

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО НЕЙТРОН-НЕЙТРОННОМУ РАССЕЙЯНИЮ В РФЯЦ-ВНИИТФ

CURRENT STATUS AND PROSPECTS OF THE EXPERIMENTS ON DIRECT MEASUREMENT OF NEUTRON-NEUTRON SCATTERING AT RFNC-VNIITF

С. А. Андреев, А. Е. Лыжин, Д. В. Хмельницкий
S. A. Andreev, A. E. Lyzhin, D. V. Khmelnskiy

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академика Е. И. Забабахина»

Federal State Unitary Enterprise «Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research
Institute of Technical Physics»

В докладе приведено описание работ, выполненных на растворном импульсном ядерном реакторе ЯГУАР, по первому прямому измерению сечения рассеяния нейтрона на нейтроне. Представлены обоснование и описание созданной экспериментальной установки, включая состав измерительного тракта и метод регистрации тепловых нейтронов, результаты выполненных калибровочных экспериментов на инертных газах и пробных измерений сечения n-n-рассеяния. Показаны пути дальнейших исследований, необходимых для проведения первого прямого измерения сечения рассеяния нейтрона на нейтроне.

The presentation describes the work performed on solution pulse nuclear reactor YaGUAR on the first direct measurement of neutron-neutron scattering. It also presents substantiation and description of experimental facility, including the composition of measuring channel and method of thermal neutron registration. The results of performed calibration experiments on inert gases and trial measurements of n-n scattering cross-section are presented. The authors showed the ways of the further studies that are necessary for running the first direct neutron-neutron scattering. In conclusion, we suggest the prospects of the further research.

Введение

К настоящему времени экспериментальное подтверждение зарядовой симметрии ядерных сил не получено. Определенные заключения по проблеме зарядовой симметрии ядерных сил могут быть сделаны из сравнения длин nn - и pp -рассеяния. Значение длины pp -рассеяния установлено надежно в экспериментах по рассеянию протонов на протонах $a_{pp} = -17,3 \pm \pm 0,005$ (стат) $\pm 0,4$ (сис) фм [1]. Однако измерение длины nn -рассеяния встретило трудности: имеющиеся данные, полученные в непрямых экспериментах, не допускает проверки современных кварковых подходов к нарушению зарядовой симметрии. Так в конце 90-х годов после многолетних исследований с противоречивыми результатами полученные по результатам исследований реакций $d(\pi^-, n\gamma)n$ и $d(n, nn)p$ значения длины nn -рассеяния $a_{nn} = -18,55 \pm 0,05$ (стат) $\pm \pm 0,3$ (сис) фм [2] и $a_{nn} = -18,7 \pm 0,3$ (стат) $\pm 0,6$ (сис) фм [3] указывают на нарушение зарядовой симметрии (CSB) ядерных сил: длина nn -рассеяния в синглетном спиновом состоянии несколько больше чем ядерная часть длины pp -рассеяния $\Delta a_{CSB} = a_{pp} - a_{nn} = 1,3 \pm 0,6$ фм. Однако, в 2001 году после новых исследований $d(n, np)n$ реакции, в которых было получено $a_{nn} = -16,27 \pm 0,40$ фм [4], с равным вкладом в ошибку статистической и систематической составляющих, отличающееся от сообщенного в [3], возвращает нас к многолетней неопределенности заключения о зарядовой симметрии ядерных сил и к необходимости новых подходов к проблеме.

Прямые измерения длины nn -рассеяния, постановка которых предлагалась на обычных и импульсных реакторах, сверхмощных ускорителях и при подземных ядерных взрывах до сих пор не осуществлены. Причина такого положения дел в чрезвычайной сложности эксперимента. Эксперименты по нейтрон-нейтронному рассеянию на реакторе ЯГУАР, которым посвящена данная работа – первый совместный проект РФЯЦ-ВНИИТФ и ОИЯИ (г. Дубна), вступивший в стадию реализации.

Обоснование постановки эксперимента

Реактор ЯГУАР – растворный импульсный реактор, в качестве топлива в котором используется водный раствор сульфата уранила, имеет сквозной центральный канал диаметром 12 см. Выбор реактора ЯГУАР в качестве нейтронного источника был основан на результатах предварительных расчетов, показавших возможность достижения необходимой точности результатов измерений.

Возможная схема эксперимента по измерению сечения pn -рассеяния на реакторе ЯГУАР показана на рис. 1. Активная зона размещена на уровне ~2 м от уровня пола. Полиэтиленовый замедлитель нейтронов, конвертирующий быстрые нейтроны в тепловые, расположен внутри сквозного канала реактора. В нижней части вакуумированного канала, с размещенным в нем коллиматором, находится высокоэффективный детектор для регистрации тепловых нейтронов методом времени пролета. Защита из борированного полиэтилена и расположенный в верхней части вакуумного канала поглотитель на основе ^{10}B экранирует детектор от эпитепловых и быстрых нейтронов.

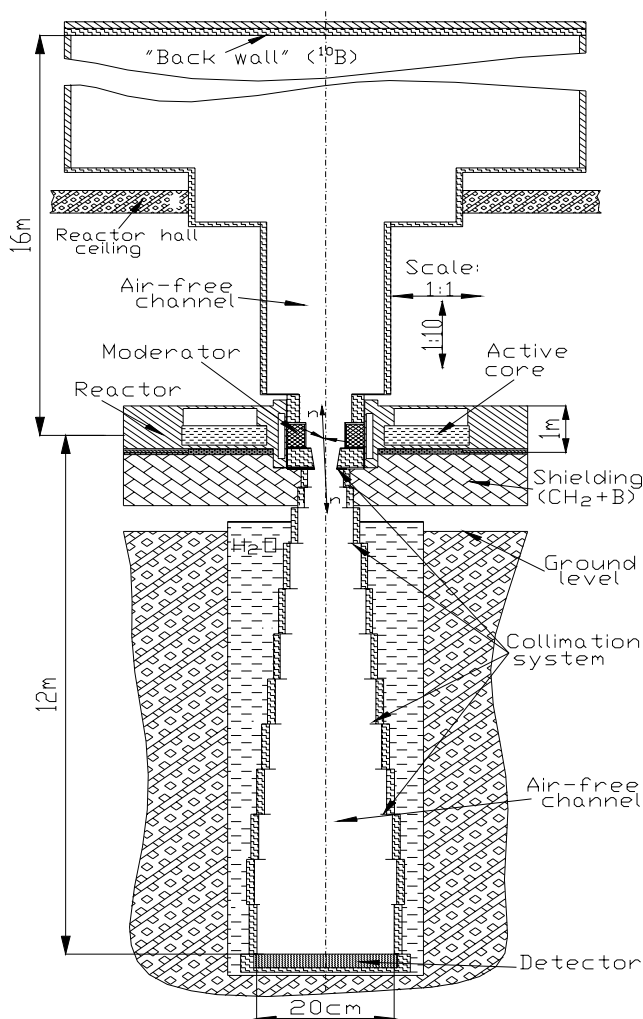


Рис. 1. Схема эксперимента по pn -рассеянию на реакторе ЯГУАР

При генерации импульса делений в реакторе быстрые нейтроны термализуются в замедлителе, после чего взаимодействуя друг с другом в центральной полости замедлителя в результате pn -рассеяния попадают в детектор, находящийся на дне подреакторной шахты. Коллимационная система необходима для исключения прямой видимости поверхности замедлителя детектором

(верхний конический коллиматор под замедлителем) и для исключения попадания в детектор нейтронов после первого рассеяния на стенках вакуумного канала. Для уменьшения многократного рассеяния тепловых нейтронов в вакуумном канале вся внутренняя поверхность стен канала покрыта кадмием, толщиной 1 мм. Из-за того, что замедлитель имеет очень узкую полость (6 см диаметром), нет возможности исключить попадания нейтронов в детектор после первого рассеяния в верхней части вакуумного канала, на так называемой «задней стенке». Поэтому задняя стенка отнесена как можно дальше от реактора и сделана из материала с минимальным альбедо для тепловых нейтронов – ^{10}B . Толстая защита из борированного полиэтилена и вода вокруг нижней части вакуумного канала служат для подавления потока быстрых нейтронов. Для исключения рассеяния нейтронов на остаточном газе, в канале должен быть вакуум не хуже 10^{-6} Мбар.

Для оценки эффекта – ожидаемого числа нейтронов, зарегистрированных детектором, в результате нейтрон-нейтронных рассеяний в полости замедлителя был выполнен большой цикл расчетов по определению нейтронных полей в сквозном канале реактора и получению количественные оценки ожидаемого эффекта с использованием данных непрямых измерений сечения nt -рассеяния [7]. Было показано, что для достижения статистической точности 5 % в оценке сечения nt -рассеяния необходимо обеспечить отношение фон/эффект не более 40–50 %. Подавление нейтронного фона от реактора в этом случае должно составлять $\sim 10^{16}$. Расчеты с таким уровнем подавления нейтронного фона до этого не проводились. Тем не менее, эти расчеты были успешно проведены. Они были выполнены двумя независимыми группами из ОИЯИ и ВНИИТФ, с использованием программ MCNP и ПРИЗМА [5], и хорошо согласовывались между собой.

Выполненные измерения нейтронных полей в канале во время импульса реактора – пространственные, временные и энергетические распределения, во-первых, продемонстрировали достоверность выполненных расчетов, во-вторых, показали, что для подавления фона быстрых нейтронов (на ~ 4 порядка) с помощью использования времяпролетного метода нужно иметь длину передней пролетной базы не менее 12 м. Также на основании серии экспериментов и численного моделирования была выбрана толщина слоя размещаемого в центральном канале реактора полиэтиленового конвертора 3 см, что обеспечивало в максимальном импульсе делений мгновенную плотность потока тепловых нейтронов в центре канала $\sim 1 \times 10^{18} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. В этом случае оценка числа столкновений нейтронов друг с другом за импульс в канале реактора дает величину $\sim 2,5 \cdot 10^7$, а ожидаемый счет детектора должен составить ~ 125 отсчетов при уровне фона ~ 30 % от ожидаемого эффекта.

Создание экспериментальной установки

Ориентируясь на рассмотренную схему измерений была создана экспериментальная установка [8, 9], состоящая из растворного реактора ЯГУАР и вакуумируемой коллимационной системы глубиной 12 и высотой 16 метров. Выполненные испытания продемонстрировали возможность получения давления остаточного газа в данной системе менее 10^{-6} Мбар, что вполне удовлетворительно для проведения измерения сечения nt -рассеяния.

Из-за невозможности изготовления из чистого ^{10}B коллиматоры были изготовлены из ^{10}B , спеченного с серой. Характеристики таких коллиматоров обеспечивают нейтронный фон только на уровне 70–80 % по отношению к эффекту. Тем не менее, они позволили отработать всю методику эксперимента проводить измерения сечения nt -рассеяния с точностью ~ 20 %.

Используемый при измерениях детектор тепловых нейтронов с учетом ожидаемого через него потока быстрых нейтронов ($\sim 10^4$) и γ -квантов ($\sim 10^5$) должен удовлетворять следующим требованиям:

- эффективность к тепловым нейтронам ~ 100 %;
- минимальная эффективность к быстрым нейтронам и γ -квантам;
- скорость счета $\sim 10^6 \text{ с}^{-1}$;
- амплитудное разрешение – не ниже 20 % (что связано с необходимостью уменьшения фона быстрых нейтронов и γ -квантов для повышения точности при определении эффективности детектора).

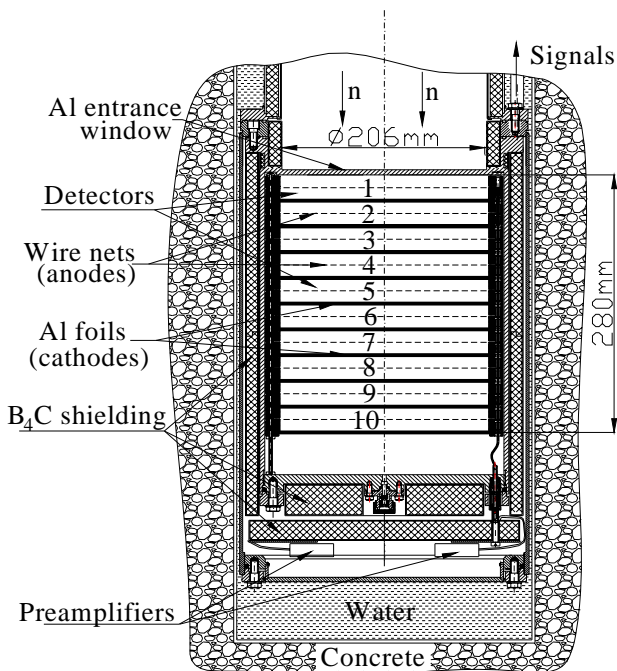


Рис. 2. Детектор для регистрации тепловых нейтронов

С учетом заявленных требований был разработан и изготовлен уникальный детектор – пропорциональный газовый счетчик. Детектор был разделен на 10 частей, фактически на 10 независимых детекторов, представляющих собой плоские цилиндры толщиной 28 мм и диаметром чувствительной области 215 мм (рис. 2). Детекторы отделены друг от друга тонкой Al-фольгой толщиной 12 мкм. Аноды представляют собой однослойную сетку из параллельных нитей толщиной 20 мкм, расположенных на расстоянии 3 мм друг от друга. Сигнал от каждого детектора усиливается и обрабатывается независимо от других. Каждый сигнал оцифровывается и записывается, обработка осуществляется в режиме off-line. Для обеспечения быстродействия (длительность импульса детектора от зарегистрированного нейтрона, усиленного предусилителем, должна быть ≤ 100 нс) детектор заполнялся смесью газов ${}^3\text{He}$ (0,5 б) + CF_4 (0,7 б) и при рабочем напряжении 4,5 кВ, что обеспечивает эффективность регистрации нейтронов с энергией 25 мэВ 86 %.

Калибровочные измерения на инертных газах

Для отработки методики и проверки достоверности получаемых результатов были выполнены калибровочные измерения – измерения сечений упругого рассеяния нейтронов на инертных газах [10]. При этом для обеспечения точности измерения сечения mn -рассеяния на уровне 5 % в калибровочных измерениях необходимо определить сечение рассеяния на газе с погрешностью ~ 1 %. Учитывая, что соответствующую статистику желательно набрать за небольшое количество импульсов реактора, концентрация газа в полости должна такой, чтобы за один импульс детектор сосчитал $\sim 10^4$ нейтронов, рассеянных на газе. В качестве газов были выбраны ${}^4\text{He}$ и на Ar.

Результатом проведенных калибровочных измерений (см. рис. 9) явилось сравнение отношений измеренных сечений упругого рассеяния тепловых нейтронов на ${}^4\text{He}$ и Ar $\frac{\sigma_{\text{He}}}{\sigma_{\text{Ar}}} = 1,236 \pm 0,046$ и их известных значений [6] $\frac{\sigma_{\text{He}}}{\sigma_{\text{Ar}}} = 1,20 \pm 0,03$. Совпадение этих двух величин в пределах погрешности их определения является подтверждением корректности метода измерений и достоверности получаемых результатов.

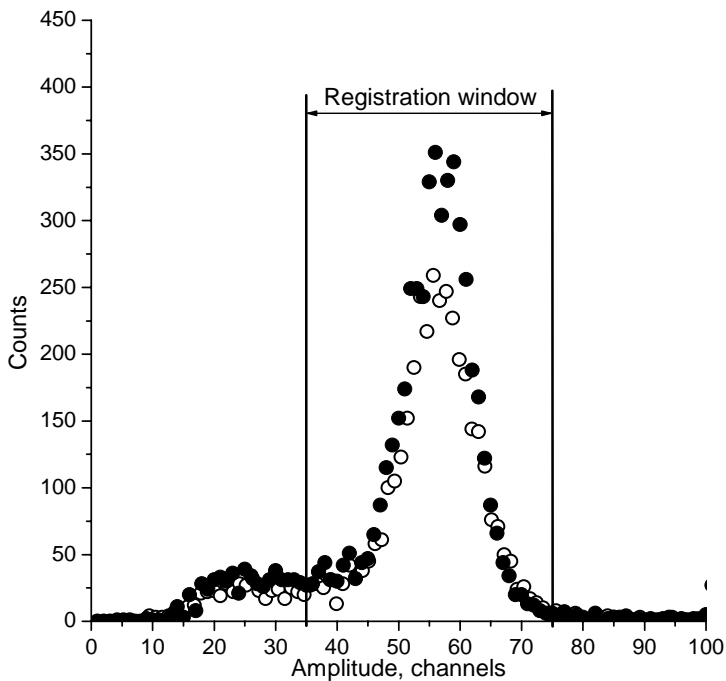


Рис. 3. Амплитудные спектры mn -детектора при регистрации нейтронов, рассеянных на ${}^4\text{He}$ для 2-х импульсов реактора

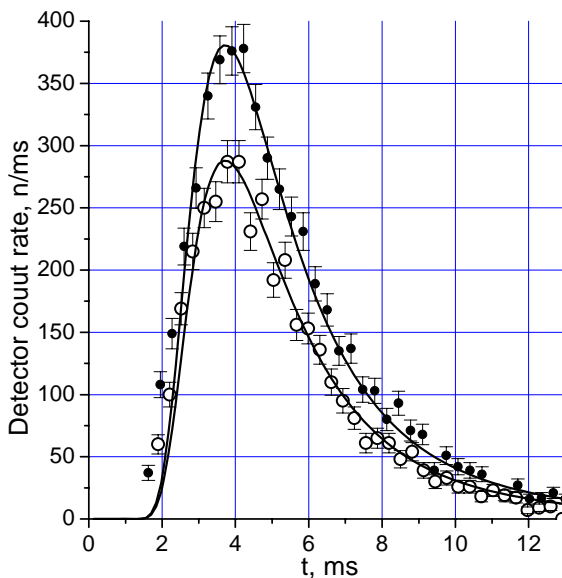


Рис. 4. Зависимость скорости счета детектора от времени при регистрации нейтронов, рассеянных на ${}^4\text{He}$

Также были выполнены фоновые измерения в стационарном режиме работы реактора. Анализ их результатов показал, что в условиях проведения экспериментов по mn -рассеянию фон быстрых нейтронов в максимальном импульсе делений не превысит 10-ти отсчетов детектора, что составляет меньше 10% от ожидаемого полезного сигнала.

Первые эксперименты по нейтрон-нейтронному рассеянию

Первые эксперименты по измерению сечения нейтрон-нейтронного рассеяния были проведены в апреле 2008 г. Полученные экспериментальные времяпролетные спектры очень похожи на расчетные спектры, показанные на рис. 5, что указывает на регистрацию детектором тепловых нейтронов. Однако число сосчитанных детектором нейтронов в максимальном импульсе делений с энергией 31 МДж оказалось в $\sim 20 \div 30$ раз больше ожидаемого.

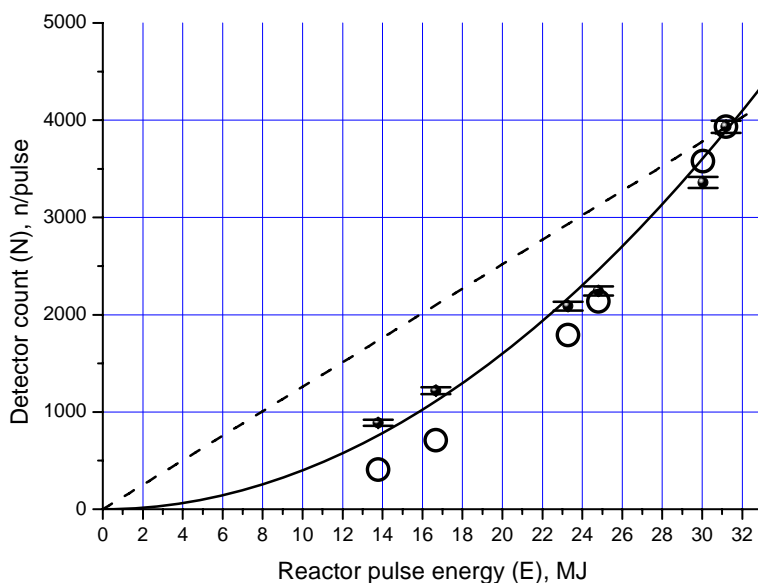


Рис. 5. Зависимость числа зарегистрированных нейтронов N от энерговыделения в импульсе: черные точки – экспериментальные данные; штриховая линия – $N \sim E$; сплошная линия – $N \sim E^2$; светлые точки – расчетная зависимость числа nn -рассеянных нейтронов, приведенная к экспериментальному значению $E = 31$ МДж

Для интерпретации результатов первых экспериментов рассмотрим зависимость числа зарегистрированных детектором нейтронов от энерговыделения в импульсе (рис. 5). Известно, что число отчетов детектора, связанных с нейтронами, рассеянными на нейтронах, пропорционально длительности импульса делений и квадрату плотности потока тепловых нейтронов. Флюенс нейтронов пропорционален энерговыделению в импульсе, длительность импульса в первом приближении можно считать обратно пропорциональной энерговыделению. Тогда полезный сигнал детектора должен иметь кубическую зависимость от энерговыделения, что соответствует светлым точкам на рис. 5. Число нейтронов, рассеянных от стенок канала или от краев коллиматоров, пропорционально флюенсу и линейно зависит от энергии импульса (штриховая кривая на рис. 5).

Экспериментальные данные, как видно на графике, отличаются от линейной и кубической зависимостей и лучше всего аппроксимируются квадратичной функцией. Это означает, что число частиц, на которых происходит рассеяние тепловых нейтронов пропорционально энергии импульса, или флюенсу, а не плотности потока нейтронов. Наиболее вероятное объяснение – рассеяние нейтронов происходит на молекулах газа, десорбирующихся со стенок канала под действием гамма-нейтронного излучения (радиационная десорбция).

Направления дальнейших исследований

Несмотря на возникшие проблемы при проведении экспериментов по прямому измерению сечения нейтрон-нейтронного рассеяния на реакторе ЯГУАР, планируется продолжить работы

в данном направлении. Среди первоочередных задач, которые должны быть решены для достижения конечной цели, выделим следующие:

1. Постановка экспериментов на реакторе ЯГУАР по проверке гипотезы о присутствии эффекта радиационной десорбции в коллимационной системе при проведении измерений сечения нейтронно-нейтронного рассеяния и влияния данного эффекта на результаты измерений.

В случае подтверждения гипотезы о радиационной десорбции будут разработаны меры, направленные на подавления данного эффекта. Например, выбор материалов коллимационной системы с низким уровнем десорбции газа.

2. Проведение зачетных экспериментов на реакторе ЯГУАР, обеспечивающих набор требуемой статистики отсчетов детектора, по результатам которых с использованием разработанной расчетной методики будет определено значение сечения нейтрон-нейтронного рассеяния.

Параллельно с решением перечисленными выше задач также планируется провести проработку возможности использования для измерения сечения нейтрон-нейтронного рассеяния реакторного комплекса БАРС-5+РУН-2. Большая внутренняя полость РУН-2, ее горизонтальное расположение и гораздо (более чем на порядок) меньшая по сравнению с реактором ЯГУАР длительность импульса делений при примерно одинаковом полном флюенсе нейтронов в полости позволяет надеяться на существенное улучшения соотношения сигнал-фон и, как следствие, достижения более высокой точности измерения сечения нейтрон-нейтронного рассеяния. Насколько это реально – как раз и является задачей для исследования.

Заключение

Для получения новой информации о зарядовой симметрии ядерных сил предложена и обоснована постановка эксперимента на импульсном растворном реакторе ЯГУАР по прямому измерению сечения рассеяния нейтрона на нейтроне. Для успешной реализации такого эксперимента проделана огромная работа: создана уникальная экспериментальная установка, включающая с себя реактор ЯГУАР с полиэтиленовым конвертором в центральном канале, вакуумный канал с коллимационной системой длиной 12 м, высокоэффективный детектор тепловых нейтронов. Выполненные калибровочные измерения по определению сечения упругого рассеяния нейтронов на инертных газах гелий-4 и аргон продемонстрировали работоспособность метода и возможность успешного решения поставленной задачи.

Возникшие проблемы при проведении первых экспериментов по нейтрон-нейтронному рассеянию, обусловленные, как предполагается, радиационной десорбцией молекул газа с поверхности канала, не позволили получить к настоящему времени значимый результат. Тем не менее, в ближайшем будущем планируется тщательно изучить и решить вопрос, связанный с радиационной десорбцией, после чего продолжить эксперименты по прямому измерению нейтрон-нейтронного сечения.

Список литературы

1. Howell C. R., Chen Q., Carman T. S., Hussein A., Gibbs W. R., Gibson B. F., Mertens G., Moore C. F., Morris C., Obst A., Pasyuk E., Roper C. D., Salinas F., Sterbenz S., Tornow W., Walter R. L., Whiteley C. R., and Whiton M. // Phys. Lett. B 444 (1998) 252.
2. D. E. Gonzalez Trotter, F. Salinas, Q. Chen, A. S. Crowell, W. Glockle, C. R. Howell, C. D. Roper, Schmidt D., Slaus I., Tang H., Tornow W., Walter R. L., Witala H., and Zhou Z. // Phys. Rev. Lett. 83 (1999) 3788.
3. G. A. Miller, B. V. R. Nefkens, I. Slaus // Phys. Reports. 194 (1990), 1.
4. V. Huhn, L. Watzold, Ch. Weber, A. Siepe, W. von Witsch, H. Witala, and W. Glockle // Phys. Rev. C 63 (2001) 014003.
5. Arnautova M.A., Kandiev Ya.Z., Lukhminsky B.E., Malyshkin G.N. Monte-Carlo simulation in nuclear geophysics. In comparison of the PRIZMA Monte-Carlo program and benchmark experiments // Nucl.Geophys., 1993. V. 7, № 3. P. 407–418.
6. Mughabghab S. F. Atlas of Neutron Resonances // N.Y, Elsevier, 2006.
7. Чернухин Ю. И., Кандиев Я. З., Леваков Б. Г., Модестов Д. Г., Хмельницкий Д. В. Прямое измерение сечения nn -рассеяния на реакторе ЯГУАР. Моделирование эффекта // Труды международного совещания «Исследование в гигантских импульсах тепловых нейтронов от импульсных реакторов и в ловушках больших ускорителей». Дубна, с. 109.

8. Чернухин Ю. И., Кандиев Я. З., Ларцев В. Д., Леваков Б. Г., Модестов Д. Г., Симоненко В. А., Стрельцов С. И., Хмельницкий Д. В. Прямое измерение сечения нейтрон-нейтронного рассеяния на реакторе ЯГУАР. Обоснование методики эксперимента // Препринт 225, ВНИИТФ, 2006.

9. Кандиев Я. З., Ларцев В. Д., Модестов Д. Г., Симоненко В. А., Стрельцов С. И., Чернухин Ю. И., Хмельницкий Д. В. Обоснование методики эксперимента по измерению сечения нейтрон-нейтронного рассеяния на реакторе ЯГУАР // Известия Челябинского научного центра», 2007. Вып. 4 (38), с. 19–25.

10. Чернухин Ю. И., Ларцев В. Д., Лыжин А. Е., Стрельцов С. И., Мингазов О. А., Хмельницкий Д. В. Обработка и анализ результатов модельного эксперимента при подготовке к прямому измерению нейтрон-нейтронного рассеяния на реакторе ЯГУАР // Препринт 237, ВНИИТФ, 2009.