

15  
**Установка для измерения времени жизни нейтрона с большой гравитационной ловушкой при низкой температуре**

© А.П. Серебров,<sup>1</sup> Е.А. Коломенский,<sup>1</sup> А.К. Фомин,<sup>1</sup> А.О. Коптюхов,<sup>1</sup> И.А. Краснощекова,<sup>1</sup>  
А.В. Васильев,<sup>1</sup> Д.М. Прудников,<sup>1</sup> И.В. Шока,<sup>1</sup> А.В. Чечкин,<sup>1</sup> М.Е. Чайковский,<sup>1</sup> В.Е. Варламов,<sup>1</sup>  
С.Н. Иванов,<sup>1</sup> А.Н. Пирожков,<sup>1</sup> P. Geltenbort,<sup>2</sup> O. Zimmer,<sup>2</sup> T. Jenke,<sup>2</sup> M.G.D. van der Grinten,<sup>3</sup> M.A.H. Tucker<sup>3</sup>

<sup>1</sup> НИЦ „Курчатовский Институт“ — ПИЯФ им. Б.П. Константинова,  
188300 Гатчина, Ленинградская обл., Россия

<sup>2</sup> Institut Max von Laue Paul Langevin, 71 avenue des Martyrs,  
F-38042 Grenoble Cedex 9, France

<sup>3</sup> Science and Technology Facilities Council, Rutherford Appleton Laboratory, Harwell Campus, Didcot,  
Oxon, OX11 0QX, UK  
e-mail: ivanov\_sn@pnpi.nrcki.ru

(Поступило в Редакцию 20 марта 2018 г.)

Наиболее точное в настоящее время измерение времени жизни нейтрона проведено в ПИЯФ с удержанием ультрахолодных нейтронов в гравитационной ловушке. Представлена модернизация установки с большой гравитационной ловушкой с охлаждением до температуры 10–15 К. Представлены результаты измерений температурной зависимости потерь ультрахолодных нейтронов при столкновении со стенками, покрытыми перфторированной пастой Fomblin UT 18 в диапазоне температур 300–77 К. Приведены оценки возможных теплопритоков к ловушке и показана возможность достижения указанного уровня температур в описанной конструкции.

DOI: 10.21883/JTF.2019.02.47089.118-18

## Введение

Измерение времени жизни свободного нейтрона остается важной экспериментальной проблемой. Время жизни нейтрона напрямую используется в расчетах распространения легких ядер при первичном ядерном синтезе в космологических моделях [1,2]. В комбинации с измерениями корреляционных коэффициентов в бета-распаде нейтрона время жизни нейтрона используется для определения векторной  $G_V$  и аксиально-векторной  $G_A$  констант слабого взаимодействия [3–5]. Эти константы, в свою очередь, необходимы для расчетов потоков солнечных и реакторных нейтрино [6,7], а также для проверки унитарности матрицы Кабиббо–Кобайяши–Маскавы в Стандартной Модели и поиска Новой Физики вне Стандартной Модели [8].

Для измерения времени жизни свободного нейтрона используются в основном два метода. В одном методе на пучке холодных нейтронов (скорость  $v \approx 1000$  м/с, энергия  $E \approx 5$  меВ) регистрируются продукты распада нейтронов в области пролета и тем самым определяется число распавшихся нейтронов [9–12]. В другом методе ультрахолодные нейтроны (УХН) (скорость  $v < 7$  м/с,  $E < 250$  пеВ) удерживаются длительное время в специальной ловушке и регистрируется число нейтронов, оставшихся в ловушке после определенного интервала времени.

Наилучшая точность определения времени жизни нейтрона получена в ПИЯФ в эксперименте с гравитационной ловушкой [13,14].

Для создания сосудов хранения нейтронов используется или отражение нейтронов от вещества с положительной длиной когерентного рассеяния [15–18], или отражение нейтронов при взаимодействии магнитного момента нейтрона с градиентом магнитного поля [19,20], или комбинация этих методов с использованием взаимодействия нейтронов с гравитационным полем Земли [13,20–23]. В последнем случае кинетическая энергия нейтронов ограничена величиной потенциальной энергии в гравитационном поле, соответствующей высоте ловушки. Длительность удержания в принципе ограничивается распадом нейтрона. В идеализированном представлении процесса отражения нейтронов поверхность вещества представляется ступенчатым барьером с высотой, соответствующей величине оптического потенциала. Коэффициент отражения от поверхности зависит от компоненты кинетической энергии, определяемой составляющей скорости нейтрона, направленной перпендикулярно поверхности ловушки, и потерями в материале стенок ловушки, которые определяются мнимой частью нейтронно-оптического потенциала.

В эксперименте регистрируется число нейтронов  $N_1$  и  $N_2$ , оставшихся в ловушке после различных времен удержания  $t_1$  и  $t_2$ , и вычисляется постоянная времени удержания  $\tau_{st} = (t_2 - t_1) / \ln(N_1/N_2)$  в предположении экспоненциальной зависимости числа нейтронов в ловушке от времени. Полную вероятность потерь УХН  $\tau_{st}^{-1}$  можно представить в виде суммы двух частей: вероятности бета-распада  $\tau_n^{-1}$ , не зависящей от столкновений нейтронов со стенками ловушки, и вероятности потерь в стенках ловушки  $\tau_{loss}^{-1}$ , зависящей от частоты

столкновений нейтронов со стенками

$$\tau_{st}^{-1} = \tau_n^{-1} + \tau_{loss}^{-1}.$$

Потери нейтронов в ловушке в процессе удержания, не связанные с бета-распадом, происходят за счет поглощения в материале стенок и из-за неупругих столкновений нейтронов со стенками ловушки, при которых происходит увеличение энергии нейтронов до величины выше нейтронно-оптического потенциала и соответственно выход нейтронов за пределы ловушки. Вероятность потерь нейтронов при столкновении со стенками определяется вероятностью потери при одном столкновении  $\mu(E, T)$ , зависящей от энергии нейтронов и температуры стенок ловушки, и частотой столкновений  $\nu(E)$ , зависящей от энергии нейтронов и геометрических размеров ловушки. В свою очередь, вероятность потерь можно представить в виде произведения фактора потерь  $\eta(T)$ , зависящего от свойств поверхности ловушки, но не зависящего от энергии нейтронов, на эффективную частоту столкновений нейтрона со стенками ловушки  $\gamma(E)$ , не зависящую от свойств поверхности, но зависящую от энергии нейтрона и геометрических размеров ловушки

$$\tau_{loss}^{-1} = \mu(E, T) \cdot \nu(E) = \eta(T)\gamma(E).$$

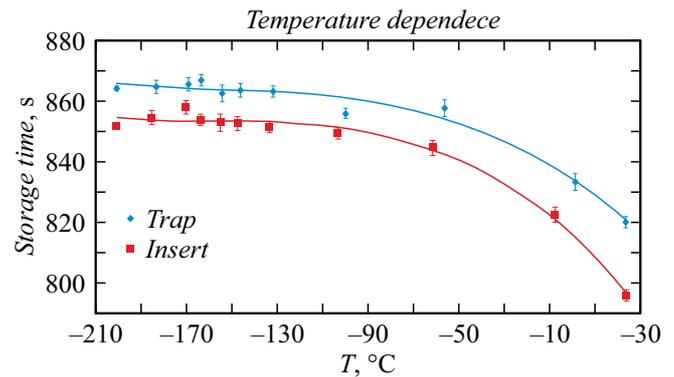
Время жизни нейтрона, определяемое бета-распадом  $\tau_n$ , получается экстраполяцией измеренной постоянной времени хранения  $\tau_{st}$  к нулевому значению эффективной частоты столкновений. Различные значения эффективной частоты столкновений получаются или при использовании ловушек с различными геометрическими размерами (геометрическая экстраполяция), или при различной энергии нейтронов (энергетическая экстраполяция). Чем меньше фактор потерь  $\eta(T)$ , тем меньше вероятность потерь нейтронов  $\mu(E, T)$  и тем ближе измеренная постоянная времени хранения к постоянной времени бета-распада и соответственно меньше диапазон возможных систематических ошибок в эксперименте.

Измерения времени жизни нейтрона с большой гравитационной ловушкой проводились на пучке УХН на высокопоточном реакторе Института Лауэ–Ланжевена в Гренобле (Франция) [14].

## Экспериментальная установка

Установка с большой гравитационной ловушкой и методика измерений подробно описаны в работах [23,24].

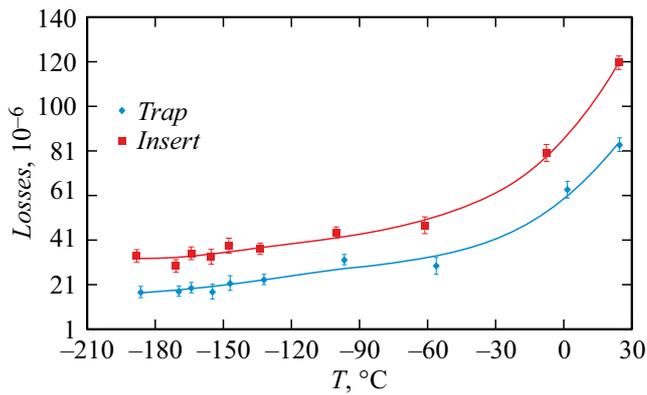
В нашем эксперименте время жизни нейтрона измеряется методом удержания нейтронов в ловушке с гравитационным затвором. Ловушка представляет собой полуцилиндр из меди с горизонтально расположенной осью. Когда ловушка находится в нижнем положении, нейтроны, находящиеся внутри ловушки, не могут из нее выйти, если их кинетическая энергия внизу ловушки недостаточна для подъема в гравитационном поле на



**Рис. 1.** Температурная зависимость постоянной времени хранения УХН в медной ловушке с перфторированным покрытием.

высоту больше или равную радиусу полуцилиндра. Такие нейтроны удерживаются внутри ловушки и могут выпускаться из нее при повороте ловушки. В нашей установке радиус ловушки равен 70 см и в ней могут удерживаться нейтроны, энергия которых внизу ловушки не превышает 69 neV. Энергия выпущенных нейтронов определяется углом поворота ловушки. Внутренняя поверхность ловушки покрыта перфторированной пастой типа „Fomblin grease UT18“, которая имеет очень низкий фактор потерь при отражении УХН и хорошо наносится на металлическую поверхность. Граничная энергия отражения нейтронов для покрытия составляет 106 neV. Изменение эффективной частоты столкновений нейтронов с поверхностью осуществляется путем введения в ловушку дополнительной поверхности (вставки) в виде медного полуцилиндра с меньшим радиусом и длиной, чем у ловушки. Внутренняя и внешняя поверхности вставки покрыты тем же веществом. Экспериментальная установка и методика измерений подробно описана в работе [24]. Установка имеет два вакуумно-изолированных объема. Корпус внутреннего объема, ловушка и вставка охлаждались до температуры  $T = 77$  К. Для этого корпус внутреннего объема имеет четыре емкости, в которые заливался жидкий азот. Две емкости использовались для охлаждения корпуса внутреннего объема, а две другие были соединены гибкими шлангами с трубками, имеющими тепловой контакт с ловушкой и вставкой для их охлаждения. Гибкие шланги позволяли поворачивать ловушку и вставку без нарушения вакуума. Охлаждение ловушки и вставки позволяет уменьшить потери при хранении нейтронов, так как сечение неупругого рассеяния нейтронов при столкновении с поверхностью, покрытой перфторированной пастой, уменьшается при понижении температуры. Измеренная зависимость постоянной времени хранения УХН в ловушке показана на рис. 1.

Зависимость фактора потерь УХН от температуры более явно видна на рис. 2, где из экспериментально измеренной постоянной времени хранения вычтены по-



**Рис. 2.** Температурная зависимость коэффициента потерь УХН при столкновении со стенками ловушки со вставкой и без вставки.

тери, обусловленные бета-распадом нейтронов

$$\tau_{loss}^{-1} = \tau_{st}^{-1} - \tau_n^{-1}.$$

Различие потерь для ловушки без вставки и со вставкой определяется различием в эффективной частоте соударений. Из графика видно, что фактор потерь при температуре  $T = 77\text{ K}$  продолжает уменьшаться с понижением температуры. Этот факт позволяет надеяться, что дальнейшее понижение температуры ловушки и вставки приведет к дальнейшему уменьшению фактора потерь из-за неупругого рассеяния и в результате постоянная времени хранения УХН будет ближе к постоянной времени бета-распада и позволит улучшить точность определения этой фундаментальной величины.

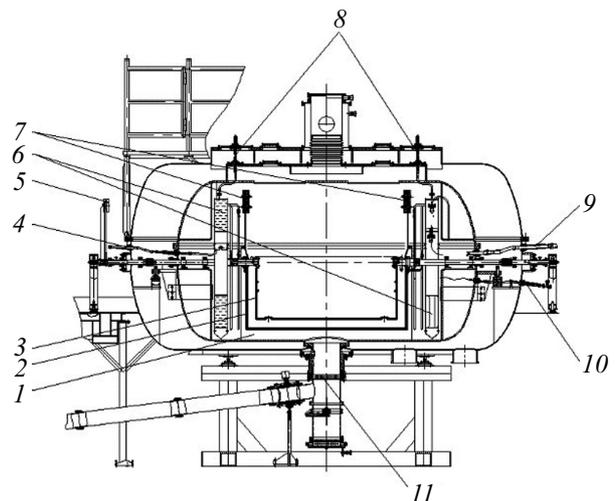
### Модернизация системы охлаждения

Для проведения эксперимента при более низкой температуре предполагается модернизировать существующую экспериментальную установку с большой гравитационной ловушкой. Схема установки представлена на рис. 3.

Охлаждение ловушки и вставки предполагается проводить с помощью жидкого гелия. Для этого сделаны две емкости из нержавеющей стали объемом 140 л каждый, которые будут заполняться жидким гелием из транспортных дьюаров. Испаряющийся из емкостей газ, проходя по трубкам, присоединенным к ловушке и вставке в их верхней части, будет охлаждать их. В модернизированном варианте ловушка будет иметь тот же радиус 70 см, но меньшую длину — 170 см. Вставка, имеющая вид цилиндрической обечайки с радиусом 60 см и длиной 150 см, может опускаться в ловушку. Ловушка и вставка имеют общую ось вращения типа труба-в-трубе и могут поворачиваться независимо друг от друга. Приводы вращения вставки и ловушки расположены на противоположных сторонах снаружи внешнего вакуумного кожуха. Ловушка и вставка

снабжены свинцовыми противовесами для балансировки и уравнивания сосудов хранения. Противовес ловушки закреплен непосредственно на ловушке внутри установки, а противовес вставки закреплен на валу снаружи внешнего вакуумного кожуха. Испаряющийся из емкостей гелий после прохождения по трубкам, закрепленным на ловушке и вставке, выводится наружу по гибким металлическим рукавам и уходит в линию для сбора газообразного гелия. Поток газа, проходящего по контурам охлаждения ловушки и вставки, регистрируется с помощью расходомеров отдельно для ловушки и вставки.

Приток тепла к ловушке и вставке происходит как за счет излучения от кожуха, находящегося при температуре 77 К, так и за счет теплопроводности по валам, на которых поворачиваются ловушка и вставка. Теплообмен за счет остаточного газа во внутреннем объеме пренебрежимо мал, так как в установке поддерживается вакуум на уровне ниже  $10^{-6}\text{ mbar}$ . Точный расчет теплопритока к емкостям с жидким гелием, к ловушке и к вставке затруднителен по причине сложной геометрии поверхностей и приблизительного знания коэффициентов теплового излучения и лучепоглощения для холодных поверхностей, изготовленных из нержавеющей стали и меди, которые, кроме того, покрыты перфторированной пастой. Приблизительная оценка дает величину теплопритока к емкостям с жидким гелием за счет излучения примерно 1 Вт. Дополнительный приток тепла за счет опор, конструкций крепления и подсоединительных гибких рукавов, предназначенных для заливки гелия и для отвода испаряющегося газа, не превышает



**Рис. 3.** Схема новой установки для измерения времени жизни нейтрона: 1 — внутренний объем накопления УХН, 2 — ловушка для хранения УХН, 3 — вставка в ловушку для хранения УХН, 4 — выход гелия после охлаждения вставки, 5 — противовес вставки, 6 — емкости для жидкого гелия, 7 — противовесы ловушки, 8 — тракты заливки гелия в емкости, 9 — выход испаряющегося гелия из емкости, 10 — выход гелия после охлаждения ловушки, 11 — алюминиевая мембрана.

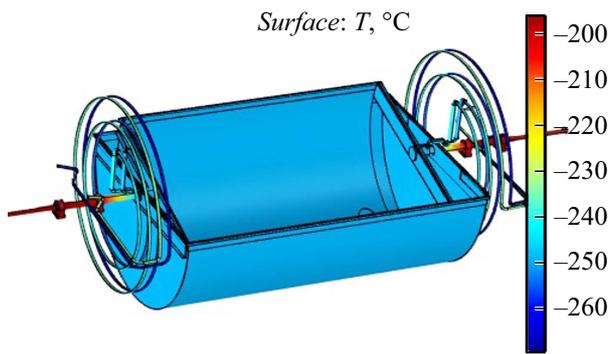


Рис. 4. Распределение температуры в материале ловушки и вставки.

величину  $0.05 \text{ W}$ . Уровень теплопритока к емкостям с жидким гелием определяет скорость испарения и тем самым определяет поток газа, идущий на охлаждение ловушки или вставки. По нашим оценкам данный поток составит примерно  $0.05 \text{ g/s}$ , что соответствует примерно испарению 341 жидкого гелия в сутки.

Оценка теплопритока к ловушке и к вставке по валам оценивалась в предположении, что температура вала на расстоянии  $50 \text{ cm}$  от ловушки (вставки) составляет  $77 \text{ K}$ . Полученная величина теплопритока  $W_{\text{totl}} \approx 0.7 \text{ W}$  может быть уменьшена за счет теплового контакта вала с медной трубкой, по которой еще холодный гелий после охлаждения ловушки (вставки) возвращается в линию сбора гелия. Оценка теплопритока к стенкам сосудов для хранения нейтронов за счет излучения дает примерно такую же величину. Учитывая высокую теплоемкость газообразного гелия  $C = 7.5 \text{ J/(g} \cdot \text{K)}$ , при теплопритоке к ловушке (вставке) на уровне  $1.5 \text{ W}$  и потоке газа  $0.05 \text{ g/s}$ , температура стенок сосудов хранения будет превышать температуру испаряющегося газа на несколько градусов при условии достаточного теплообмена между газом, стенками трубок и материалом ловушки (вставки). Теплопроводность меди, из которой изготовлены сосуды хранения, достаточна для равномерного распределения температуры по поверхности. Результаты моделирования температурного распределения в материале ловушки и вставки представлены на рис. 4.

Для контроля температуры сосудов хранения используются кремниевые диоды, закрепленные на наружной поверхности ловушки в месте, удаленном от трубок охлаждения. При необходимости поток испаряющегося гелия может быть увеличен с помощью нагревателей, помещенных внутри емкостей с жидким гелием.

Изменения сечения охлаждающей трубки как сужение, так и расширение наряду с изгибами трубок приводят к увеличению местного сопротивления течению газа. Это означает, что для пропускания газа, испаряющегося из емкостей по трубкам охлаждения, закрепленным на ловушке и вставке, давление внутри емкостей должно превышать давление в линии сбора гелия примерно на  $500 \text{ mbar}$ . В этом случае конструкция, находящаяся в

вакууме, должна выдерживать давление  $0.15 \text{ MPa}$ . Емкость для жидкого гелия имеет форму тороида с плоскими стенками. Диаметр внешней обечайки  $1350 \text{ mm}$ , диаметр внутренней обечайки  $675 \text{ mm}$ , ширина  $135 \text{ mm}$ . Емкость изготовлена из полированной нержавеющей стали толщиной  $1.5 \text{ mm}$ . Для обоснования устойчивости и механической прочности конструкции были проведены расчеты напряжений в материале. Схематическое изображение емкости для жидкого гелия и результаты расчета напряжений показаны на рис. 5.

Для увеличения механической прочности внутри емкости к боковым стенкам корпуса приварены две концентрические полосы с отверстиями для перетекания жидкого гелия и размещения уровнемера и технологических трубок, которые используются для заливки жидкого гелия и вывода испаряющегося газа. Внутри емкости предусмотрен нагреватель. Были проведены испытания емкости для жидкого гелия до избыточного давления  $0.2 \text{ MPa}$ , которые подтвердили надежность выбранной конструкции. Вес одной емкости для жидкого гелия равен примерно  $35 \text{ kg}$  и для первоначального охлаждения емкости от  $77$  до  $4 \text{ K}$  требуется снять тепло примерно  $0.19 \text{ MJ}$ . Для этого необходимо испарение примерно  $751$  жидкого гелия. Этот испаряющийся газ будет использоваться для начального охлаждения ловушки и свинцовых противовесов, необходимых для балансировки ловушки, поворачивающейся с помощью вала, соединенного с шаговым двигателем. По оценкам теплоемкости, для начального охлаждения ловушки и противовесов необходимо снять тепло  $2 \text{ MJ}$ . Для начального охлаждения вставки необходимо меньшее количество газа, так как противовес вставки расположен снаружи вакуумных кожухов и не требует охлаждения. Таким образом, для начального охлаждения двух емкостей необходимо примерно  $1501$  жидкого гелия, а для поддержания низ-

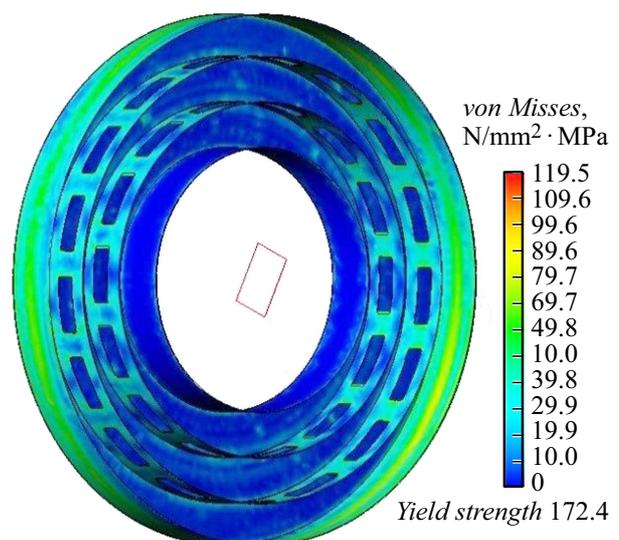


Рис. 5. Вид емкости для жидкого гелия с расчетами напряжений.

кой температуры ловушки и вставки в ходе измерений потребуется примерно 351 жидкого гелия в сутки.

Измерение времени жизни нейтрона при удержании в ловушке, охлажденной до низкой температуры (примерно 10–15 К), позволит улучшить точность определения этой фундаментальной величины в сравнении с измерениями, проведенными другими методами.

## Заключение

В настоящий момент необходимые части экспериментальной установки изготовлены и планируется их монтаж. Авторы выражают благодарность О.П. Федоровой и Е.Н. Леоновой за конструкторскую разработку узлов установки. Авторы благодарны А.А. Костыгову и сотрудникам ЦЭТО ПИЯФ за помощь в изготовлении установки.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (Проект № 14-22-00105).

## Список литературы

- [1] *Iocco F., Mangano G., Miele G.* // et al. Phys. Repor. 2009. Vol. 472. N 1. P. 1–76.
- [2] *Coc A.* // Nucl. Instrum. Meth. A. 2009. Vol. 611. P. 224–230.
- [3] *Byrne J.* // Rep. Progr. Phys. 1982. Vol. 45. P. 115–184.
- [4] *Schreckenbach K., Mampe W.* // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 1992. Vol. 18. P. 1–34.
- [5] *Dubbers D., Schmidt M.D.* // Rev. Mod. Phys. 2011. Vol. 83. N 4. P. 1111–1171.
- [6] *Mention G., Fechner M., Lasserre Th.* // et al. Phys. Rev. D. 2011. Vol. 83. P. 073006.
- [7] *Zhang C., Qian X., Vogel P.* // Phys. Rev. D. 2013. Vol. 87. P. 073018.
- [8] *Cirigliano V., Gardner S., Holstein B.* // Prog. Part. Nucl. Phys. 2013. Vol. 71. P. 93–118.
- [9] *Byrne J., Dawber P., Spain J.A.* // et al. Phys. Rev. Lett. 1990. Vol. 65. N 3. P. 289–292.
- [10] *Byrne J., Dawber P., Habeck C.G.* // et al. Europhys. Lett. 1996. Vol. 33. N 3. P. 187–192.
- [11] *Nico J.S., Dewey M.S., Gilliam D.M.* // et al. Phys. Rev. C. 2005. Vol. 71. P. 055502.
- [12] *Yue A.T., Dewey M.S., Gilliam D.M.* // et al. Phys. Rev. Lett. 2013. Vol. 111. P. 222501.
- [13] *Serebrov A., Varlamov V., Kharitonov A.* // et al. Phys. Lett. B. Vol. 605. P. 72–78.
- [14] *Серебров А.П., Коломенский Э.А., Фомин А.К.* // и др. Письма в ЖЭТФ. 2017. Т. 106. Вып. 10.
- [15] *Mampe W., Ageron P., Dates C.* // et al. Phys. Rev. Lett. 1989. Vol. 66. P. 593–596.
- [16] *Pichlmaier A., Varlamov V., Schreckenbach K.* // et al. Phys. Rev. B. 2010. Vol. 693. P. 221–226.
- [17] *Arzumanov S., Bondarenko L., Chernyavsky S.* // et al. NIM A. 2000. Vol. 440. P. 511–516.
- [18] *Arzumanov S., Bondarenko L., Chernyavsky S.* // et al. Phys. Lett. B. 2015. Vol. 745. P. 79–89.
- [19] *Vladimirski V.V.* // Sov. Phys. JETP. 1961. Vol. 12. P. 740.
- [20] *Paul W., Anton F., Paul L.* // et al. Zeitsch. Phys. C. 1989. Vol. 45. P. 25–30.
- [21] *Ezhov V.F., Andreev A.Z., Van G.* // et al. NIM A. 2009. Vol. 611. P. 167–170.
- [22] *Salvat D.J., Adamek E.R., Barlow D.* // Phys. Rev. C. 2014. Vol. 89. P. 052501(R).
- [23] *Серебров А.П., Фомин А.К., Харитонов А.Г.* // и др. Кристаллография. 2016. Т. 61. Вып. 1. С. 152–156.
- [24] *Серебров А.П., Фомин А.К., Харитонов А.Г.* // и др. ЖТФ. 2013. Т. 83. Вып. 11. С. 136–141.