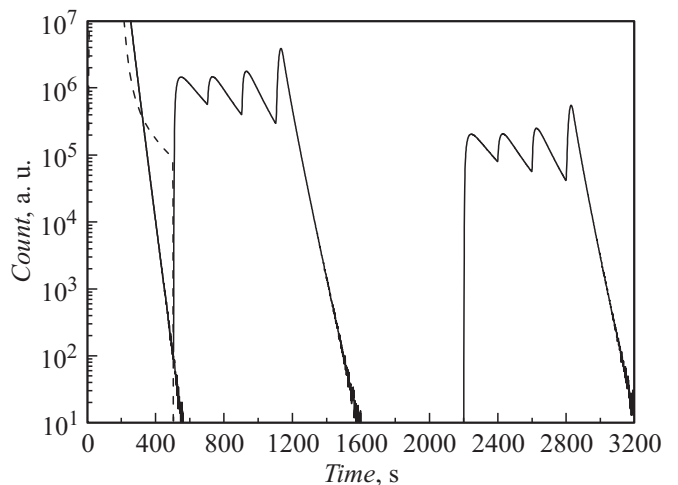
Цикл	$t, s$	$\theta_{trap}, deg$	$\theta_{abs}, deg$	$E_{trap}, neV$
Наполнение	200	90	4.78	0
Очистка	300	0	4.78	71.7
Удержание	0; 1700	0	0	71.7
Слив 1	200	12	0	56.7
Слив 2	200	17	0	50.7
Слив 3	200	26	0	40.3
Слив 4	300	90	0	0

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

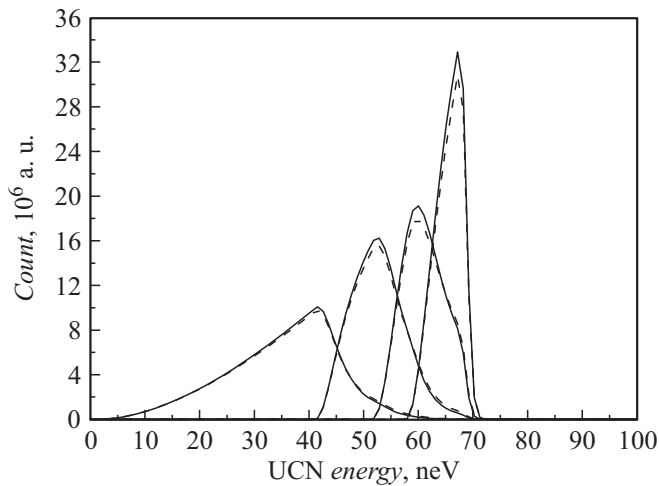
Параметры измерительного процесса показаны в табл. 3. Временная диаграмма представлена на рис. 6. Штриховой линией показано количество нейтронов, поглощенных поглотителем. Как видно из рис. 6, после поворота поглотителя процесс поглощения прекращается.

Обработка данных проводится в соответствии с методом, описанным в разд. 1. При вычислении эффективной частоты соударений использовались спектры УХН при сливах, полученные в данном моделировании методом Монте-Карло (рис. 7).

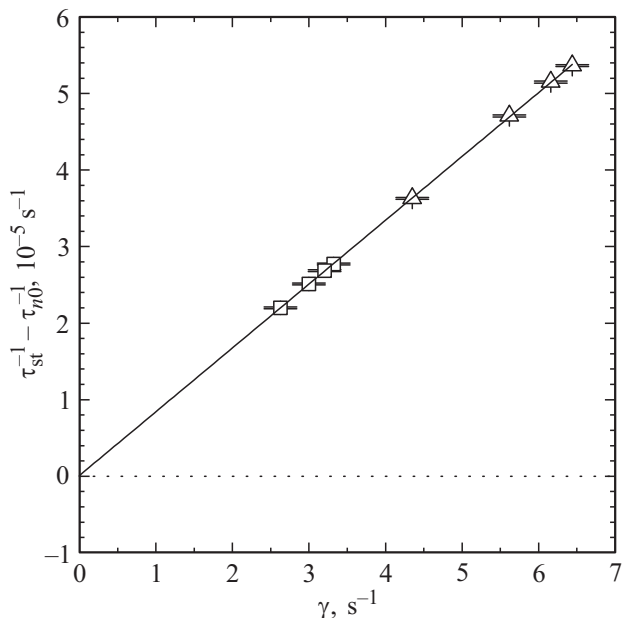
Экстраполяция полученных времен хранения ( $\tau_{st}$ ) ко времени жизни нейтрона представлена на рис. 8. В результате экстраполяции получены следующие отклоне-



**Рис. 6.** Временная диаграмма счета детектора для двух времен удержания 0 и 1700 s. Измерения без вставки и со вставкой графически неразличимы в логарифмическом масштабе. Штриховая линия — количество нейтронов, поглощенных поглотителем.



**Рис. 7.** Спектры УХН при сливах после короткого времени удержания. Сплошная линия — измерения без вставки, штриховая линия — измерения со вставкой.



**Рис. 8.** Экстраполяция ко времени жизни нейтрона. Экспериментальные данные:  $\square$  — измерения без вставки;  $\Delta$  — измерения со вставкой. Сплошная линия — совместная экстраполяция.

ния от значения времени жизни нейтрона, заложенного в модели:  $(-0.17 \pm 0.53)$  s при измерениях без вставки,  $(-0.03 \pm 0.33)$  s при измерениях со вставкой,  $(-0.07 \pm 0.10)$  s 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 s. Эта ошибка может быть принята как систематическая неопределенность метода размерной экстраполяции из-за использования расчетного значения  $\gamma$ .

## Заключение

Проведено моделирование эксперимента по измерению времени жизни нейтрона с большой гравитационной ловушкой УХН. Расчет показал возможность проведения измерений с поворотным поглотителем и без процесса мониторинга. Использование в конструкции установки поглотителя позволит увеличить количество хранящихся УХН в ловушке в  $\sim 3$  раза, а также дает возможность для сокращения времени цикла измерений.

Однако следует отметить, что возможно при проведении измерений следует оставить мониторинг для контроля процесса очистки от нейтронов, энергия которых превышает гравитационный барьер при удержании. При этом угол мониторинга может быть выбран меньше  $15^\circ$ .

При расчетах использовался компьютерный кластер Отдела информационных технологий и автоматизации ФГБУ „ПИЯФ“.

Исследование выполнено в ФГБУ „ПИЯФ“ за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-22-00105).

## Список литературы

- [1] *Серебров А.П.* // УФН. 2015. Т. 185. С. 1179.
- [2] *Patrignani C. et al. (Particle Data Group)* // *Chin. Phys. C* (2016). Vol. 40. 100001.
- [3] *Serebrov A.P., Fomin A.K.* // *Phys. Proc.* 2011. Vol. 17. P. 199.
- [4] *Serebrov A., Varlamov V., Kharitonov A. et al.* // *Phys. Lett. B.* 2005. Vol. 605. P. 72.
- [5] *Серебров А.П., Фомин А.К., Харитонов А.Г. и др.* // *ЖТФ.* 2013. Т. 83. С. 136.
- [6] *Серебров А.П., Фомин А.К., Харитонов А.Г. и др.* // *Кристаллография.* 2016. Т. 61. С. 152.
- [7] *Andreev V., Vassiljev A., Ivanov E. et al.* // *Nucl. Instrum. Meth. A.* 2017. Vol. 845. P. 548.
- [8] *Brose D., Geltenbort P., Plonka-Spehr C. et al.* // *Nucl. Instrum. Meth. A.* 2012. Vol. 664. P. 353.